

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA MODELO DE  
TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA, SE DISPONDRA  
EN EL LABORATORIO DE AGUAS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
COLOMBIA**

**EDWIN JAVIER HERNÁNDEZ TRIANA  
CARLOS AUGUSTO CORREDOR BRICEÑO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA MODELO DE  
TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA, SE DISPONDRA  
EN EL LABORATORIO DE AGUAS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE  
COLOMBIA**

**EDWIN JAVIER HERNÁNDEZ TRIANA  
CARLOS AUGUSTO CORREDOR BRICEÑO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
ingeniero civil**

**Director  
JESUS ERNESTO TORRES  
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2017**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Director de Investigación**

---

**Revisor Metodológico**

---

**Firma del jurado**

Bogotá D.C., abril 2017



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## DEDICATORIA

*Agradezco a Dios por brindarme la paciencia necesaria para así alcanzar todos los objetivos propuestos durante mi formación como profesional*

*Dedico este trabajo de grado a mi familia ya que son pieza esencial en mi vida e igualmente me brindan su apoyo incondicional para cada día prosperar como persona y profesional, motivando alcanzar una de tantas metas planteados en mi de vida, debido que es satisfactorio poder realizarlos en compañía de mis seres queridos*

*Doy gracias al Ingeniero Ernesto Torres director de investigación en este trabajo de grado, que por su paciencia y su absoluta ayuda, apporto con su conocimiento y experiencia en la realización de este proyecto con el cual se le brinca un aporte a la formación de futuros ingenieros en la Universidad Católica de Colombia*

*Agradezco a la Universidad por abrirme las puertas, donde pude adquirir conocimientos importantes para mi vida profesional y personal*

*Edwin Hernández Triana*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>14</b>
<b>1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>15</b>
1.1.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL ADECUADO PARA CONSTRUCCION DEL MODELO DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA .....	17
1.1.1.1 VIDRIO .....	17
1.1.1.1 TUBERIA Y ACCESORIOS PVC .....	19
1.1.2 DIMENSIONAMIENTO .....	20
1.1.3 PRUEBAS QUE ANTECEDEN A LA CONSTRUCCION DEL MODELO, EN EL LABORATORIO DE AGUAS .....	20
<b>1.1 JUSTIFICACION .....</b>	<b>22</b>
<b>2. GENERALIDADES .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 MODELO PLANTA DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA ...</b>	<b>23</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 OBJETIVO ESPECIFICOS .....</b>	<b>24</b>
<b>4. DELIMITACION .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 TIEMPO .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 ALCANCE .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3 LIMITACIONES .....</b>	<b>25</b>
<b>5. MARCO DE REFERENCIA .....</b>	<b>26</b>

<b>5.1 MARCO TEORICO</b> .....	<b>26</b>
5.1.1 ESQUEMA CONVENCIONAL DE ABASTECIMIENTO .....	26
5.1.2 VOLUMEN DE AGUA .....	27
<b>5.2 MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>27</b>
<b>5.3 MARCO LEGAL</b> .....	<b>43</b>
5.3.1 METODOS Y PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA SEGÚN LEY 475/98.....	43
<b>5.4 MARCO HISTORICO</b> .....	<b>44</b>
5.4.1 HISTORIA TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.....	44
<b>6. EQUIPOS UTILIZADOS</b> .....	<b>45</b>
<b>6.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS UTILIZADO</b> .....	<b>46</b>
6.1.1 SISTEMA DE DOSIFICACION .....	47
6.1.2 EQUIPO AUXILIAR.....	52
6.1.3 TAMAÑO DEL FLOCULO PRODUCIDO .....	56
6.1.4 DETERMINACION DE PH, ALCALINIDAD, CUAGULANTE Y TURBIEDAD O COLORES RESIDUALES.....	57
<b>7. DISEÑO METODOLOGICO</b> .....	<b>71</b>
<b>7.1 TIPO DE INVESTIGACION</b> .....	<b>71</b>
<b>7.2 METODOLOGIA</b> .....	<b>71</b>
<b>8. RESULTADOS</b> .....	<b>73</b>
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	<b>76</b>
<b>10. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>77</b>
<b>11. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>78</b>
<b>12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>80</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>81</b>

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Tipos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable en Colombia.....	12
Tabla 2. Matriz evaluación elección PTAP .....	13
Tabla 3. Exigencias en la construcción al vidrio plano .....	15
Tabla 4. Coagulación / floculación .....	28
Tabla 5. Parametros de diseño para floculador tipo Alabama.....	32
Tabla 6. Guía para diseño de floculador Alabama.....	32
Tabla 7. Velocidad de sedimentación.....	35
Tabla 8. Principales características de los filtros por gravedad más utilizados .....	39
Tabla 9. Características de los agitadores .....	46
Tabla 10. Forma de reportar los resultados en turbidímetros nefelométricos .....	50
Tabla 11. Forma de expresar los resultados de la medición de color.....	51
Tabla 12. Soluciones patrón para la prueba de coagulación .....	53
Tabla 13. Índice de Floculación Willcomb .....	54
Tabla 14. Aplicación práctica: Determinación de dosis óptima .....	58
Tabla 15. Resultados de la prueba de concentración óptima .....	61



## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág.</b>
Ilustración 1. Floculador Alabama.....	31
Ilustración 2. Accesorios PVC.....	16
Ilustración 3. Equipo de prueba de jarras.....	42
Ilustración 4. Vasos de precipitado .....	43
Ilustración 5. Jarra de precipitado de 2 litros.....	45
Ilustración 6. Estatores o deflectores .....	46
Ilustración 7 .Gradiente de velocidad / rpm jarra sección circular.....	47
Ilustración 8. Gradiente de velocidad / rpm .....	48
Ilustración 9. Turbidímetro .....	49
Ilustración 10. Comparador para estimar el tamaño del floculo producido en la coagulación .....	57
Ilustración 11. Correlación turbiedad / dosis óptima .....	60
Ilustración 12. Muestra agua problema.....	73
Ilustración 13. Muestra salida floculador.....	74
Ilustración 14. Muestra salida sedimentador.....	74
Ilustración 15. Muestra salida filtro o sistema.....	75

## **ANEXOS**

- Anexo A Dimensionamiento del modelo para Floculador Alabama y Sedimentador tasa alta (Formulas - Libro)
- Anexo B Dimensionamiento modelo (Excel)
- Anexo C Planos Floculador Alabama, Sedimentador tasa alta, sistema completo
- Anexo E Resolución 2115
- Anexo F Registro Fotográfico
- Anexo G Cronograma

## INTRODUCCIÓN

En este documento se destaca que, en la formación de los ingenieros, es fundamental combinar la teoría con la práctica, frente a este postulado, la Universidad Católica de Colombia, ha desarrollado diversas herramientas complementarias para abordar este tipo de ejercicios, los cuales, en su desarrollo causaban problemas de costos, tiempos y seguridad. Es fundamental incentivar la investigación, se aportará una solución técnica, práctica y operativa en el proceso pedagógico, complementando la teoría en especial las cátedras de: Mecánica de fluidos, Hidráulica, Hidrología, Acueductos y Plantas de tratamiento de agua potable y residual, con la realización de este documento se verán aplicados todos los conocimientos adquiridos en el programa de ingeniería civil de la Universidad Católica de Colombia.

La elaboración de este documento inicia con la investigación de lo que es un sistema de abastecimiento de agua potable (acueducto), las diferentes obras hidráulicas que facilitan obtener el agua potable para consumo humano, las funciones de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP). Con la investigación de los sistemas de abastecimiento que existen en Colombia, realizando la valoración de los diferentes sistemas de tratamiento de agua potable en los municipios de Colombia, investigación de los prototipos actuales en la academia de ingeniería y los creados en la Universidad Católica de Colombia. Se definen las alternativas óptimas, para el diseño y construcción del modelo, para el Laboratorio de Aguas de la Universidad Católica de Colombia.

Una vez diseñado, construido e instalado el modelo en el laboratorio se realizarán prácticas propias del modelo en donde se determinarán los reactivos, aditamentos y mejoras para que el modelo tenga una eficiencia del 80% en la potabilización del agua. Se creó una guía metodológica para las prácticas sobre el modelo, que será de apoyo para que los alumnos de la Universidad Católica de Colombia identifiquen los diferentes procesos del tratamiento del agua cruda, para así garantizar una calidad del agua apta para el consumo humano.

## 1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

Para la definición del tipo de sistema más adecuado a desarrollar, se tendrán en cuenta parámetros específicos de plantas utilizados en los municipios de Colombia, desarrollando demostraciones con una eficiencia del 80%. Adicional a este diagnóstico se tiene en cuenta la siguiente tabla: La construcción del modelo se hará teniendo en cuenta una matriz de selección para el modelo, los sistemas más utilizados en Colombia son:

**Tabla 1. Tipos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable en Colombia**

PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE MAS UTILIZADAS EN COLOMBIA	
UBICACIÓN	TIPO DE PLANTA
El Dorado	Floculador mecánico, Sedimentador Tasa alta
Boyacá	Agua subterranean, Sedimentador simple
Cota	Pozo profundo, Floculador mezcla rápida, Sedimentador tasa alta
Silvania	Sedimentador tasa alta inclinada
Zipaquirá	Floculador tipo horizontal, sedimentador tasa alta placas paralelas
La Laguna	Floculador mecanico flujo vertical, sedimentador tasa alta
Nobsa	Floculador tipo vertical
Acacias Meta	Floculador tipo alabama, Sedimentador tasa alta
Silvania	Sedimentador tasa alta inclinada
Sibate	Floculador tipo horizontal, Sedimentador tasa alta
Facatativa	Floculador tipo alabama, Sedimentador tasa alta
Funza	Floculador tipo alabama, Sedimentador tasa alta
Fusa	Floculador tipo alabama, Sedimentador tasa alta tipo colmena

Fuente: Autores

Esta información fue recopilada durante las asignaturas de Acueductos y plantas de tratamiento de agua potable y residual, donde se justifican los procesos que operan algunos municipios de Colombia.

De acuerdo a un previo análisis de modelos existentes, en las diferentes entidades del País, como:

- Acueducto de Bogotá Planta el Dorado, diseño de una planta piloto para el Tratamiento de Aguas Crudas.
- Universidad Militar cuenta con un Canal de Aguas para análisis de caudales.

- Universidad Corpoboyaca cuenta con un modelo de Planta de Tratamiento de Agua Potable con Floculador Tipo Flujo Horizontal.
- Empresas Públicas de Medellín, con diversos modelos a escala de Tratamientos de Agua Potable y Residuales.

Para el desarrollo del proyecto se tendrán en cuenta los parámetros más relevantes de cada uno de los sistemas, lo cual será la base para la selección del modelo a construir, mediante una matriz.

Tabla 2. Matriz evaluación elección PTAP

<b>Floculadores Hidraulicos</b>	<b>Eficiencia Tiempo de Retencion (min)</b>	<b>Velocidad del flujo (m/s)</b>	<b>Gradiente de Velocidad (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Costos (pesos)</b>	<b>Total</b>
Floculador Horizontal	4 puntos	2 puntos	4 puntos	2 puntos	2 puntos
Floculador Vertical	4 puntos	2 puntos	4 puntos	2 puntos	2 puntos
Flujo Tipo Alabama	5 puntos	4 puntos	4 puntos	2 puntos	2 puntos
<b>Sedimentadores</b>	<b>Eficiencia Tiempo de Retencion (min)</b>	<b>Velocidad del flujo (m/s)</b>	<b>Gradiente de Velocidad (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Costos (pesos)</b>	<b>Total</b>
Flujo Horizontal	5 puntos	2 puntos	5 puntos	2 puntos	2 puntos
Flujo Vertical	4 puntos	3 puntos	3 puntos	4 puntos	4 puntos
Tasa Alta	4 puntos	2 puntos	4 puntos	4 puntos	4 puntos

Fuente: Autor

La escala de evaluación de la eficiencia del sistema se tomará entre valores de 1 a 5 de la siguiente manera:

- 1 a 2 *Baja*
- 3 a 4 *Media*
- 5 *Alta*

Según el diagnóstico anterior se deduce que los tipos más comunes de Plantas de Tratamiento de Agua Potable son los sistemas Floculadores Tipo Flujo Horizontal, Vertical o Alabama; Sedimentadores de Flujo Horizontal, Vertical o Tasa Alta.

Teniendo en cuenta estos parámetros, el estudio de la matriz analizada, los modelos existentes en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia; el modelo tendrá las siguientes especificaciones.

- Floculador Tipo Alabama
- Sedimentador Tasa Alta Placas Paralelas

## 1.1.1. SELECCIÓN DEL MATERIAL ADECUADO PARA CONSTRUCCION DEL MODELO DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA

### 1.1.1.1. VIDRIO

La palabra vidrio proviene del latín “vitreus”, que hace referencia a algo elaborado de “vitrum” que es igual al vidrio.

Los vidrios forman un grupo familiar de cerámicas. La nobleza del vidrio reside en un conjunto de cualidades que son la transparencia óptica, la resistencia, el aislamiento y la facilidad con que puede fabricarse. El vidrio es un material que, en la construcción, tiene diversos usos:

Se pueden encontrar ladrillos de vidrio y placas de vidrio (para muros), baldosas de vidrio, para pisos, y cristales o vidrios planos, para aberturas. Hay distintos tipos de vidrio que se usan en construcción y que se obtienen a través de variados procesos de fabricación, y agregando distintos materiales a la materia prima básica de todos los vidrios:

- ❖ Arena de sílice
- ❖ Caliza Carbonato
- ❖ Sulfato de sodio

El vidrio es un material resistente, pero también es frágil y peligroso cuando sufre roturas. Y por este motivo debería evitarse su uso intuitivo o irresponsable, que es utilizar un tipo de vidrio que no sea adecuado para el uso que se le da.

✓ *Características y propiedades:*

- ❖ *Ópticas:* Transparencia, color, reflexión
- ❖ *Mecánicas:* Indeformable, Resistente a la abrasión
- ❖ *Térmicas:* Aislamiento, resistente al fuego
- ❖ *Acústicas:* Atenuación acústica
- ❖ *Eléctricas:* Resistividad, aislamiento
- ❖ *Químicas:* Estabilidad, resistencia al medio ambiente

Estas características y propiedades se pueden clasificar en exigencias muy claras que se les hacen a los vidrios cuando de construir se trata

Tabla 3. Exigencias en la construcción al vidrio plano

<b>Exigencias para el vidrio plano como material de construcción</b>	
<b><i>Misiones</i></b>	<b><i>Funciones del vidrio</i></b>
Estética y diseño	Transparencia
	Color
	Dimensiones / Formas
Confort	Aislamiento térmico
	Aislamiento acústico
	Transmisión óptica / calidad
Seguridad	Resistencia mecánica
	Protección bienes / personas
	Durabilidad

Fuente: Autor

Cada día se realizan más construcciones en todo el mundo en las cuales uno de los principales elementos de trabajo es el vidrio y es que le da un toque de elegancia a la estructura el cual la vuelve atractiva ante los ojos de los espectadores.

✓ *Ventajas del vidrio:*

- ❖ El Vidrio tiene infinitas posibilidades de utilización
- ❖ El Vidrio es un material higiénico y aséptico
- ❖ El Vidrio es un óptimo aislante térmico
- ❖ El Vidrio es un material resistente hasta tal punto
- ❖ El Vidrio es maleable durante su conformación
- ❖ El Vidrio o es un material resistente
- ❖ El Vidrio o es durable y fiable
- ❖ El Vidrio o es reutilizable
- ❖ El Vidrio o es reciclable

Vidrio y medio ambiente: Material ecológico por excelencia, el vidrio es el único material de embalaje reciclable al 100%. Contribuye así a la protección del Medio Ambiente. Utilizando la tecnología apropiada, la producción de vidrio es totalmente eficiente, pues no hay desperdicios. Los restos de vidrio regresan nuevamente al proceso productivo.

### 1.1.1.2. TUBERIA Y ACCESORIOS PVC

El PVC no es un material como los otros. Es el único material plástico que no es 100% originario del petróleo. El PVC contiene 57% de cloro (derivado del clorato de sodio - sal de cocina) y 43% de etileno, derivado del petróleo.

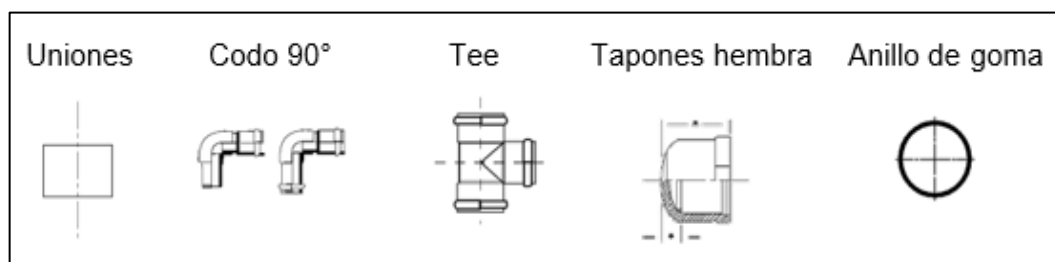
A partir de la sal, por el proceso de electrólisis, se obtienen el cloro, la soda cáustica y el hidrógeno. La electrólisis es la reacción química resultante del paso de una corriente eléctrica por agua salada (salmuera). Así se obtiene el cloro, que representa 57% del PVC producido.

