

**IMPLEMENTACION DE LA DOSIFICACION DE CARBON ACTIVADO PARA LA
REMOCION DE MATERIA ORGANICA EN LA ETAPA DE PRETRATAMIENTO
DE LA PLANTA DE BOSCONIA DEL A.