El petróleo, que representa apenas 43% del PVC fabricado, pasa por un camino un poco más largo. El primer paso es una destilación del petróleo crudo, obteniéndose así la nafta leve. Esta pasa, entonces, por el proceso de craqueamiento catalítico (quiebra de moléculas grandes en moléculas menores, con la acción de catalizadores que aceleran el proceso), generándose el etileno. Tanto el cloro como el etileno están en la fase gaseosa y reaccionan produciendo el DCE (dicloro etano).

A partir del DCE, se obtiene el MVC (mono clorato de vinilo, unidad básica del polímero. El polímero es formado por la repetición de la estructura manométrica). Las moléculas de MVC son sometidas al proceso de polimerización, o sea, van ligándose y formando una molécula mucho mayor, conocida como PVC (policlorato de vinilo), que es un polvo muy fino, de color blanco, y totalmente inerte.

Como se ilustra a continuación se observará algunos de los accesorios a emplear en la construcción.

Ilustración 2. Accesorios PVC



Fuente: [www.pavco.com](http://www.pavco.com)

La válvula de bola: viene a complementar el Sistema de Tuberías y Accesorios pvc de Agua Fría, pensando en la importancia que tiene el control de agua y otros fluidos, y su impacto sobre el medio ambiente.

Por los motivos que se expusieron anteriormente se determina que el material con el cual se va a trabajar en la elaboración de la planta es el pvc.



### 1.1.2. DIMENSIONAMIENTO

Las dimensiones trabajadas en el presente modelo son aplicación de ejemplos pedagógicos descritos en textos de trabajo de construcción de obras hidráulicas; texto guía PURIFICACION DEL AGUA, Romero Rojas Jairo Alberto, ejemplo 4.15 pág. 115 (Floculador Alabama) y ejemplo 5.13 pág. 173 – 175 (Sedimentador Tasa Alta). Realizados sobre plantas de tratamiento de agua potable reales, manejadas actualmente en los municipios de Cundinamarca. Igualmente se realizó el respectivo cálculo en Excel originando una tabla dinámica en la cual se puede calcular el dimensionamiento en cualquier caso que se requiera ingresando los datos correspondientes en dicha tabla dinámica.

Para el modelo se reduce 10 veces la medida de los ejemplos descritos anteriormente, originando un modelo de Escala 10:1, las dimensiones definitivas se modificaron para facilidad de construcción del modelo, arrojando los siguientes resultados:

### 1.1.3. PRUEBAS QUE ANTECEDEN A LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO, EN EL LABORATORIO DE AGUAS

✓ *Determinación de alternativas de Tratamiento*<sup>1</sup>:

Para efectuar la selección de las alternativas de tratamiento, es necesario reunir información sobre la calidad de la fuente que permita conocer sus variaciones a lo largo del tiempo. Con esta finalidad deben programarse varios muestreos de la fuente que comprendan por lo menos un ciclo estacional completo: estiaje y creciente, a fin de recopilar información suficiente para conocer las variaciones de calidad e identificar los parámetros de calidad que constituyen un problema. Estos son aquellos parámetros que exceden los niveles máximos indicados en las normas de calidad de agua para consumo humano principalmente locales. Los parámetros de calidad decisivos para seleccionar la alternativa de tratamiento adecuada son los siguientes:

- ❖ Turbiedad y/o color
- ❖ Número más probable de coliformes termotolerantes/100 ml de muestra

Lo ideal será realizar por lo menos un muestreo semanal durante los meses

---

<sup>1</sup> (Lidia)

más representativos de las épocas de estiaje y creciente. Lo mínimo aceptable sería disponer, por lo menos, de información acerca de la época de creciente o de lluvias, que es la determinante en cuanto a la selección del tratamiento, porque al diseñar el proyecto de planta, la podemos dejar preparada para operar con filtración directa, lo cual no implica un costo adicional en la construcción del sistema.

Para esto solo se acomodan apropiadamente las unidades de la planta de tal modo que se tenga acceso directo de la mezcla rápida al canal de distribución a los filtros. Durante la operación del sistema, si la filtración directa es conveniente o necesaria, podrá ser implantada sin problema alguno. Todos los datos obtenidos sobre la turbiedad, el color, la alcalinidad, el pH y el NMP/100 ml de muestra se procesan en histogramas de valores promedio, máximos y mínimos mensuales y curvas de frecuencia acumulada.

#### ✓ *Selección de Parámetros óptimos de los Procesos*<sup>2</sup>

La determinación de los parámetros de los procesos mediante simulación en el laboratorio es necesaria en la fase de proyecto para determinar las dimensiones de las unidades de la planta o para rehabilitar u optimizar sistemas existentes. Durante la evaluación de un sistema, ello servirá para determinar si las unidades están operando de acuerdo con las condiciones que el agua requiere y durante la operación de una planta, permitirá ajustar los procesos a las mencionadas condiciones.

- Fundamentos:

Investigaciones realizadas en las últimas décadas han demostrado que para cada tipo de agua existen parámetros de diseño específicos que optimizan los procesos y producen la máxima eficiencia remocional. En el proceso de coagulación, O'Melia y Stumm importantes científicos han demostrado la existencia de una dosis óptima que varía en función del pH y de la concentración de coloides presente en el agua cruda. Los autores encontraron que con dosis menores que la óptima no se desestabilizan los coloides y con dosis mayores, se pueden llegar a reestabilizar, lo que deteriora la calidad del efluente. En floculación, Villegas y Letterman demostraron que la dosis óptima (D), el tiempo de retención (T) y el gradiente de velocidad (G) interactúan de acuerdo con la relación  $GT^n = K$ , en la cual (n) y (K) depende de cada tipo de agua.

Argaman y Kaufman demostraron también que, para obtener una eficiencia dada, existe un tiempo de retención mínimo, que corresponde a un determinado valor de gradiente de velocidad y que, por debajo de este valor mínimo, ya no se consigue la misma eficiencia, no importa cuál sea el gradiente de velocidad aplicado en el proceso. Dejaron establecido que para

---

<sup>2</sup> (págs. 219, Ibid)

cada tiempo de retención 220 Manual I: Teoría dada, existe un gradiente de velocidad que optimiza el proceso y que, al ser superado, se rompe el flóculo, lo que causa el deterioro de la calidad del efluente.

A partir de la aplicación de estos criterios, posteriormente se comprobó que la variación de estos parámetros produce un decrecimiento en la eficiencia de los procesos, lo que produce una calidad de agua inferior, generalmente con un consumo mayor de sustancias químicas.

Con la misma metodología usada en estas investigaciones y con los recursos normalmente disponibles en los laboratorios de las plantas de tratamiento, se han elaborado procedimientos para la determinación de estos parámetros, de manera de obtener la máxima eficiencia posible, mediante la aplicación de los criterios expuestos.

## **1.2. JUSTIFICACION**

Esta planta de tratamiento de agua potable orienta tanto a estudiantes que no se forman en esta área y ampliara los conocimientos de otros que están muy cercanos a los recursos hídricos laboralmente, el poder hacer las prácticas en este prototipo dará conocimiento y experiencia sobre el tratamiento de las aguas y los químicos utilizados en los procesos potabilización de agua.

Para la Universidad Católica de Colombia es conveniente ya que promueve el conocimiento de una manera más práctica a los estudiantes y se puede garantizar un conocimiento más claro. Es de suma importancia realizar esta clase de prácticas en las instalaciones de la universidad debido a que se fomenta una idea clara del método de aprendizaje.

## **2. GENERALIDADES**

### **2.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La Universidad Católica de Colombia cuenta con una Planta de Tratamiento para la potabilización de agua, a la entrada de los laboratorios del área de aguas, la cual no está en funcionamiento desde hace varios años, se necesita construir una planta de tratamiento para potabilización de agua para que los estudiantes puedan tener un mejor aprendizaje y desarrollar sus conocimientos pudiendo observar que partes componen una planta de purificación y el proceso por el cual es sometida el agua cruda desde el ingreso hasta el final de la planta pasando por sus diferentes procesos, en que sectores de la planta se agregan los químicos para coagulación y floculación, con un objetivo claro de poder comparar este proceso con otros sistemas implementados en otras plantas de tratamiento para la purificación del agua y que se usan bajo diferentes condiciones determinadas.

También esto incentivaría a los alumnos a investigar y profundizar sobre nuevas tecnologías e implementaciones en Plantas de tratamiento para la potabilización de agua a nivel Nacional e Internacional. Se evitaría el problema de trasladarse hacia plantas de tratamiento para agua ya existentes en el territorio nacional, esto genera gastos tanto en dinero como en tiempo, e inconvenientes de horarios, permisos y seguridad.

### **2.2. MODELO PLANTA DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA**

Se desarrollará teniendo en cuenta la información recopilada:

- Sistemas más eficientes y económicamente viables
- Modelos más utilizados a nivel Colombia
- Modelos existentes en el laboratorio de Aguas de la Universidad Católica de Colombia.
- Las especificaciones serán las de un sistema convencional que constará de un canal de aducción, floculador y sedimentador que se definirán de acuerdo a los resultados obtenidos en las prácticas de Laboratorio de Aguas de la Universidad Católica de Colombia.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un prototipo el cual tenga la capacidad de la potabilización de agua, como herramienta pedagógica y así servir para complemento de aprendizaje de todos los estudiantes de Ingeniería Civil en el laboratorio de recursos hídricos de la Universidad Católica de Colombia.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Recolectar información existente sobre tipos de Planta de Tratamiento para la potabilización de agua en Colombia.
- Investigar los diferentes modelos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable implementados en las Universidades en el área de ingeniería.
- Investigar los diferentes modelos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable implementados en las academias de ingeniería.
- Determinar las alternativas de Tratamiento de Agua Potable para la construcción del modelo.
- Seleccionar y diseñar la alternativa más eficiente para la construcción del modelo.
- Construir modelo de tratamiento para la potabilización de agua teniendo en cuenta todos los parámetros correspondientes.

## **4. DELIMITACION**

### **4.1. TIEMPO**

El tiempo destinado para la ejecución del proyecto fue en total de ocho (8) meses de los cuales se dividió de la siguiente manera: En los primeros cuatro (4) meses se elaboró la formulación del anteproyecto y los siguientes cuatro (4) meses restantes para la realización del diseño, construcción y ejecución de la planta modelo de tratamiento para la potabilización de agua.

### **4.2. ALCANCE**

Se quiso dejar un aporte en el proceso de formación de cada uno de los estudiantes de Ingeniería Civil, para así fortalecer los conocimientos previos en los tipos de sistemas de potabilización, los procesos que estos sistemas conllevan y de igual manera cumplir en el tiempo requerido con la totalidad de objetivos propuestos en el presente documento.

### **4.3. LIMITACIONES**

- Capacidad y disponibilidad de tiempo en el laboratorio, cantidad de materiales químicos para realizar los diferentes ensayos de laboratorio requeridos.
- Presupuesto disponible para la ejecución del proyecto.

## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1. MARCO TEÓRICO

El recurso hídrico se caracteriza por ser una necesidad vital para la supervivencia y vida de los seres humano por ello desde tiempos remotos se ha visto la necesidad de inventar diversos sistemas de tratamiento de agua con el objetivo de purificar este rico recurso, ya que por diversos problemas que se han presentado a nivel mundial en relación al medio ambiente se presenta una escases de agua natural apta para el consumo humano.

Estos sistemas que se emplean para la purificación del agua van dependiendo de las necesidades del lugar donde se requiere dicha labor, por lo que se encuentran varios procesos fundamentales para conseguir que el agua tenga las propiedades físicas y químicas adecuadas que no lleguen afectar la salud de cada uno de los seres humanos que dispongan a su consumo.

De acuerdo con las características del proyecto y un diseño optimo del mismo se tienen en cuenta las siguientes teorías para así ser aplicadas.

#### 5.1.1. Esquema convencional de abastecimiento

El abastecimiento de agua se ve justificado en los siguientes elementos:

- **Almacenamiento:** Cuando la demanda de agua es menor que el suministro se requiere de un tanque para almacenarla y utilizarla en los períodos secos y que la comunidad necesite este beneficio. Cuando se realizan prototipos es necesario tener un almacenamiento del agua ya tratada para así poder ser aprovechada de la mejor manera posible.
- **Fuente de abastecimiento:** Las fuentes de abastecimiento pueden ser superficiales, subterráneas o pluviales. La elección del tipo de abastecimiento depende de su localización, calidad y capacidad.
- **Obras de captación:** Se construyen para concentrar adecuadamente las aguas aprovechables. Para la captación de aguas superficiales se hace por medio de bocatomas, mientras que para la captación de aguas subterráneas se hace por medio de pozos profundos y las pluviales simplemente por medio de la recolección cuando se presenten precipitaciones

- **Tratamiento de agua:** Se hace con el fin de prevenir y eliminar la contaminación de organismos patógenos que se pueden encontrar en el agua, con esto se asegura que el agua es apta para el consumo y no tendrá acciones perjudiciales en la salud de sus consumidores.

### **5.1.2. Volumen de agua**

Para el diseño y construcción de una planta para la potabilización de agua se debe determinar la cantidad de agua que esta va a tratar, es por esto que estos sistemas dependen en cierta medida de lo siguiente:

- Población de diseño
- Periodo de diseño
- Área de diseño
- Caudal de diseño
- Usos del agua
- Inversión del capital

Con ellos se hace un estudio exhaustivo para garantizar el correcto dimensionamiento de la planta que tendrá la función de purificar el agua para un correcto uso como es su consumo.

## **5.2. MARCO CONCEPTUAL<sup>3</sup>**

- **Acueductos**

Para conocer sobre el modelo PLANTA MODELO DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA para el Laboratorio de Aguas, es indispensable conocer que es un Sistema de Abastecimiento de agua potable (ACUEDUCTO).

Es el conjunto de obras destinadas a derivar, conducir, acondicionar y distribuir el agua requerida por una población a partir de una fuente de abastecimiento. Bajo condiciones de excelente calidad en cantidades suficientes, con continuidad total de (24h/día) y tarifas justas, que garanticen la sostenibilidad para las generaciones actuales y futuras.

---

<sup>3</sup> (LOPEZ CUALLA, 1997, págs. 22 - 29)



## Componentes<sup>4</sup>

- *Captación*: Conjunto de estructuras necesarias para obtener el agua de una fuente de abastecimiento.
  - *Bocatoma*: Estructura hidráulica que capta el agua desde una fuente superficial y la conduce al sistema de acueducto.
  - *Desarenadores*: Componente destinado a la remoción de las arena y sólidos que están en suspensión en el agua, mediante un proceso de sedimentación mecánica.
  - *Aducción*: Componente a través del cual se transporta agua cruda, ya sea a flujo libre o a presión.
  - *Conducción*: Componente a través del cual se transporta agua potable, ya sea a flujo libre o a presión.
  - *Planta de potabilización*: Instalaciones necesarias de tratamientos unitarios para purificar el agua de abastecimiento para una población.
  - *Tanque de almacenamiento*: Depósito de agua en un sistema de acueducto, cuya función es compensar las variaciones en el consumo a lo largo del día mediante almacenamiento en horas de bajo consumo y descarga en horas de consumo elevado.
  - *Red de distribución*: Conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde el tanque de almacenamiento o planta de tratamiento hasta los puntos de consumo.
  - *Macromedición*: Sistema de medición de grandes caudales, destinados a totalizar la cantidad de agua que ha sido tratada en una planta de tratamiento y la que está siendo transportada por la red de distribución en diferentes sectores.
  - *Acometida*: Derivación de la red de distribución que llega hasta el registro de corte de un usuario. En edificios de propiedad horizontal o condominios, la acometida llega hasta el registro de corte general.
  - *Micromedición*: Sistema de medición de volumen de agua, destinado a conocer la cantidad de agua consumida en un determinado periodo de tiempo por cada suscriptor de un sistema de acueducto.
- **Agua cruda.** Agua que no ha sido sometida a un proceso de tratamiento.

---

<sup>4</sup> (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2016)

- **Agua potable.** Agua que cumple todos los requisitos señalados en el decreto 475 de 1998, que puede ser consumida por la población humana sin producir algún efecto adverso a la salud.
- **Borde libre.** Espacio comprendido entre el nivel máximo esperado del agua fijado por el sistema de rebose y la altura total de la estructura de almacenamiento.
- **Calidad del agua.** Conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.
- **Capacidad hidráulica.** Caudal máximo que puede manejar y mantener una estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación.
- **Coagulación.** Se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro, es un proceso muy rápido el cual busca purificar el agua de impurezas.
- **Coeficiente de rugosidad.** Constante que depende del material y del estado de la superficie interna de la tubería.
- **Filtración.** tratan el agua pasándola a través de medios granulares por ejemplo arena, antracita, que retiran los contaminantes que se puedan presentar en el agua. Su eficacia varía gradualmente.
- **Floculación.** Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se acumulan las sustancias coloidales presentes en el agua de esta manera se permite su decantación y posterior filtrado.
- **Flujo libre.** Transporte en el que el agua presenta una superficie libre, donde la presión es igual a la presión atmosférica.
- **Polieléctrolitos.** Están compuestas por pequeñas moléculas portadoras de carga eléctrica
- **Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)<sup>5</sup>.**

Para el desarrollo de una planta de tratamiento de agua potable es necesario tener en cuenta estudios y diseños de los componentes de un sistema de potabilización de agua, dirigido ya sea a la construcción de obras nuevas, ampliaciones y/u optimización de las ya existentes: prefiltros, microtamices, trampa de grasas, aireadores, unidades de mezcla rápida, floculadores, sedimentadores, flotación, filtración, desinfección, estabilización, ablandamiento, adsorción sobre carbón activado, desferrización,

---

<sup>5</sup> (Basico, 2000, págs. 16, Título A, 11.2)

desmagnetización, manejo de lodos, tanque de contacto del desinfectante, dispositivos de control de las unidades de la planta e instrumentación, laboratorios, salas de dosificación, almacenamiento de los productos, igualmente se deben referenciar los productos químicos que pueden ser empleados en el tratamiento de agua potable.

### *Procesos*

#### **Cribado:**

Remoción de desechos grandes que pueden dañar equipos de la planta.

#### **Presedimentación:**

Remoción de grava, arena y limo.

#### **Aireación:**

Remover olores y gases disueltos, dando oxígeno al agua.

#### **Coagulación<sup>6</sup>:**

Es el proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al agua llamados flocs, en este proceso se utiliza:

- ❖ En la remoción de turbiedad
- ❖ En la remoción de color
- ❖ En la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos
- ❖ En la eliminación de sustancias productoras de sabor, olor y precipitados químicos.

El término Coagulación se deriva del latín Coagulare, que quiere decir juntar. Este proceso describe el efecto producido por la adición de un producto químico a una dispersión coloidal, que se traduce en la desestabilización de las partículas por una reducción de aquellas fuerzas que tienden a mantenerlas separadas.

Desde el punto de vista operativo, la coagulación se logra añadiendo el producto químico apropiado para que las partículas se aglomeren cuando establezcan contacto entre sí. En esta fase, para obtener una dispersión uniforme del producto químico y aumentar las oportunidades de contacto entre las partículas, una mezcla rápida es muy importante. El proceso transcurre en un tiempo muy corto (probablemente, en menos de un segundo) e inicialmente conduce a la formación de partículas de tamaño submicroscópico.

---

<sup>6</sup> (Theoduloz, 2011)

## **Floculación<sup>7</sup>:**

Es la segunda fase de formación de partículas sedimentables, a partir de partículas desestabilizadas de tamaño coloidal. Este término que se deriva del latín, en este caso del verbo Floculare, que quiere decir formar un flóculo fibroso. Al revés que la coagulación, donde la fuerza primaria es de tipo electroestático o interiónico, la floculación se debe a un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos. Desde el punto de vista operativo, la floculación se consigue partículas coaguladas de tamaño submicroscópico en otras suspendidas, discretas y visibles. En esta fase las partículas tienen un tamaño suficiente para sedimentar rápidamente por efecto de la gravedad.

La práctica más corriente se ha basado en la separación física de los procesos unitarios en coagulación-floculación, sedimentación y filtración. La floculación es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan entre sí para formar coágulos mayores.

Flocular = hacer grumos

En la coagulación pueden actuar tres mecanismos:

- ❖ Adsorción – desestabilización
- ❖ Puente químico
- ❖ Sobresaturación de la concentración

En la floculación se distinguen:

- ❖ Floculación Ortocinética
- ❖ Floculación Pericinética

La floculación ortocinética es inducida por la energía comunicada al líquido por fuerzas externas (paletas, hélices).

La floculación pericinética es promovida internamente dentro del líquido por el movimiento de agitación que las partículas tienen dentro de aquel (movimiento browniano).

Tabla 4. Coagulación / floculación

Coagulación	Desestabilización de las partículas	adsorción - neutralización
		Puente químico
		Sobresaturación
Floculación	Transporte de partículas	Ortocinético
		Pericinético

Fuente: Ibid, p.1,2

<sup>7</sup> (págs. 1,2 Ibid)

## ✓ Tipos de Floculadores<sup>8</sup>

- Hidráulico (Eje Horizontal, Eje Vertical, Alabama)

Para la agitación de la masa líquida, los floculadores hidráulicos derivan su energía de la carga de velocidad que el flujo adquiere al escurrir por un conducto. Una correcta Operación en un floculador hidráulico requiere las siguientes condiciones:

1. Debe verificarse que la dosificación y la mezcla rápida estén operando satisfactoriamente.
2. Es necesario constatar que el nivel del agua en las cámaras, no varíe más del 10% por arriba o por abajo del nivel de diseño.
3. Debe mantenerse el gradiente medio óptimo de velocidad en el floculador por medio de la diferencia de nivel entre la entrada y la salida; para efectuar esta operación es conveniente tener reglas fijas niveladas en la entrada y salida del floculador. En caso de no ser así, debe ajustarse a los óptimos obtenidos en la prueba de jarras
4. Debe garantizarse que el tiempo de contacto en la unidad sea el suficiente, para permitir que los flóculos alcancen el tamaño y peso adecuado, lo cual es función de la dosis, el gradiente de velocidad y el tiempo que se mantenga la agitación en concordancia con la prueba de jarras.
5. Debe observarse en la salida del floculador el tamaño del flóculo y determinarse la turbiedad residual después de decantada y compararla con la obtenida bajo los mismos parámetros en la prueba de jarras.

- *Floculador de flujo horizontal:*

Para utilizar floculador de flujo horizontal, el tanque debe estar dividido por pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuesto de forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de las mismas. Debe dejarse suficiente espacio para la limpieza de los canales; si éstos son muy estrechos las pantallas deber ser removibles.

- *Floculador de flujo vertical:*

En el floculador de flujo vertical el agua debe fluir por encima y por debajo de las pantallas que dividen el tanque. La unidad puede tener una profundidad de 2 m a 5 m, debe dejarse una abertura en la base de cada pantalla con un área equivalente al 5% del área horizontal del compartimiento, para prevenir la acumulación de lodos.

---

<sup>8</sup> (Basico, 2000, págs. 58-63, Título C5)

- *Floculador Alabama*<sup>9</sup>:

En estas unidades el agua hace un movimiento ascendente-descendente dentro de cada compartimiento, por lo que es muy importante mantener la velocidad del agua constante, para que este se lleve a cabo. La velocidad ascensional será constante mientras el caudal sea constante; por esta razón, estas unidades son muy vulnerables a las variaciones de caudal. Si el caudal de operación baja, el agua ya no hace su recorrido ascensional y solamente pasará por el fondo de la unidad de una boquilla a la otra, lo que generará un cortocircuito en esta zona y un gran espacio muerto en toda la parte superior. El gradiente de velocidad se produce casi exclusivamente en los puntos de paso (niples, codos, boquillas, etcétera), los cuales están localizados en el fondo de la unidad y distribuidos alternadamente en uno y otro extremo.

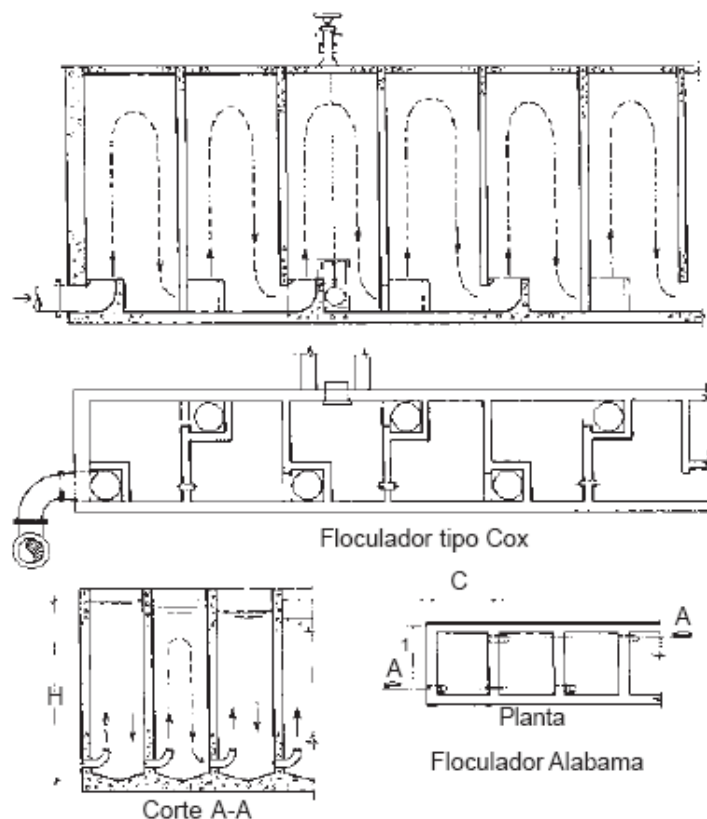
Parámetros y recomendaciones de diseño:

1. La profundidad total de la unidad debe ser de 3 a 3,50 metros, para que la altura del agua sobre los orificios sea por lo menos del orden de 2,40 metros.
2. La relación ancha/largo de cada compartimiento debe ser de 1 a 1,33.
3. La sección de cada compartimiento se diseñará con una tasa de 0,45 m<sup>2</sup> por cada 1.000 m<sup>3</sup>/d.
4. Los criterios para diseñar los puntos de paso entre los compartimientos son los siguientes:
  - La relación de la longitud del niple con respecto a su diámetro debe ser de 1 a 5.
  - Velocidad en las boquillas variable entre 0,25 y 0,75 m/s.
  - Tasa de diseño para determinar la sección de las boquillas de 0,025 m<sup>2</sup> por cada 1.000 m<sup>3</sup>/d.
  - El diseño de estas unidades debe efectuarse muy cuidadosamente para evitar la formación de cortocircuitos y espacios muertos.
  - El nivel de recursos humanos disponible para la operación es un criterio importante en la selección de estas unidades, porque, como se indicó anteriormente, es necesario que la unidad se opere a caudal constante. Las disminuciones de caudal anulan el funcionamiento de estas unidades al decrecer la velocidad. En esta situación, el flujo tiende a pasar directamente entre los puntos de paso y prácticamente todo el volumen del floculador se convierte en un enorme espacio muerto.
  - Los criterios expuestos no tienen una base experimental conocida.

---

<sup>9</sup> (Argaman & Kaufman, 1970)

### Ilustración 1. Floculador Alabama



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

#### Parámetros diseño Floculador:

- El número mínimo de cámaras debe ser de 8
- La velocidad en los codos debe estar entre 0.4 y 0.6 m/s. Colocar un dispositivo a la salida de cada codo, como una platina de orificio para regular el gradiente de velocidad. Debe evitarse la ruptura del floc en los cambios de dirección
- El gradiente de velocidad debe estar entre  $20 \text{ sg}^{-1}$  y  $70 \text{ sg}^{-1}$ , previo ensayo en prueba de jarras, tiempo de detención entre 20 y 40 min. De acuerdo con las pérdidas hidráulicas.
- La pérdida de energía se supone igual a dos alturas de velocidad por cámara, generalmente entre 0.35 – 0.50 m de energía para todo el floculado.

Estos floculadores se desarrollaron en Alabama y se usaron en América Latina. Algunos criterios de diseño son:

Tabla 5. Parametros de diseño para floculador tipo Alabama

<b>Parametros de diseño para floculador tipo alabama</b>			
Caudal por camara unitaria	25	50	L/s * m2
Velocidad en las curvas	0,4	0,6	m/s
Longitud de cada camara (L)	0,75	1,5	m
Ancho de cada camara (W)	0,5	1,25	m
Profundidad de cada camara (H)	2,5	3,5	m
Tiempo de retencion toal en el floculador	15	25	minutos

Fuente: Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del agua, ED. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá 2002. p. 195 - 209

El diámetro de la entrada a cada cámara debe seleccionarse para mantener una velocidad de entrada entre 0.4 y 0.6 m/s. R. Los gradientes de velocidad oscilan entre  $40 - 50 \text{ s}^{-1}$ . Se debe proveer drenaje para cada cámara, con el objeto de permitir la extracción de lodos acumulados en el fondo, En el siguiente cuadro se incluyen otras guías de diseño para Floculadores Alabama.

Tabla 6. Guía para diseño de floculador Alabama

<i>Caudal (L/s)</i>	<i>(W) Ancho (m)</i>	<i>(L) Longitud (m)</i>	<i>(D) Diametro (m)</i>	<i>Volumen de cada camara (m3)</i>
10	0,60	0,60	0,15	1,04
20	0,60	0,75	0,25	1,30
30	0,70	0,85	0,30	1,72
40	0,80	1,00	0,35	2,31
50	0,90	1,10	0,35	2,85
60	1,00	1,20	0,40	3,46
70	1,05	1,35	0,45	4,09
80	1,15	1,40	0,45	4,64
90	1,20	1,50	0,50	5,19
100	1,25	1,60	0,50	5,77

Fuente: Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del agua, ED. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá 2002. p. 195 – 209

#### Control de los procesos y operación floculador hidráulico

- La dosificación y mezcla rápida estén operando satisfactoriamente.
- El nivel de agua en la cámara no debe sobrepasar el 10% por arriba o por debajo del nivel de diseño.
- Debe mantenerse el gradiente medio óptimo de velocidad por medio de la diferencia de nivel entre la entrada y la salida del floculador.
- El tiempo de contacto en la unidad debe ser suficiente para permitir que el floc alcance el tamaño y peso adecuado.



- De acuerdo al tamaño del floculo a la salida, se debe determinar la turbiedad residual, y compararla con la obtenida mediante los mismos parámetros en la prueba de jarras.
- Mecánico (Eje Horizontal, Eje Vertical)

Los floculadores mecánicos requieren una fuente de energía externa para que mueva el agitador en el tanque o en una serie de tanques, en donde el agua permanece un tiempo teórico de detención. Para obtener un correcto funcionamiento de este tipo de floculadores es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones:

1. Constatar que la dosificación y la mezcla rápida estén operando satisfactoriamente.
2. Verificar que el nivel del agua siempre cubra las paletas del agitador. RAS-2000. Sistemas de Potabilización.
3. Es indispensable fijar y mantener la velocidad de rotación que genera el gradiente óptimo de acuerdo con la calidad del agua cruda.
4. Garantizar que el tiempo de contacto en la unidad sea suficiente para permitir que los flóculos alcancen el tamaño y peso adecuado.
5. Evaluar las características del agua cruda a fin de ajustar el gradiente de velocidad, si es necesario, e inspeccionar el buen funcionamiento del equipo de mezcla lenta.
6. Verificar que del tamaño de flóculo formado en la unidad sea el adecuado; en caso de no ser así, debe cambiarse la dosis óptima de coagulante.
7. En caso de emplear polieléctrolitos, deben adicionarse en las cámaras donde ya se ha formado el flóculo.
8. Evitar que los motores derramen o adicionen aceite al agua.

En el nivel bajo de complejidad del sistema, se deben evitar en lo posible los floculadores mecánicos.

### **Sedimentación:**

La sedimentación emplea la fuerza de gravedad para que las partículas presentes en el agua se depositen en el fondo de un sedimentador, de donde son extraídas posteriormente. Sólo sedimentarán aquellas partículas cuya densidad es mayor que la densidad del agua.

Mientras mayor sea la densidad de la partícula, más rápido se depositará.

- ❖ En la remoción de la turbiedad
- ❖ En la remoción del color
- ❖ En la eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos

- ❖ En la eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, precipitados químicos

- ✓ Velocidad de Sedimentación.

La velocidad a la cual se depositan las partículas en el agua es llamada la velocidad o la tasa de sedimentación. Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable son obras destinadas a derivar, conducir, acondicionar y distribuir el agua a partir de una fuente bajo condiciones de excelencia hacia el consumo humano, dentro de los sistemas convencionales para el diseño de una PTAP, se deben tener en cuenta los diferentes tipos de Floculadores y Sedimentadores, los cuales dependiendo de la calidad del agua cruda a tratar tendrán diferentes características así:

- ✓ Tipos de Sedimentadores<sup>10</sup>

Para obtener una buena operación de sedimentación, es necesario que la etapa de coagulación – floculación se realice adecuadamente, luego se debe asegurar una distribución adecuada del caudal, minimizar los cambios bruscos de flujo, asegurar una carga de rebose apropiada sobre los vertederos efluentes y controlar las cargas superficiales y los tiempos de retención.

- Sedimentador (Flujo Horizontal, Flujo Vertical)

La unidad de sedimentación debe llenarse con agua hasta el nivel de operación y dejarse en reposo como mínimo 1 hora antes de la operación normal. Luego de esto debe darse paso al agua de entrada al sedimentador para la operación normal de la unidad. Una vez la unidad entra en operación debe determinarse la turbiedad y/o color del agua sedimentada.

Deben realizarse las siguientes actividades de operación:

1. Comprobar si por el efluente hay salida de flóculos.
2. Retirar el material flotante en el decantador por medio de una espumadera.
3. Verificar si existe desprendimiento de burbujas de aire, originadas por fermentación de lodos.
4. Verificar semanalmente si existe crecimiento de algas.
5. Medir el nivel de lodo depositado por medio del equipo adecuado para determinar si se ha excedido la zona de lodos.
6. Cuando el nivel de lodos alcance el nivel máximo de la zona de lodos, debe drenarse la unidad y realizarse la limpieza de los lodos depositados.
7. Cuando se realice una parada de periodo largo (mayor a 24 horas) debe mantenerse un residual de cloro por lo menos de 5 ppm o vaciar la unidad para evitar la fermentación de los lodos.

---

<sup>10</sup> (Basico, 2000, págs. 64 - 69, Título C5)

- Sedimentador de Tasa Alta<sup>11</sup>

La sedimentación emplea la fuerza de gravedad para que las partículas presentes en el agua se depositen en el fondo de un sedimentador, de donde son extraídas posteriormente. Solo sedimentaran aquellas partículas cuya densidad es mayor que la densidad de agua. Mientras mayor sea la densidad de la partícula, más rápido se depositará. Parámetros y recomendaciones de diseño:

1. Velocidad de Sedimentación, velocidad a la cual se depositan las partículas en el agua es llamada la velocidad o la tasa de sedimentación.

El diseño debe ser flexible para facilitar el retiro o cambio de las placas, pueden utilizarse dos tipos de placas; Placa angosta (alrededor con 1.20mts de alto por 2.40mts de ancha), placa profunda (de 1.20 a 1.5mts de ancho por 2.4 a 3.2mts de profundidad). Se debe evitar el pandeo mayor de 0.05mts.

2. Sedimentación de Alta Tasa, tiene cientos de células de sedimentación individuales en un ángulo de 45-60°; el propósito es crear una tasa de sedimentación promedio efectiva mayor que en un estanque de sedimentación convencional del mismo tamaño. El agua ingresa al tanque horizontalmente bajo las placas, una vez ingresa pasa por las placas a la superficie del estanque. Después de las placas el agua voltea y deja el tanque horizontalmente, el ángulo de inclinación de las placas debe permitir que los sólidos puedan asentarse y resbalarse hacia abajo por las placas, en contra del flujo de agua sedimentada que sube. A continuación se mostrarán algunos parámetros de velocidad de sedimentación.

Tabla 7. Velocidad de sedimentación

Material	Densidad relativa	D (cm)	T agua (°C)	Viscosidad (10 <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup> /s)	Velocidad Sedimentacion (cm/s)	Tasa Superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /dia)
Microfloc	1,01	0,001	10	1,31	4,16 x 10 <sup>-7</sup>	0,00036
			15	1,18	4,637 x 10 <sup>-7</sup>	0,00040
Floc	1,03	0,001 - 0,01	10	1,31	1,25 x 10 <sup>-2</sup> - 1,25 x 10 <sup>-4</sup>	0,108 - 10,8
			15	1,18	1,39 x 10 <sup>-2</sup> - 1,39 x 10 <sup>-4</sup>	0,12 - 12
Partículas Orgánicas	1,5	0,01	10	1,31	2,08 x 10 <sup>-1</sup>	179,7
			15	1,18	2,31 x 10 <sup>-1</sup>	199,5
Arenas finas	2,6	0,01	10	1,31	6,11 x 10 <sup>-1</sup>	528
			15	1,18	6,75 x 10 <sup>-1</sup>	583
Arenas finas	2,6	0,2	10	1,31	27,76	23,980
			15	1,18	28,16	24,330

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

<sup>11</sup> (págs. 20, Ibid)

### 3. Decantación de partículas aisladas

- Fuerzas actuantes, sobre una partícula cualquiera en movimiento en un fluido en reposo, actúan las siguientes fuerzas:

Fuerza externa  $F_P$   
Empuje  $F_E$   
Fuerza de rozamiento  $F_R$

- Fuerza Externa es solo el peso propio; también debe considerarse como fuerzas externas las fuerzas de inercia, las que tienen una acción relevante en la separación de partículas en el caso de ciclones, donde se toma en cuenta el efecto combinado del peso y la fuerza centrífuga.

$$F_P = m \cdot a$$

Donde  $m$  = masa de la partícula  
 $a$  = aceleración de gravedad

- Empuje de acuerdo con el principio de Arquímedes, el empuje es igual al peso del fluido desalojado:

$$F_E = gV_p = - rmg / r_p$$

Donde  $V_p$  = Volumen de la partícula  
 $g$  = Peso específico del fluido  
 $r$  = Densidad del fluido  
 $r_p$  = Densidad de la partícula

- Fuerza de Rozamiento solo actúa cuando la partícula está en movimiento relativo respecto del fluido.

$$F_R = C_D \cdot A \cdot r v^2 / 2$$

Donde  $C_D$  = coeficiente de arrastre  
 $v^2/2$  = energía cinética por unidad de volumen  
 $A$  = sección transversal al escurrimiento de la partícula

- El coeficiente de arrastre depende experimentalmente de las características de viscosidad del fluido y de la forma de las partículas.
- Velocidad terminal de sedimentación, las fuerzas que actúan sobre una partícula en descenso se relaciona así:

$$F_I = F_P - F_R - F_E$$

Donde  $F_I$  = Fuerza que impulsa a la partícula para que ascienda

- Si la partícula está en reposo aumenta la velocidad, a medida que aumenta la velocidad, aumenta la fuerza de rozamiento y va disminuyendo la aceleración hasta llegar a cero. A partir de este momento la partícula descenderá con una velocidad constante que se denomina velocidad terminal de sedimentación esta velocidad se alcanza casi inmediatamente de haber empezado el movimiento.
- 4. Tiempo de Retención debe estar entre 10 y 15 min.
- 5. Profundidad del tanque debe estar entre 4 y 5.5 mts
- 6. Carga superficial de la unidad debe estar entre 120 y 185 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup> día) para placas angostas y de 200 a 300 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup> día) para placas profundas
- 7. El número de Reynolds debe ser menor a 500 se recomienda un Re menor a 250
- 8. La inclinación de las placas debe ser de 45° a 60°
- 9. La separación entre placas debe ser de 5cm
- 10. Número de unidades debe ser como mínimo 2
- 11. Control de procesos de operación
  - Comprobación si por el efluente hay salida de flóculos
  - Retirar el material flotante en el decantador por medio de una espumadera
  - Verificar si existe desprendimiento de burbujas de aire
  - Drenar varias veces por día
  - para determinar la eficiencia, se toma como la relación de las partículas a la salida ( $N_t$ ) y la concentración de las partículas a la entrada ( $N_o$ ) del decantador.

$$Ef(\%) = \left(1 - \frac{N_t}{N_o}\right) * 100 = \left(1 - \frac{\text{Turbiedad de salida}}{\text{Turbiedad de entrada}}\right) * 100$$

- La característica principal de un sedimentador de alta tasa es su poca profundidad, usualmente del orden de cm.
- En los pequeños conductos usados como sedimentadores de alta tasa se puede desarrollar flujo laminar. La distribución de velocidad dista mucho de ser uniforme; por lo tanto, las trayectorias de las partículas no son líneas rectas como en el modelo ideal de Campo.

## **Filtración**<sup>12</sup>

El primer filtro de arena se inventó en Escocia en 1804. En 1829 la Compañía de Támesis en Londres, emprendió la construcción de filtros lentos de arena y en 1892, se demostró su eficiencia para control biológico con ocasión de la epidemia de cólera ocurrida en Hamburgo.

La producción de agua clara y cristalina es prerequisite para el suministro de agua segura y requiere de la filtración. Aunque cerca del 90% de la turbiedad y la sedimentación son removidos por la coagulación y la sedimentación, una cierta cantidad de floc pasa el tanque sedimentación y requiere su remoción. Por ello y para lograr la clarificación final se usa la filtración a través de medios porosos; generalmente dichos medios son arena o arena y antracita. En la planta de purificación la filtración remueve el material suspendido, medido en la práctica como turbiedad, compuesto por floc, suelo, metales oxidados y micro organismos. La remoción de microorganismos es de gran importancia puesto que muchos de estos son extremadamente resistentes a la desinfección y, sin embargo, son removibles mediante filtración.

El filtro rápido por gravedad es el tipo más usado en tratamiento de aguas. La operación de filtración supone dos etapas: Filtración y lavado; En un filtro rápido convencional, el final de la etapa de filtración o carrera del filtro se alcanza cuando los sólidos suspendidos (turbiedad) en el efluente comienza a aumentar; cuando la pérdida de carga es tan alta que el filtro ya no produce agua a la tasa deseada, usualmente 2.4 mts de pérdida, o cuando la carrera del filtro es de 36 horas o más. Generalmente cuando una de las condiciones anteriores se presenta, se procede a lavar el filtro para remover el material suspendido acumulado dentro del lecho filtrante y para recuperar su capacidad de filtración: Usualmente el lavado se hace invirtiendo el flujo a través del filtro, aplicando un flujo suficiente de agua para fluidizar el medio filtrante y producir el frote entre los granos del mismo, y desechando el material removido a través de las canaletas de lavado.

Los filtros se clasifican de acuerdo con: La dirección del flujo, tipo de lecho filtrante, fuerza impulsora, tasa de filtración, método de control de tasa de filtración.

### ✓ Tipo de lecho filtrante

Los filtros utilizan generalmente un solo medio, arena o antracita; un medio dual, arena y antracita, o un lecho mezclado: arena antracita y granate o ilmenita.

---

<sup>12</sup> (Rojas J. A., 2002, págs. 195 - 209)

✓ Fuerza impulsadora

De acuerdo con la fuerza impulsora utilizada para vencer la resistencia friccional ofrecida por el lecho filtrante, los filtros se clasifican como filtros de gravedad o presión. El filtro por gravedad es el más usado en plantas de purificación. El filtro a presión se ha utilizado principalmente en la filtración de aguas para piscinas y en pequeñas plantas donde su instalación es ventajosa.

✓ Tasa de filtración

Los primeros filtros utilizados son lentos, los cuales utilizan una capa de arena fina de 1mt, soportada sobre un lecho de grava de aproximadamente 0.30mts. Estos filtros fueron reemplazados por los filtros rápidos, filtros de arena, generalmente con lavado ascensional, con tasa de filtración mucho mayores y, por consiguiente, con requerimientos de área mucho menores. Posteriormente con el uso de lechos filtrantes duales o lechos mezclados, se lograron diseños mucho más económicos en área, al usar tasas de filtración todavía mayores que las de los filtros rápidos convencionales.

Tabla 8. Principales características de los filtros por gravedad más utilizados

Características	Filtros de arena lentos	Filtros rápidos de arena	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	2 - 5 (<12m/d)	120 m/d	180 - 480 m/d
Medio	Arena	Arena	Arena y antracita
Distribución del medio	No estratificado	Estratificado: Fino o grueso	Estratificado: Grueso o fino
Duración carrera	20 - 60 días	12 - 36 horas	12 - 36 horas
Pérdida de carga	Inicial 0,6 mts Final 1,2 mts	Inicial 0,3 mts Final 2,4 - 3,0 mts	Inicial 0,3 mts Final 2,4 - 3,0 mts
Agua de lavado	No usa	2 - 4 % del agua filtrada	6 % del agua filtrada
Profundidad del medio	0,6 - 1,0 mts	0,60 - 0,75 mts	Antracita de 0,4 - 0,6 mts Arena 0,15 - 0,30 mts
Drenaje	Tubería perforada	Tubería perforada falsos fondos	Tubería perforada falsos fondos

Fuente: Romero Rojas, Jairo Alberto. Purificación del agua, ED. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá 2002. p. 195 - 209

- **Potabilización:** Es el proceso que se le hace a cualquier agua para que pueda ser de consumo humano sin ningún tipo de restricción porque se encuentra absolutamente limpia de por ejemplo, sólidos suspendidos, aglomeración, de coloides, de organismos patógenos, de hierro y manganeso, sedimentación y corrosión, entre otras cuestiones. Es un

proceso muy eficiente, ya que disminuye notablemente enfermedades por el consumo de agua no apta.

- **Red de Distribución.** Está compuesta por tuberías, accesorios, estructuras con el fin de conducir el agua desde los tanques de almacenamiento o plantas de tratamiento para su consumo o diferentes usos.
- **Sedimentación.** Procedimiento en el cual los sólidos suspendidos presentes en el agua, decantan por gravedad.

### 5.3. MARCO LEGAL

La normatividad contemplada para el tratamiento y potabilización de agua se basa en El reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS 2000)<sup>13</sup> y Normas del Gobierno de la Republica de Colombia.

Una de estas normas que es más aplicada es la resolución 2115 de 2007 en la que se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Con lo que se debe regir en cualquier proyecto que tenga relación en ello. **Ver Anexo E.**

#### 5.3.1. METODOS Y PROCESOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA SEGUN LEY 475/98

- **Coagulación:** Aglutinación de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua mediante la adición de coagulantes.
- **Floculación:** Aglutinación de partículas inducida por una agitación lenta de la suspensión coagulada.
- **Sedimentación:** El proceso consiste en el asentamiento de las partículas en el fondo del tanque haciendo que el agua se detenga por un tiempo determinado.
- **Filtración:** Proceso mediante el cual se remueven las partículas suspendidas y coloidales del agua al hacerlas pasar a través de un medio poroso. Existen dos métodos que son los más comunes:
  - o *Filtración rápida:* Proceso de filtración a alta velocidad.
  - o *Filtración lenta:* Proceso de filtración a baja velocidad.

---

<sup>13</sup> (Basico, 2000)



- **Desinfección:** Proceso físico o químico que permite la eliminación o destrucción de los organismos patógenos presentes en el agua. Existen dos medios por los cuales se puede realizar una desinfección:
  - o *Desinfección física:* El método más efectivo es hervir el agua durante 15 o 20 minutos.
  - o *Desinfección Química:* En esta se utilizan sustancias químicas que destruyen los microorganismos. En éste tipo de desinfección la sustancia más usada es el Cloro.

## 5.4. MARCO HISTORICO

### 5.4.1. HISTORIA TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

La historia ha demostrado que todas las civilizaciones sabían de la importancia que tenía el agua para poder garantizar la supervivencia de la especie. Es por ello que todas las tribus situaron sus asentamientos cercanos a zonas geográficas con abundancia de agua. Los ríos aportaban agua para el riego, para el consumo y como vía de comunicación

Una de las mayores preocupaciones en la historia de la humanidad ha sido el proporcionarse agua lo más pura y limpia posible. En el pasado, el tratamiento del agua originalmente se centraba en mejorar las cualidades estéticas de esta.

La historia del agua potable es muy remota. En Siria y Babilonia se construyeron unos conductos y acueductos para acercar el agua desde sus fuentes a lugares próximos a las viviendas. La vida cotidiana giraba en torno al agua y su correcta utilización. Sorprende descubrir todo lo que inventaron y llevaron a la práctica, hace miles de años y que actualmente se siguen utilizando.

Es por esto que el tratamiento de agua es tan importante y esencial en la vida, ya que es una manera muy efectiva de ayudar a cuidar este rico recurso.

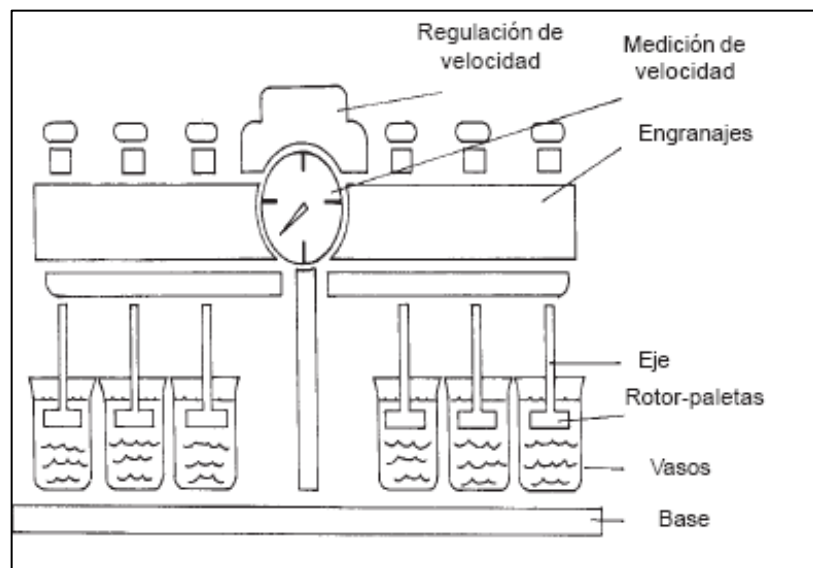
## 6. EQUIPOS UTILIZADOS

En el laboratorio, uno de los equipos más usados en el tratamiento de las aguas como elemento de control de la coagulación es el equipo de prueba de jarras. G.

W. Fuller, J. Cairol y E. Theirault son precursores de la prueba de jarras como modelo predictivo.

De acuerdo con la información obtenida, probablemente el primer ensayo de prueba de jarras fue realizado por W. L. Langelier en la Universidad de California en 1918. Las primeras aplicaciones y el desarrollo inicial corresponden a John Baylis, Bartow y Petterson, Fleming, Nolte y Kromer.

Ilustración 1. Equipo de prueba de jarras



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

Aportes tecnológicos posteriores fueron realizados por Tolman, Nickel, Gekershausen, Langelier-Ludwig, Cross et al., C. Henry, Smith, Straub, Elliassen, Norcon, Cox y otros, que perfeccionan continuamente el ensayo y lo aplican con éxito a diversas condiciones de coagulación de las aguas. Estos autores orientaron principalmente el modelo de prueba de jarras hacia la determinación y optimización de las variables químicas del proceso de coagulación.

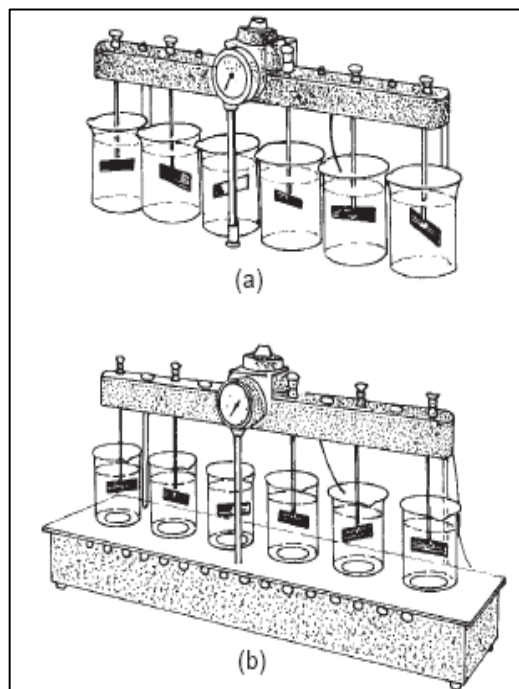
## 6.1. DESCRIPCION DEL EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS UTILIZADO

Para efectuar los ensayos de simulación de procesos, existen algunas variaciones en el equipo tradicional, que son descritas en la literatura. Aunque no es un requisito indispensable, estas pruebas, en la mayor parte de los casos, son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird, para el cual se han desarrollado los ábacos que relacionan el gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas (figura 4).

Normalmente estos equipos constan de los siguientes elementos:

- ❖ Un agitador mecánico provisto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 revoluciones por minuto; actualmente pueden obtenerse equipos que operan con velocidades de hasta 400 revoluciones por minuto).
- ❖ Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador del equipo.
- ❖ Vasos de precipitado de 2 litros de capacidad, de cristal refractario, tal como se presentan en la figura 4. Equipo de prueba de jarras en la figura 5.

Ilustración 2. Vasos de precipitado



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

### 6.1.1. SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

Las unidades de agitación múltiple usadas en las pruebas de coagulación deben ser equipadas con las facilidades necesarias para la adición de coagulantes químicos en forma rápida y simultánea a cada vaso o jarra. Este equipo es importante cuando una sola persona realiza la prueba. La mayoría de los equipos comerciales olvidan este detalle, que es la causa de muchos resultados erróneos.

Los estudios muestran que las diferencias que existen en el tiempo de adición de los reactivos químicos de las soluciones a los diferentes vasos pueden afectar significativamente los resultados, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación. También puede alterar los resultados la velocidad de adición, que debe ser lo más rápida posible.

La práctica usual de adicionar coagulantes a cada vaso mediante el uso de una pipeta graduada no puede ser desechada en forma radical, pero la velocidad de adición del reactivo químico es muy lenta y pueden presentarse diferencias considerables en el tiempo de adición y en la rapidez requerida para avanzar con la dosificación.

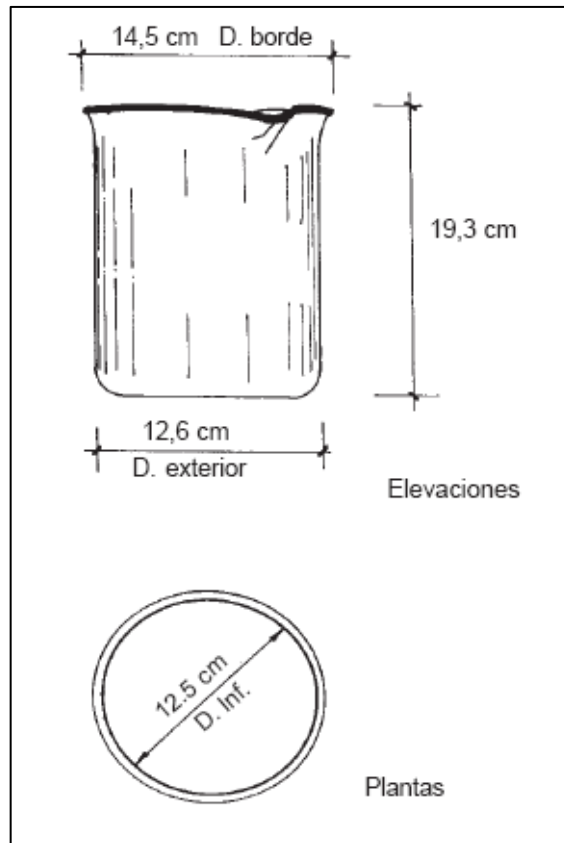
Una manera simple de evitar estas dificultades es medir las cantidades de coagulante que se van a aplicar a cada jarra con una pipeta y verterlo en vasos, de los cuales se succiona mediante jeringas hipodérmicas desechables, provistas de su aguja. Se llena cada jeringa con la dosis respectiva, se retira la aguja y se la coloca delante la jarra correspondiente, en un soporte de madera especialmente acondicionado que se instala en el puente superior del equipo, en el cual se han horadado de 6 a 12 agujeros en los que se colocan las jeringas hipodérmicas. Al momento de aplicar el coagulante, con el equipo funcionando y programado con los tiempos y gradientes adecuados, se aplasta una banda de madera que presiona los émbolos de todas las jeringas lo más rápido posible (máximo: 5 segundos).

Esto permite la aplicación simultánea e instantánea en todas las jarras. Este equipo auxiliar permite que una sola persona ejecute toda la prueba. Si no se dispone de este equipo, se requiere de por lo menos tres personas para efectuar una aplicación correcta, considerando que cada una aplica a dos jarras, una de ellas da la voz indicando el tiempo de inicio de la prueba y la otra acciona el equipo.

En general, se recomienda aplicar la dosis de coagulante muy cerca del agitador, con el equipo operando con el gradiente de mezcla y aplicando exactamente lo que se debe efectuar en el mezclador de la planta. Los equipos de prueba de jarras automáticas, que permiten velocidades de hasta 300 revoluciones por minuto, son ideales para efectuar simulación de procesos, y en ellos la bondad de los resultados depende mucho de la exactitud con la que se ejecuta la prueba.

Utilizando estos equipos y estatores o deflectores en las jarras, se pueden obtener gradientes dentro del rango recomendable para mezcla rápida, con tiempos tan breves como 5 segundos, al cabo de los cuales el equipo automáticamente cambia para el gradiente de floculación programado.

Ilustración 3. Jarra de precipitado de 2 litros



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

✓ *Sistema de agitación*

- Descripción del sistema

La variable que más importancia tiene en la prueba de jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de movimiento del agua. Se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética, y pueden utilizarse una o más paletas. En la tabla 9 se detallan las características de las paletas.

Tabla 9. Características de los agitadores

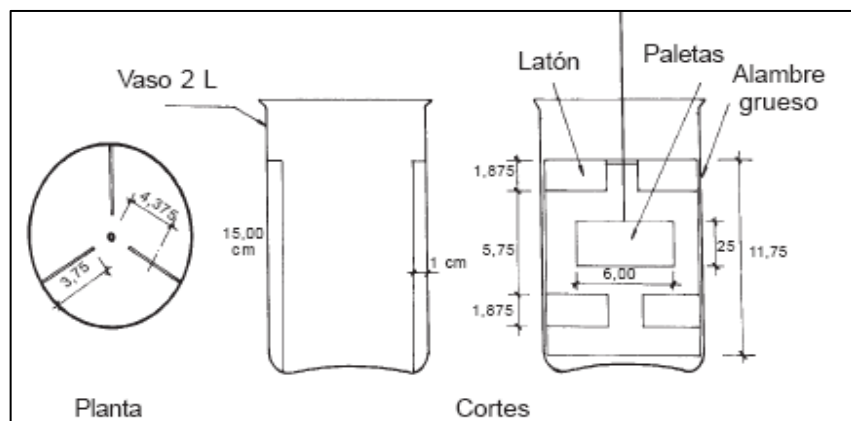
Tipo de paleta	Numero de paletas	(D) Diametro (cm)	(A) Area proyectada (cm)	Observaciones
Plana - 1	2	7 y 6	17,50	a
Plana - 2	2	7,2	28,80	b
Plana - 3	2	7,2	18,40	c
Helice	3	5,0	4,50	d
Doblada	2	5,0	2,80	

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE 1970

- a) Utilizada en el modelo Phipps y Bird.
- b) Tipo impulsor marino.
- c) Utilizada por Florida 1-Environmental specialities.
- d) Utilizada por Florida 2-Environmental specialities.

Cuando no se utilizan estatores, es necesario elevar la velocidad a valores superiores a los que normalmente operan los equipos. La inercia producida durante el ensayo de floculación ocasiona la formación de un helicoides que afecta el proceso y que se evidencia en una disminución de la eficiencia en el ensayo de sedimentación. Por esta razón, se recurre al uso de estatores o deflectores fijos de tipo continuo o discontinuo, tales como los indicados en la figura 6 .

Ilustración 4. Estatores o deflectores



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE 1970

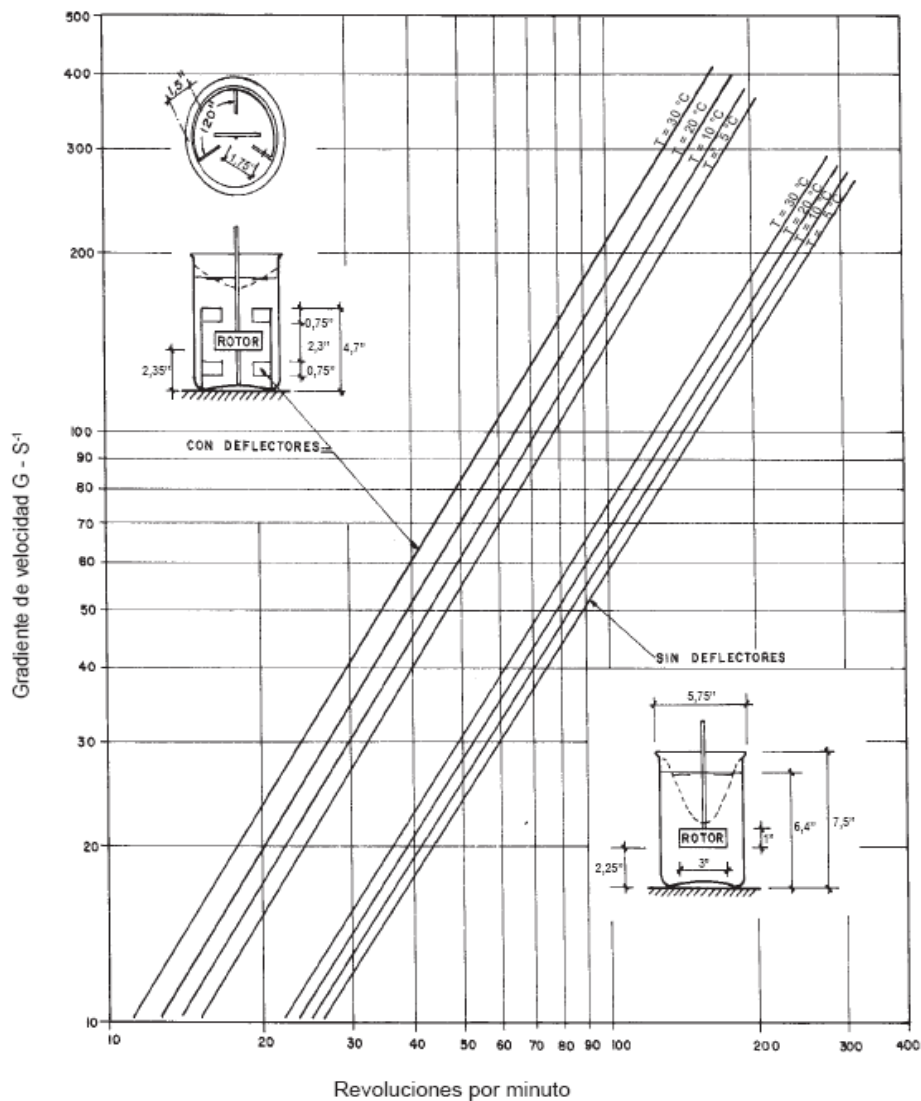
✓ Descripción de las jarras

Las jarras o vasos que se van a usar deben poder ser acomodados en el aparato y tener 2.000 ml de capacidad; en caso de no tenerse vasos de este tamaño, podría optarse por vasos de 1.000 ml. Se debe evitar usar vasos más pequeños debido a la dificultad en la adición de pequeños volúmenes de coagulantes y ayudantes para obtener muestras satisfactorias del agua sedimentada. Podría usarse botellas cuadradas, pero antes deben asegurarse

las modificaciones producidas por cambio de secciones para el cálculo de gradientes.

En lo posible, debe evitarse el lavado de las jarras con detergentes, ya que muchos de estos tienen compuestos aniónicos que son fuertemente absorbidos por las paredes de las jarras de vidrio. Si estos no son completamente removidos, pueden afectar los resultados de las pruebas en forma significativa. En la figura 7 se detallan las características de los vasos.

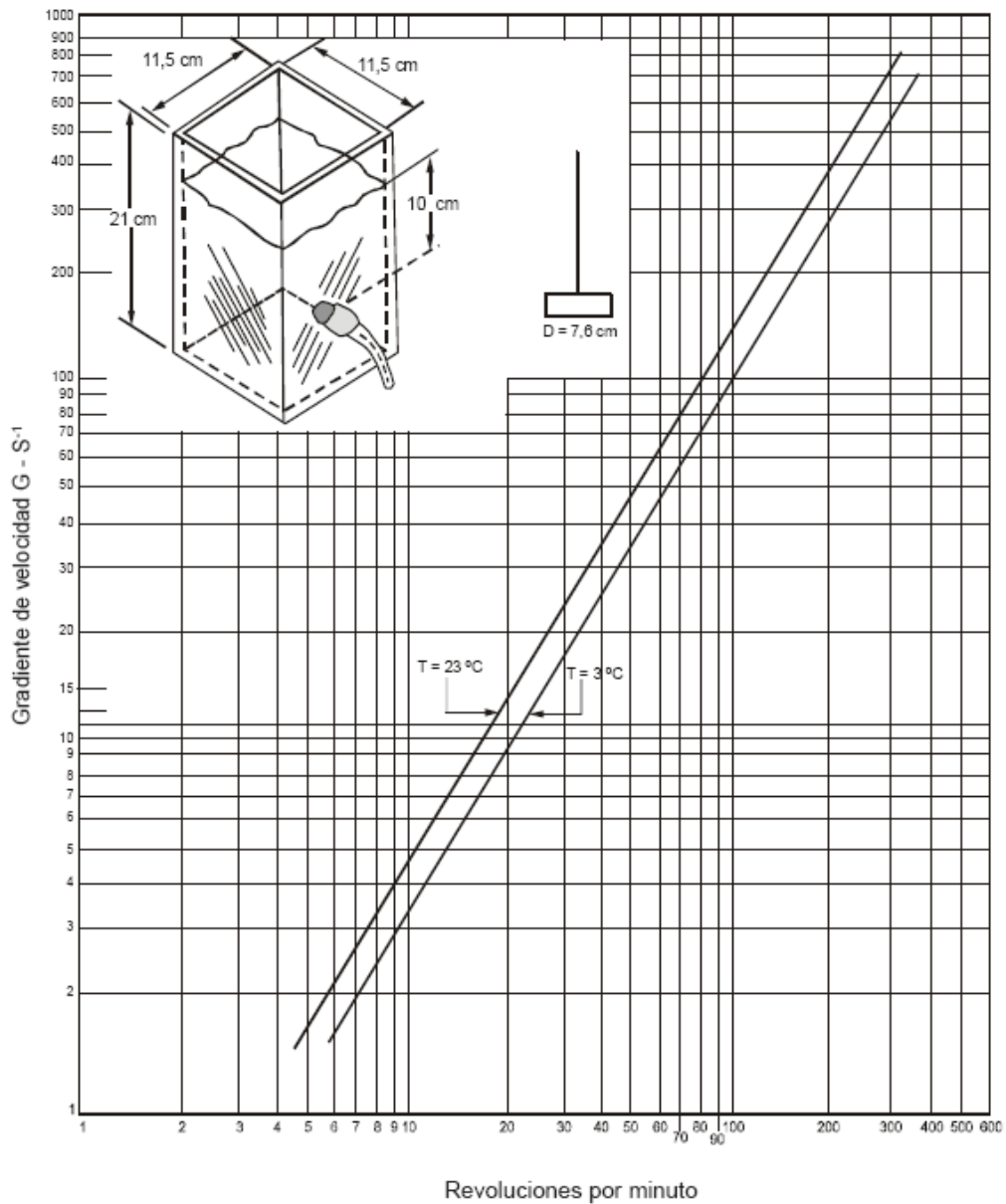
Ilustración 5 .Gradiente de velocidad / rpm jarra sección circular



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE 1970

Figura 7. Abaco que relaciona el gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros. Jarra de sección circular

Ilustración 6. Gradiente de velocidad / rpm



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE 1970

Figura 8. Ábaco que relaciona el gradiente de velocidad con las revoluciones por minuto de un equipo de prueba de jarras con recipientes de 2 litros. Jarra de sección cuadrada. Desarrollado por la Universidad de Michigan.

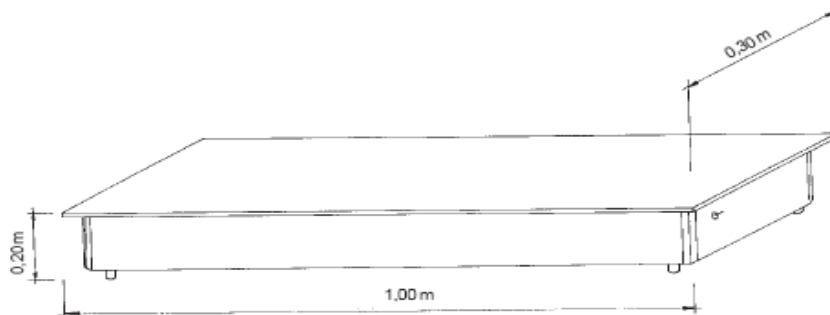


## 6.1.2. EQUIPO AUXILIAR

Además de la unidad de agitación, es necesario un cronómetro para controlar el tiempo que demoran las diferentes operaciones comprendidas en las pruebas. También se requieren medidores de turbiedad, pH y color.

### a) Turbidímetro

Ilustración 7. Turbidímetro



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE 1970

Figura 9. Base iluminada sobre la cual se coloca el equipo de prueba de jarras

La medición de la turbiedad del agua se considera como el parámetro más importante para caracterizar los procesos. La medición de la turbiedad se logra mediante el uso de un Turbidímetro convencional que mide la intensidad de la luz que pasa a través de una muestra de agua o la intensidad de la luz que es dispersada por las partículas en suspensión que están presentes en la muestra, generalmente desde una dirección situada a  $90^\circ$  de la dirección original del haz de luz. Un ejemplo de un Turbidímetro que en su diseño usa el principio de transmisión es el Hellige. De los que miden la dispersión de la luz, denominados *turbidímetros nefelométricos*, tenemos el Hach 2100-A y el DRT 100 de Estados Unidos. En estos equipos, los resultados deben ser reportados redondeando las cifras, como se indica a continuación en la tabla 10:

Tabla 10. Forma de reportar los resultados en turbidímetros nefelométricos

Turbiedad (UT)	Usar intervalos de
0 - 1	0,05
1 - 10	0,10
10 - 40	1,00
40 - 100	5,00
100 - 400	10,00
400 - 1000	50,00
> 1000	100,00

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

#### b) Medidor de pH

Desde tiempo atrás, es conocido que la efectividad de la coagulación depende directamente del pH. Debido a ello, la medición de este parámetro antes y después de la floculación tiene importancia básica, por lo cual debe disponerse de un medidor de pH de preferencia potenciométrico. Como alternativa, podría usarse uno colorimétrico.

El pH es un indicador de la concentración de los iones hidrógeno en solución  $pH = \log_{10} (H^+)$  y debería ser leído con una sensibilidad de 0,01 unidades en el medidor de pH con electrodos de vidrio y para referencia de calomel, que dispone de un compensador de temperatura. Este medidor debe ser calibrado con una solución amortiguadora fresca, cuyo pH está en el rango de operación deseada. En general, para la medición de aguas naturales Y tratadas en plantas de potabilización, se requiere una precisión de 0,05 unidades.

En muchos casos existe interés en la remoción del color en lugar de la turbiedad. En estos casos la medición del color residual del agua después de floculada y sedimentada puede servir para caracterizar el ensayo. Este parámetro puede ser determinado mediante comparación visual con soluciones coloreadas de concentraciones conocidas. También puede compararse con discos especiales de color que han sido previamente calibrados. El método de comparación del platino-cobalto es el establecido como método normalizado y la unidad de color es la producida por un mg/L de platino en la forma de ion de cloroplatinato.

La comparación del color se efectúa mediante el uso de tubos Nessler (de la forma alta y de 50 mL). El color del agua también puede ser determinado, como ya se ha mencionado, por comparación con discos de color ubicados dentro de una caja metálica o de otro material que contiene los tubos comparadores de la muestra y del agua destilada incolora. Los discos de vidrio dan resultados acordes con los obtenidos por el método de platino-cobalto y su uso es reconocido.

El resultado de la medición de color se expresa como sigue:

Tabla 11. Forma de expresar los resultados de la medición de color

Unidades de color	Aproximación a
1 - 50	1
51 - 100	5
101 - 250	10
251 - 500	20

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

### *Precauciones y limitaciones*

Con la prueba de jarras se trata de reproducir las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos de floculación y sedimentación en la planta de tratamiento. Sin embargo, dado el pequeño volumen (1 a 2 L) que tienen los vasos de precipitado, en comparación con el gran volumen de los tanques de floculación reales, la prueba de jarras constituye una reproducción parcial del proceso. Las razones para esto son de orden físico y químico, y, entre otras, son las siguientes:

- a) En los reactores existe un flujo continuo; en cambio, en las jarras no hay flujo. Esto hace que en los primeros la masa de agua sufra un tratamiento desigual, debido a que parte de ella queda retenida durante largo tiempo, mientras que otra parte pasa casi de inmediato. En cambio, en la prueba de jarras, el agua queda retenida durante todo el tiempo que dura el ensayo (reactor del tipo de tanda o cochada).
- b) La escala de las jarras no guarda relación con la escala del flóculo, por cuanto este se produce a escala natural y, en cambio, las jarras son cientos de veces más pequeñas que los floculadores. Por tanto, la proporción entre la escala de la turbulencia que se produce en uno y otro caso y el tamaño del flóculo es diferente, lo que afecta la velocidad de aglutinamiento de las partículas.
- c) La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa de agua pueden ser mucho mejor controladas en la prueba de jarras que en la planta de tratamiento. No obstante, estas deficiencias, la prueba de jarras sigue siendo el método más usual de los que hasta ahora disponemos para controlar los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el hecho de que la prueba de jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas no significa que pueda ejecutarse descuidadamente, lo que, por desgracia, suele ser bastante común.

✓ *Consideraciones generales para la ejecución de ensayos en la prueba de jarras*<sup>14</sup>

En los ensayos experimentales se imponen ciertos controles que sirven para evaluar los efectos producidos al variar el valor del parámetro que está siendo medido. Cuando los ensayos se efectúan con el equipo de prueba de jarras, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) equipo usado para la prueba;
- 2) análisis de laboratorios requeridos;
- 3) dosis de coagulante;
- 4) concentración del coagulante;
- 5) sistema de adición del coagulante;
- 6) dosificación del ayudante de floculación;
- 7) sistema de adición del ayudante de floculación;
- 8) tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla rápida;
- 9) tiempo de duración y gradiente de velocidad de la mezcla lenta;
- 10) sistema de toma de muestra.

Entre las observaciones generales que se deben tener en cuenta al ejecutar la prueba de jarras, tenemos:

- a) El tiempo y secuencia de dosificación: en algunas oportunidades el coagulante se adiciona a cada vaso (muestra) a diferentes tiempos según su turno. Tal procedimiento es inefectivo, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación, debido a que el tiempo entre la adición del coagulante y el ayudante siempre es crítico.
- b) En todos los casos, después de dosificados y mezclados los coagulantes con el agua, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones:

✓ *Soluciones químicas empleadas*

Las soluciones de coagulantes, ayudantes de coagulación y otros productos químicos que se van a usar en las pruebas de coagulación deben ser preparados en concentraciones tales que puedan ser medidas de manera conveniente y precisa. Véase la tabla 12. En los laboratorios de las plantas de tratamiento es mejor preparar las soluciones para los ensayos con los mismos coagulantes que se usan en la planta y no con reactivos purificados de laboratorio.

---

<sup>14</sup> (págs. 236 - 256, Ibid)

Tabla 12. Soluciones patrón para la prueba de coagulación

Producto químico	Concentración de la solución patrón o suspensión	Prepare una solución nueva después de	Notas
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16 H_2O$	10% (0,86% Al)	1 ó 2 meses	
$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9 H_2O$	10% (2% Fe)	1 mes	Renovar la solución si se pone opalescente
Almidón soluble	0,50%	2 días	Diluir 10 veces inmediatamente antes del uso
Derivados de poliacritamida	0,05%	1 mes	La solución debe tener por lo menos, un día. Diluir 10 veces antes de su uso
$H_2SO_4$	0,1 N	3 mes	
NaOH	0,1 N	1 mes	
Tierra fuller	0,50%	3 mes	Agitar bien antes de usar

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

El reactivo principal es la solución de sulfato de aluminio, cloruro o sulfato férrico. Se prepara agregando agua destilada a 100 g de coagulante hasta completar el volumen de 1.000 mL, con lo que se obtiene una solución de 10% que se puede conservar como solución patrón, por uno, dos o tres meses.

El ensayo de prueba de jarras se hace diluyendo 10 mL de la solución patrón hasta completar 100 mL con agua destilada. Queda una solución al 1% que no se puede conservar por más de 24 horas *pues corre el riesgo de hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación.*

Cuando es necesario, debido a la baja alcalinidad de la muestra, hay que preparar una suspensión de cal añadiendo agua destilada a 10 g de dicho material hasta completar un volumen total de 1.000 mL. Debe anotarse el compuesto de cal que se ha utilizado,  $CaO$  o  $Ca(OH)_2$ , y evitar el contacto de la suspensión así preparada con el aire, cuyo contenido de  $CO_2$  puede reaccionar con el óxido de calcio para formar carbonato que precipita. Antes de usar la suspensión, hay que agitarla.

### 6.1.3. TAMAÑO DEL FLOCULO PRODUCIDO

Se observa el tamaño del flóculo producido y se lo evalúa cualitativamente según sus características. Su tamaño puede expresarse en mm de acuerdo con el comparador desarrollado por el Water Research Institute de Inglaterra o según el índice de Willcomb, que se incluye en la tabla 13 y la figura 11. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, aunque no siempre el mayor tamaño de partículas produce la mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos.

✓ *Tiempo inicial de formación del flóculo*

Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer el primer indicio de formación de flóculo es uno de los sistemas para cuantificar la velocidad de la reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación, que ni aun así suele ser fácil, pues cuando el flóculo recién se forma, es casi incoloro. Por otra parte, el flóculo que se forma más rápido no necesariamente es el mejor. En esta evaluación debe tenerse en cuenta la diferencia de tiempo con que se agregaron los coagulantes a los vasos de precipitado. Si no se dispone de un sistema de aplicación simultánea que vierta la solución en las seis jarras al mismo tiempo, el coagulante tiene que agregarse con intervalos de 10 a 30 segundos en cada vaso y debe marcarse en los mismos, con lápiz de cera, el tiempo de aplicación en la forma siguiente:  $t = 0$  (para el vaso 1),  $t = 10$  s (para el vaso 2),  $t = 20$  s (para el vaso 3), etcétera. El tiempo de aparición del primer flóculo será igual al tiempo inicial de aplicación del coagulante a la primera jarra, hasta que se note el primer indicio de flóculo, menos el tiempo que tarde en hacerse la aplicación a la Jarra considerada. Esta determinación es bastante subjetiva y depende del criterio del observador.

Tabla 13. Índice de Floculación Willcomb

Número del índice	Descripción
0	Floculo coloidal: Ningún signo de aglutinación
2	Visible: Floculo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso: Floculo bien formado, pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lento o no sedimenta)
6	Claro: Floculo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud
8	Bueno: Floculo que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente: Floculo que se deposita completamente, dejando el agua cristalina

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

#### 6.1.4. DETERMINACION DE PH, ALCALINIDAD, COAGULANTE Y TURBIEDAD O COLORES RESIDUALES.

La determinación de estos parámetros se hace 10 a 20 minutos después de suspendida la agitación. Se extraen las paletas del agitador, se deja sedimentar el agua durante este tiempo y se succiona la muestra con una pipeta volumétrica de 100 mL, a la misma profundidad en todos los vasos (3 a

10 cm) o por medio de un sifón como el que se presenta en la figura 8. A la muestra así extraída se le determina:

- a) El pH
- b) La alcalinidad total
- c) La turbiedad o el color
- d) El contenido de coagulante residual.

Sin embargo, no siempre se obtiene la más baja concentración de coagulante residual con la dosis que produce la más baja turbiedad, en especial, cuando se usan pequeñas cantidades de coagulante. Además, hay que tener presente que el aluminio es soluble en un rango de 0,2 a 0,4 mg/L, según sea el pH del agua.

✓ *Parámetros de dosificación*

Los principales ensayos de dosificación que se deben determinar en el laboratorio son los siguientes:

- Selección del coagulante apropiado;
- Rango de dosis óptimas necesarias;
- Concentración óptima del coagulante;
- pH óptimo de coagulación;
- Dosis de modificador de pH;
- Selección de ayudante de coagulación y dosis óptima.

✓ *Selección del coagulante*

Consiste en efectuar ensayos con todos los coagulantes comercialmente disponibles, para seleccionar el que proporciona la mayor eficiencia al más bajo precio, para una determinada fuente. Con cada coagulante se efectuará un estudio completo de dosis óptima, concentración y pH óptimo de coagulación, y se sopesará eficiencia *versus* costo de la sustancia química y de las instalaciones necesarias para su manipulación y dosificación, para seleccionar el coagulante más apropiado. A continuación, se indican los procedimientos que se deberán aplicar en cada caso.

- Determinación de la dosis óptima

a) *Propósito*

El objetivo de este ensayo es determinar la dosis de coagulante que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales, que permita la formación de un flóculo grande, compacto y pesado, que pueda ser fácilmente retenido en los decantadores y que no se rompa y traspase el filtro. Debe observarse que no necesariamente el flóculo que sedimenta con rapidez es el que queda retenido en el filtro. El flóculo que se busca es el que dé el mayor rendimiento, con todo el conjunto de procesos.

b) *Procedimiento*

- 1) Determinar la temperatura, la turbiedad, el color, el pH, la alcalinidad y la dureza total del agua cruda con la que se va a trabajar. Determinar también la presencia de hierro y manganeso si esta es significativa.
- 2) Calcular la cantidad de coagulante que se va a aplicar a cada jarra mediante la ecuación de balance de masas:

$$P = D \times Q = q \times C$$

Dónde:

$P$  = Peso de coagulante por aplicar

$D$  = Dosis de coagulante por mg/L

$Q$  = Capacidad de la jarra en litros

$q$  = Volumen de solución por aplicar (mL)

$C$  = Concentración de la solución en mg/L

Ejemplo:

Se debe aplicar una dosis de 10 mg/L a una jarra de 2 litros con una solución al 2%. Calcular el volumen de solución que debe colocarse en la jeringa.

$$q = \frac{10 \text{ (mg/L)} \times 2 \text{ (L)} \times 1.000}{20.000 \text{ (mg/L)}} ; q = 1,0 \text{ mL}$$

- 3) Colocar las cantidades del coagulante que se va a aplicar a las jarras en cada vasito mediante una pipeta. Succione el contenido del vasito con una jeringa hipodérmica con la aguja puesta, para extraer hasta la última gota.
- 4) Retire la aguja y coloque la jeringa delante de la jarra correspondiente. Ponga en funcionamiento el equipo de prueba de jarras programando las memorias de la siguiente manera:

Memoria 1 = tiempo: 5 segundos, Velocidad = 300 rpm

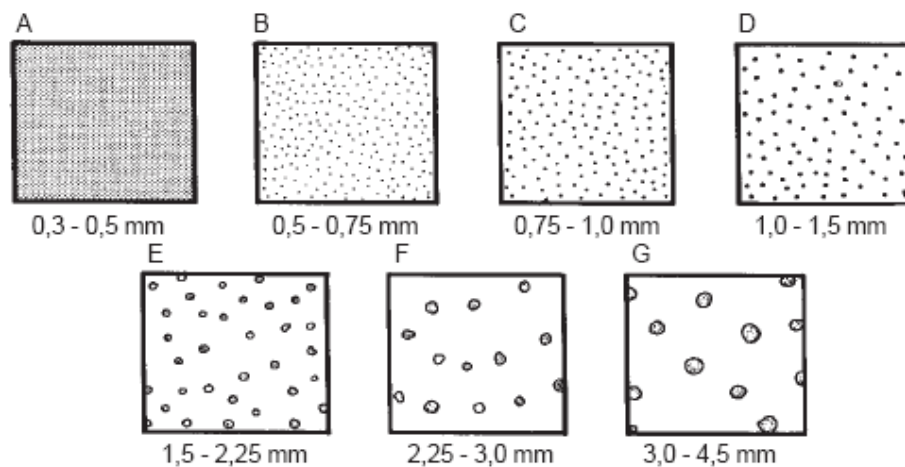
Memoria 2 = tiempo: 20 minutos, Velocidad = 40 rpm

Si en el ábaco de la figura 5 entramos a las curvas que corresponden a una prueba con estatores con una velocidad de 300-rpm y temperatura promedio de 20°C, podemos comprobar que en estas condiciones se consigue un gradiente de velocidad de aproximadamente 770 s<sup>-1</sup>. Asimismo, durante la etapa de floculación con 40 rpm se estará aplicando un gradiente de velocidad de 52 s<sup>-1</sup> que corresponde a un gradiente de floculación promedio.



- 5) Inicie el funcionamiento del equipo, aplicando en forma simultánea e instantánea el coagulante a todas las jarras. Cuide de que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más rápida. Recuerde que para que el proceso sea bien simulado, el coagulante debe aplicarse en el punto de máxima turbulencia.
- 6) Si el agua requiere un alcalinizante, este debe añadirse antes del coagulante. No es necesario contabilizar el tiempo entre la aplicación de ambos. La dosis de alcalinizante se decidirá en una prueba especial, en la que manteniendo la dosis de coagulante constante, se aplicarán dosis variables de una suspensión de cal al 1% (10 gramos de cal en un litro de agua).
- 7) Cuando el proceso de floculación se inicie, estaremos atentos a identificar en qué jarra aparece primero formación de flóculos y anotaremos el tiempo en que esto ha ocurrido.
- 8) Instantes antes de que el proceso de floculación concluya, observe el tamaño del flóculo que se ha desarrollado y compárelo con la tabla de la figura 10.

Ilustración 8. Comparador para estimar el tamaño del floculo producido en la coagulación



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

Figura 10. Comparador para estimar el tamaño del flóculo producido en la Coagulación (según WRA)

- 9) Una vez que el equipo ha concluido con los tiempos de mezcla y floculación, se apaga automáticamente y se procede a retirar las jarras, colocar los tomadores de muestras, cebar los sifones utilizando una jeringa, atracar el extremo del sifón utilizando una liga o bandita (colocada alrededor de la jarra), y dejaremos sedimentar el agua entre 5 y 15 minutos.

- 10) Cumplido el tiempo de sedimentación seleccionado, descartar los primeros 10 mL de muestra retenidos en el sifón y tomar las muestras a todas las jarras en un volumen de aproximadamente 30 mL. Medir turbiedad y color. Si se requiere mayor cantidad de muestra para análisis adicionales (pH, hierro, manganeso, etcétera), tomarla posteriormente.
- 11) Los resultados se grafican en papel aritmético. Se selecciona como dosis óptima aquella que produce la menor turbiedad.
- 12) Se analizan los diversos datos de dosis óptima para cada turbiedad de agua cruda y, mediante la teoría de mínimos cuadrados, se determina la recta de mejor ajuste que será de la forma:  $y = a + bx$ .

Dónde:

$y$  = turbiedad de agua cruda

$x$  = dosis óptima de coagulante para obtener la curva de dosificación de coagulante para el agua en estudio.

Tabla 14. Aplicación práctica: Determinación de dosis óptima

Dosis de coagulante (mg/L)	Turbiedad de agua cruda (UNT)			
	50	150	240	320
22,5	4,5			
25	2,8			
27,5	2,4			
30	(2,1) 1			
32,5	2,3			
37,5	2,7	10		
40		4,2		
42,5		(3,2) 2	3,5	
45		3,5	3	4
47,5		4,2	2,7	7
50		7,1	(2,5) 3	5,5
52,5			2,8	5,2
55			3,2	(3,4) 4
57,5				4,1

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE 1970

Utilizando el equipo de prueba de jarras, se determinó la variación de la calidad del agua en función de la dosis de coagulante (en este caso, sulfato de aluminio), para diferentes turbiedades que se presentaron en la fuente. Véase en la tabla 14.

Los puntos 1, 2, 3 y 4 del cuadro anterior muestran las dosis óptimas para tratar las turbiedades correspondientes, con las cuales se efectúa el gráfico de la figura 11.

Este gráfico es necesario para diseñar o evaluar todas las instalaciones de dosificación de una planta de filtración rápida y, por supuesto, para operarla. Si los operadores disponen de un gráfico como este, pueden cambiar rápidamente la dosificación del coagulante cada vez que cambia la turbiedad del agua cruda.

- Determinación de la concentración óptima

*a) Antecedentes*

Diversos estudios han demostrado que la concentración del coagulante influye en la eficiencia de la mezcla rápida, lo que modifica los resultados del proceso de coagulación. Es necesario trasladar esta experiencia a las plantas de tratamiento, previa selección del valor óptimo a nivel de laboratorio.

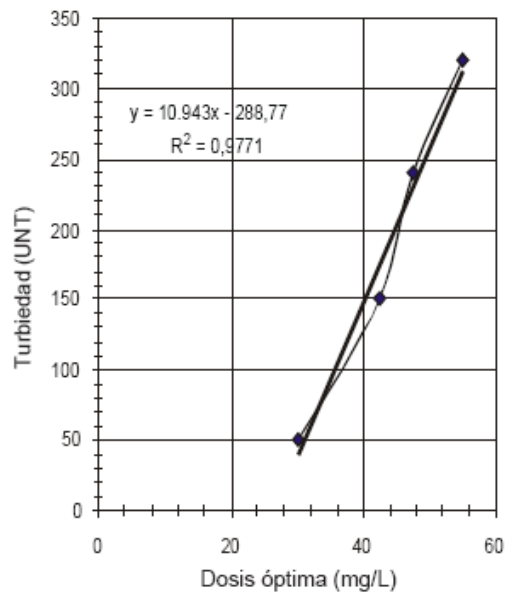
*b) Propósito*

Determinar la concentración de coagulante que optimice el proceso.

*c) Procedimiento*

- 1) Determinar la dosis óptima. Para esto, debe emplearse una solución de coagulante al 1% (10 g/L), la cual tiene un pH de 4,0 a 4,5.
- 2) Preparar una solución patrón del coagulante al 10% (100 g/L), preparar soluciones al 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0 y, finalmente, se utilizará también la solución patrón al 10%.
- 3) Llenar las jeringas de acuerdo con el procedimiento indicado para la dosis óptima, pero colocando en toda la misma dosis óptima ya determinada, con las diferentes concentraciones de solución preparadas.

Ilustración 9. Correlación turbiedad / dosis óptima

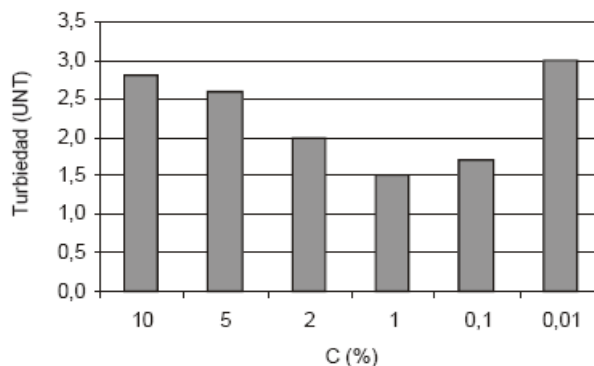


Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

Efectuar la mezcla rápida, la floculación y la decantación de acuerdo con lo indicado en la prueba anterior.

- 4) Durante el proceso, evalúe el tamaño del flóculo (índice de Willcomb) y la velocidad de la reacción.
- 5) Determine la turbiedad o el color residual de cada muestra.
- 6) Con los datos obtenidos, dibuje un histograma como el de la figura 12.

Figura 12. Concentración óptima del coagulante



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

#### d) Aplicación práctica

Se determinó una dosis óptima de 20 mg/L para una turbiedad preparada con caolinita y se repararon las soluciones indicadas en la primera columna del cuadro 11-8 para efectuar la prueba, y se obtuvieron los resultados indicados en el cuadro. La mecánica de la prueba es similar a la prueba de dosis óptima. La diferencia está en que a cada jarra se le aplica la dosis óptima a una diferente concentración, de manera que la concentración del coagulante es la única variable y cualquier diferencia en los resultados se debe a la concentración.

Tabla 15. Resultados de la prueba de concentración óptima

Concentración de la solución (%)	pH	Turbiedad residual (UNT)
10	2,65	2,8
5	2,84	2,6
2	3,32	2,0
1	3,50	1,5
0,1	3,75	1,7
0,01	4,12	3,0

Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

Sin lugar a dudas, es más difícil mezclar un volumen pequeño de solución con una gran masa de agua que un volumen mayor. Cuando el coagulante está más diluido, se facilita la mezcla, pero también se va incrementando el pH, hasta llegar a la hidrólisis del coagulante, con lo cual su efectividad se reduce notablemente.

En la prueba realizada se puede observar que con altas concentraciones de 10% y 5%, la turbiedad residual que se obtuvo no fue tan buena como con concentraciones bajas de 1 a 0,1 %. En cambio, al llegar a una concentración de 0,01, en que el pH fue de 4,12, los resultados se deterioraron notablemente debido a la hidrólisis parcial del coagulante. Véase la figura 12.

- Determinación del pH óptimo de coagulación

#### a) Propósito

Determinar el rango de pH óptimo de la muestra estudiada, en relación con el coagulante o ayudante de coagulación utilizado.

### b) Equipos y materiales

Equipo de prueba de jarras, con todos los aditamentos indicados en las pruebas anteriores; Turbidímetro, de preferencia nefelométrico; equipo para determinar el pH de la muestra; colorímetro con sensibilidad para determinar con precisión las unidades de color remanente en el agua tratada. Ácido sulfúrico diluido 0,1 N, hidróxido de sodio diluido 0,1 N y el coagulante seleccionado.

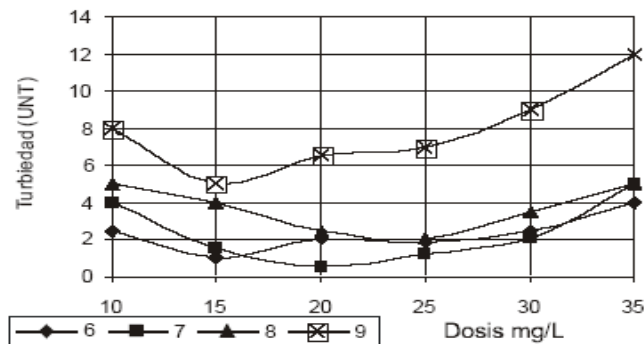
### c) Procedimiento

1) Si el problema del agua es turbiedad, efectuar la prueba dentro de un rango de pH de 6 a 9. Si el problema es color, en un rango de 4 a 7.

2) Se prepararán los diferentes pH colocando el agua para las seis jarras en un solo recipiente y si el pH que se desea obtener en esta muestra es más bajo que el pH natural del agua, agregar ácido sulfúrico.

Si es mayor, aplicar hidróxido de sodio. Se agregará gota a gota el modificador, agitando con una varilla para homogeneizar. Se puede mantener el bulbo del medidor de pH dentro de la muestra para determinar el cambio del pH.

Figura 13. Determinación del pH y la dosis óptima



Fuente: Agraman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division, ASCE* 1970

Figura 13. Determinación del pH y la dosis óptima.

3) Una vez ajustado el pH, se efectúa una prueba de dosis óptima y se determina la dosis que produce el efluente de mejor calidad.

4) Se continúa de igual forma con los demás pH. Se dibujan todas las curvas en un solo gráfico. La curva que presente el punto de mínima más bajo - es decir, el efluente más claro - estará indicando el pH y la dosis óptimos.

5) Se recomienda efectuar un estudio económico considerando el consumo de coagulante en el caso de efectuar el tratamiento con el pH natural del agua *versus* el tratamiento con modificadores de pH y dosis óptima generalmente menor. También convendría evaluar si la reducción de turbiedad y color es significativa, así como la mayor duración de las carreras de filtración que se obtendrían, y compararlas con el mayor costo de operación, mantenimiento e instalaciones adicionales.

#### *d) Aplicación práctica*

Se efectuó esta prueba con un agua que presentaba 80 UNT de turbiedad y pH de 7,0. Se prepararon muestras con pH de 6, 8 y 9, y se efectuó una dosis óptima con cada muestra. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las curvas de la figura 13.

Al analizar el gráfico, podemos apreciar que los mejores resultados se obtuvieron con el pH natural del agua y que la dosis óptima es de 20 mg/L.

Como se puede apreciar con valores de pH menores o mayores, la calidad del efluente se deteriora.

#### Selección de ayudantes de coagulación

##### *a) Antecedentes*

Existe una gran variedad de ayudantes de coagulación. Algunos solo se pueden usar en procesos industriales o en aguas servidas, porque son tóxicos o cancerígenos. Otros, en cambio, están aprobados para uso en agua potable. Por tanto, *la primera condición que debe reunir un polielectrolito es que no sea peligroso para la salud*. La EPA publica periódicamente las listas de polielectrolitos que pueden usarse en aguas para consumo humano. Asimismo, aunque un determinado ayudante de coagulación esté aprobado para el uso en tratamiento de agua, ello no garantiza que dé buenos resultados con cualquier tipo de agua. Por el contrario, algunos de ellos no solo no mejoran, sino que pueden perjudicar el proceso, debido a que en cierto tipo de aguas dispersan el flóculo. Todo depende de la carga eléctrica que posean (pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos), así como de la carga eléctrica de las partículas en suspensión y de la energía necesaria para la absorción de los polímeros.

La única forma de seleccionar el polímero más efectivo para cada tipo de agua es hacer pruebas de jarras en el laboratorio con un buen número de ellos para determinar cuál es el que más conviene, tanto técnica como económicamente.

Muchas veces el resultado puede indicar que no conviene usar un ayudante de coagulación, porque no es suficientemente eficiente o

porque encarece demasiado el costo de producción. Con la finalidad de evitar el riesgo que siempre existe por el empleo generalizado de sustancias químicas, también se recomienda ensayar primero con productos naturales como almidones, celulosas, alginato, goma de cactus y gelatina común.

*a) Objetivo*

Comparar la eficiencia de remoción de turbiedad y/o color de varios polielectrolitos, a fin de escoger el que mejor se adapte a las características del agua que se quiere analizar.

*b) Equipos y materiales*

Los mismos equipos y materiales indicados en las pruebas anteriores y los polielectrolitos entre los cuales se efectuará la selección.

*c) Procedimiento*

1) Efectuar una prueba de jarras en forma convencional para determinar la dosis óptima de coagulante metálico (sulfato de aluminio o cloruro férrico).

2) Preparar una nueva prueba de jarras en la que se adicionará a cada jarra la dosis óptima de coagulante seleccionada, además de dosis variables de polielectrolito (entre 0,1 y 1,0 mg/L o entre 0,01 y 0,5 mg/L, de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes), excepto a la primera jarra, para que sirva de comparación con las demás.

3) Durante el proceso, determinar el índice de Willcomb y el tiempo inicial de formación del flóculo en cada jarra.

4) Suspendida la agitación al cabo de 15 a 30 minutos, dejar sedimentar el agua por 10 minutos, tomar el sobrenadante y determinar la turbiedad o color residual y el pH. Repetir con el mayor número de polielectrolitos disponibles a fin de hacer una selección preliminar.

5) Una vez seleccionado el polielectrolito que dio los mejores resultados, se efectúan nuevos ensayos disminuyendo la dosis de coagulante metálico (por ejemplo, 75% de la óptima) y agregar polielectrolito en cantidad variable, o mantener constante la dosis de polielectrolito determinada con anterioridad, variando la dosis de coagulante hasta obtener la combinación más económica. Si la calidad del agua varía durante el año, deben hacerse ensayos para diferentes condiciones de turbiedad y color. Por lo general, se obtienen resultados diferentes cuando se agrega el polielectrolito antes y después del coagulante. Comúnmente esta última alternativa es la mejor, pero deben ensayarse ambas, a fin de constatar cuál es la secuencia más apropiada



• Determinación de los parámetros de floculación:

a) *Propósito*

El propósito de este ensayo es la determinación de los parámetros de floculación: gradiente de velocidad ( $G$ ) y tiempo de retención ( $T$ ), en función de las dosis óptimas determinadas y empleando el método de Villegas y Letterman.

b) *Equipos y materiales* Los mismos indicados anteriormente.

c) *Procedimiento*

- 1) Se toma la muestra de agua cruda y se determinan los parámetros básicos de calidad: turbiedad y/o color, pH y alcalinidad.
- 2) Se llenan las 6 jarras con una muestra del agua cruda que se va a flocular.
- 3) Se pone a funcionar el equipo con la máxima velocidad de rotación de las paletas (por ejemplo, 300 rpm).
- 4) Se aplica la dosis de modificador de pH y la dosis óptima de coagulante, de acuerdo con lo determinado en el ensayo correspondiente.
- 5) A partir de la aplicación del coagulante, se realizará la mezcla rápida durante un tiempo instantáneo de aproximadamente 5 segundos.
- 6) Al finalizar la mezcla rápida, se iniciará el proceso de floculación, para lo cual se habrá ajustado la memoria del equipo para uno de los gradientes de velocidad seleccionados. El rango de gradientes de velocidad óptimas para esta prueba fluctúa entre 80 y 20 s<sup>-1</sup>. Cuando el estudio corresponda a una planta de gran capacidad, se tomarán intervalos de 10 s<sup>-1</sup>; cuando se trate de una planta pequeña, se tomarán intervalos de 20 s<sup>-1</sup>.
- 7) Luego de iniciada la floculación, a los 5 minutos se retira la primera jarra, se coloca el tomador de muestras y se deja sedimentar durante 10 minutos.  
  
Después de 10 minutos, se retira la segunda; luego de 15, la tercera; y así sucesivamente, hasta que a los 30 minutos se retira la última. Con cada jarra se procede de modo similar.
- 8) Se determina la turbiedad residual ( $T_f$ ) a cada muestra, se calcula la eficiencia remocional ( $T_f/T_o$ )

9) Se repite el ensayo incrementando el gradiente de velocidad de acuerdo con el intervalo seleccionado.

10) Se repite el procedimiento con cada una de las condiciones de turbiedad o color, representativas de la calidad de agua cruda existente.

11) Se grafica en escalas aritméticas la eficiencia remocional ( $Tf/To$ ) versus los tiempos de floculación de cada una de las jarras de las que proceden las muestras analizadas. En este gráfico se determina el tiempo total de floculación, en función del punto en que se produce el menor valor de ( $Tf/To$ ).

12) Posteriormente, se grafican los valores de  $Tf/To$  versus gradientes de velocidad, para cada tiempo de floculación analizado. En cada curva de tiempo se produce un punto mínimo (punto de inflexión de la parábola), que corresponde al gradiente de velocidad que optimiza con ese tiempo de retención. Este punto mínimo es el de máxima eficiencia remocional para el tiempo de retención correspondiente. En cada curva de tiempo se identifica el punto mínimo tomando el gradiente de velocidad óptimo correspondiente.

13) Se grafican en papel doble logarítmico los valores de tiempo versus gradientes de velocidad óptimas. Se determina la línea de mejor ajuste de estos puntos aplicando mínimos cuadrados y se determina la ecuación de correlación y el grado de ajuste. Si el grado de ajuste es aceptable ( $r^2 = 0,90$ ), se continúa el cálculo; en caso contrario, deberá repetirse el procedimiento de laboratorio, y se deberá trabajar con más cuidado para mejorar los datos.

14) El tiempo de retención determinado en el primer gráfico se divide para el número de tramos que tiene el floculador (en el caso de que estemos evaluando una unidad) o bien para el número de tramos que hemos seleccionado en la unidad que estamos proyectando y con cada tiempo entramos al gráfico y determinamos la gradiente de velocidad correspondiente.

## *Observaciones*

Tomar en cuenta las siguientes precauciones para obtener información confiable:

- ✚ Exactitud en los tiempos de toma de muestras.
  
- ✚ Realizar los ensayos a la temperatura normal del agua. La temperatura ha sido reconocida como un factor muy importante en el tratamiento. Camp et al. estudiaron los efectos de la temperatura en la coagulación con coagulantes férricos. La necesidad de llevar a cabo los ensayos a la temperatura del agua en la planta es especialmente importante con aguas que tienen bajas temperaturas y elevadas turbiedades.
  
- ✚ Manipular cuidadosamente el tomador de muestras para no alterar las condiciones de reposo de la masa de agua, lo que malograría la sedimentación.

## **7. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **7.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Se define el tipo de investigación como cuantitativo-experimental, ya que se estudió y se analizó el caso para el diseño y construcción de una planta de tratamiento para potabilización de agua.

### **7.2. METODOLOGIA**

- I. Inicialmente se vio la necesidad de crear una herramienta didáctica para el Laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia. En la actualidad los procesos de tratamiento primario para el tratamiento de agua potable deben ser vistos únicamente en salidas de campo; lo que dificulta el aprendizaje para los estudiantes de la profesión en Ingeniería civil; ya que no todos los estudiantes tienen la facilidad para asistir a estas prácticas. Una de las falencias en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia es la limitación en herramientas, que permita ver al estudiante aprender los procesos de manera didáctica, donde pueda hacer sus propios cálculos y sacar sus propias conclusiones con asesoría de su profesor, de acuerdo a parámetros específicos de calidad del agua.
- II. Se programó las actividades a través de un cronograma para la elaboración, manejo, pruebas y culminación del modelo.
- III. Se realizó un diagnóstico e investigación de los diferentes sistemas de tratamiento de agua potable manejado por los municipios de Colombia, documentación sobre los modelos existentes en la academia de la ingeniería, se estudiaron y observaron los modelos en la Universidad Católica de Colombia.
- IV. A través de los estudios de prefactibilidad, eficiencia y economía de los diseños hidráulicos empleados en una planta de tratamiento de agua potable convencional, se realiza el análisis de la información y aplicando la matriz del numeral 1.4.1 (tabla No. 2), se adoptan al modelo Floculador Tipo Alabama y Sedimentador Tasa Alta de Placas Paralelas.

- V. Teniendo las definiciones anteriores se seleccionará y se realizó el diseño del modelo PLANTA DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA
- VI. Se seleccionó el material adecuado para la construcción del modelo, se estableció que fuese el vidrio, ya que el propósito es visualizar cada uno de los procesos que se manejaran en el modelo; tubería de PVC la cual nos realizara las conexiones necesarias del modelo, accesorios en PVC para tener la continuidad en la construcción del modelo y realizar las adaptaciones con mayor precisión a la tubería.
- VII. Se elaboró los planos y dimensionamiento óptimo para el modelo.
- VIII. Se realiza la construcción del modelo.
- IX. El modelo será instalado en el Laboratorio de Aguas de la Universidad Católica de Colombia, donde se realizó pruebas de laboratorio previas a la construcción del modelo, de igual manera el modelo será sometido a pruebas de funcionamiento y sobre estas se realizará la optimización del modelo para lograr una eficiencia del 80%.
- X. Teniendo los resultados esperados del modelo, se procederá a la estructuración de la Guía de Laboratorio, para que el estudiante de la Universidad Católica de Colombia tenga una herramienta para la ejecución de sus prácticas sobre el modelo PLANTA DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACION DE AGUA
- XI. Se realizará la presentación y sustentación del modelo, bajo los lineamientos estipulados por la Universidad Católica de Colombia durante las fechas establecidas de socialización ante los jurados pertinentes.



- Muestra salida floclador

Turbiedad a la salida del floclador tipo Alabama (20.8 NTU).



Fuente: Autores

- Muestra salida sedimentador

Turbiedad a la salida del sedimentador tasa alta (19.5 NTU).



Fuente: Autores

- Muestra salida filtro o sistema

Turbiedad a la salida del filtro rápido o de todo el sistema en general (3.88 NTU)



Fuente: Autores

**NTU:** La unidad nefelométrica de turbidez expresada habitualmente con el acrónimo NTU del inglés *Nephelometric Turbidity Unit*, es una unidad utilizada para medir la turbidez de un fluido



## 9. CONCLUSIONES

- Los diseños de las plantas de tratamiento encontrados según la investigación son flujo Horizontal, Vertical y Alabama que se encuentran ubicados en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Meta correspondientemente.
- El modelo diseñado con un caudal de 0.02 l/s cumple y satisface las necesidades propuestas anteriormente por parte de los objetivos, garantizando la efectividad del proyecto.
- El modelo construido para uso de la Universidad Católica de Colombia cumplió con el objetivo propuesto de eficiencia del 80% ya que se obtuvo una eficiencia del 88% con las pruebas que se le realizaron a la planta durante su seguimiento y el proceso de calibración de la misma.
- Se determinaron varias posibilidades de dosificación para la planta, de las cuales se llega a la conclusión de la dosificación más apropiada tomándola como parámetro de sustentación del proceso de eficiencia.
- La dosis óptima se establece debido a la cantidad de floc que se forma en las jarras. Esta dosis es de 0.1gr/L
- El material con el cual se diseña y construye el modelo cumple con características óptimas de dureza, resistencia, transparencia y manejo que eran los principales aspectos para que el modelo cumpliera con el propósito puesto de ser una herramienta para el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia.
- El modelo construido a pesar de tener medidas a escala cumple con los parámetros establecidos por el RAS 2000 y el decreto 475 del 98. Ya que durante el manejo de la planta se observó que cumple las recomendaciones para así garantizar agua de calidad para el consumo humano.

## 10.RECOMENDACIONES

- ✓ Para la preparación del agua cruda es necesario realizar de una manera adecuada la mezcla ya que si el agua no se encuentra mezclada correctamente los resultados de las pruebas, pueden llegar a ser errados o no válidos.
- ✓ Es necesario purgar la planta antes de iniciar el proceso, se refiere purga como limpiar cada parte de la planta. Se debe indicar en el procedimiento mínimo por media hora para que los resultados sean los esperados.
- ✓ Para las pruebas del test de jarras se sugiere no limpiar los vasos con detergentes pues si no se le retira el jabón puede interferir para el resultado de la prueba de jarras.
- ✓ Para el modelo se recomienda verificar que los tiempos establecidos por la prueba de jarras se cumplan en el proceso de dosificación, floculación y sedimentación del modelo.
- ✓ Las velocidades dentro del sistema deben variar de acuerdo a los procesos, es decir, en el tanque de recolección se debe verificar que las velocidades sean superiores para que exista buen mezclado de los químicos, en el floculador los tiempos deben ser menores y constantes con el fin de evitar cortocircuito en el fondo del tanque o espacios muertos en la superficie del mismo, lo cual no permitirá la formación del floc.
- ✓ En el momento de colocar los reductores en los codos que se encuentran en el fondo de las cámaras, se tiene que tener en cuenta las velocidades pues pueden saturar los tanques y rebosarse por las paredes de los mismos.
- ✓ Los caudales de los dosificadores, deben ser graduados de tal manera que se suministre la totalidad de coagulante y ayudante en el tiempo de retención total de la planta.
- ✓ Para mejorar la planta en su proceso de potabilización se sugiere añadir un vertedero para así adicionar el coagulante y adicionalmente controlar el caudal ya que se debe mantener siempre constante.
- ✓ Se propone incluir válvulas en la evacuación de los lodos en cada uno de los compartimientos del floculador para así tener el control individual de estos.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- ARBOLEDA Valencia, J. (2000.). *Teoría y práctica de la purificación del agua.* . Bogotá D.C. : Editorial Mc Graw Hill.
- Argaman, Y., & Kaufman, W. J. (1970). *Turbulence and Flocculation.* California: Journal of the Sanitary Engineering Division.
- AVILA JIMENEZ, C. (24 de Marzo de 2015). *EL TIEMPO.* Obtenido de ¿Cómo es el avance en la cobertura de acueducto en Colombia?: <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/agua-potable-en-colombia-/15445939>
- Basico, M. d. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS.* Bogota.
- BV, L. (2016). *Historia del tratamiento de agua potable.* Obtenido de Water Treatment Solutions: <http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-tratamiento-agua-potable.htm>
- CARDENAS, Y. A. (26 de Septiembre de 2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación.* Obtenido de [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)
- ENA. (2010). *Estudio Nacional Del Agua.*
- FANDIÑO PIAMONTE, J. S. (2016). *Evaluación y optimización de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de purificación en el departamento del Tolima.* Bogota: Repositorio Insitucional Tesis Base de Datos.
- INCONTEC. (s.f.). *NTC 1486. v 2002-03-11 Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación.*
- J., C. F. (s.f.). *Acueductos teoría y diseño.* Universidad de Medellín.
- LOPEZ CUALLA, R. A. (1997). *Elementos de Acueductos y Alcantarillados.* Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Muñoz, H. M. (1997). *Obras Hidráulicas Rurales.* Santiago de Cali: Universidad del Valle.

- Pavco. (5 de Octubre de 2016). *Pavco*. Obtenido de <http://www.pavco.com.co/>
- Pereira, A. y. (2014). *Captación y aducción del agua*. Obtenido de [http://www.aguasyaguas.com.co/calidad\\_agua/index.php/es/home-es-es/10-contenido/12-captacion-y-aduccion-del-agua](http://www.aguasyaguas.com.co/calidad_agua/index.php/es/home-es-es/10-contenido/12-captacion-y-aduccion-del-agua)
- Republica de Colombia Ministerio de Desarrollo Economico Direccion de Agua Potable y Saneamiento Basico. (10 de Noviembre de 2000). *Reglamento Tecnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Basico*. Recuperado el 5 de Octubre de 2016, de Ras2000: <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULOBO%20030714.pdf>
- Rojas, J. A. (2002). *Purificacion del Agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingenieria.
- Rojas, J. A. (2003). *Tratamiento de aguas potables*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingenieria.
- ROMERO ROJAS, J. A. (1999). Potabilizacion del Agua. En J. A. ROMERO ROJAS. Mexico DF: Alfaomega Grupo Editor SA.
- Salud, O. O. (Noviembre de 2016). *Organización Mundial de la Salud, OMS* . Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>
- SISTEC, A. (s.f.). *Solucion en tratamientos de agua*. Obtenido de Planta de tratamiento de agua potable: <http://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-agua-potable.php>(2016)
- Spellman, F. R. (2004). *Manual de agua potable*. Acribia Editorial.
- Superintendencia de Servicios Publicos Domiciliarios*. (5 de Octubre de 2016). Obtenido de <http://www.superservicios.gov.co/content/download/11513/93263/version/1/file/Glosario+de+los+servicios+de+acueducto%2C+alcantarillado+y+a+seo.pdf>
- Theoduloz, G. A. (2011). *Procesos de Tratamiento de Agua Potable*. Obtenido de [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/CI51K/1/material\\_docente/](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/CI51K/1/material_docente/)
- Torres, E. (2016). *Plantas de tratamiento de agua potable y residual* . Bogotá: Toma de apuntes.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Stumm, W. y O'Melia, C. R. Stechiometry of coagulation. Journal of the American Water Works Association. 1978.

Andreu-Villegas, R. y Letterman, R. D. Optimizing flocculator power input. Journal of the Environmental Division, Abril, 1976.

Argaman, Y. y Kaufman, W. J. Turbulence and Flocculation. Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings, ASCE, 1970.

Hudson, H. E. Physical aspects of flocculation. Journal of the American Water Works Association, Julio, 1965.

Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de control de calidad de agua para consumo humano. Plantas evaluadas en los diversos países de América Latina durante las prácticas de campo de los cursos de evaluación de plantas de tratamiento de agua. 1981-1988.

Pérez Carrión, J. y Castro de Esparza, M. L. Determinación de variables químicas. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. CEPIS, 1981.

Pérez Carrión, J. y Cánepa de Vargas, L. Procesos Unitarios. Laboratorio, Floculación. Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. CEPIS, 1981.

Pérez, Carrión, J. y Cánepa de Vargas, L. Estudio y diseño de la planta de tratamiento de agua de Barranca. Lima, 1978.

Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Manual II. Criterios de Selección. Serie Filtración Rápida. CEPIS, 1992.

Vargas, Lidia. Evaluación Técnica de la Planta de Filtración Rápida de Sullana. Informe Técnico 422, julio, 1995.

Vargas, Lidia. Estudio de tratabilidad de las aguas del río Vilcanota. Informe Técnico 444, mayo, 1996.

## **ANEXOS**

**Anexo A    Dimensionamiento del modelo para Floculador Alabama y Sedimentador tasa alta (Formulas - Libro)**

## **Anexo B Dimensionamiento modelo (Excel)**

**Anexo C Planos Floculador Alabama, Sedimentador tasa alta, sistema completo**



**Anexo E Resolución 2115**

## **Anexo F    Registro Fotográfico**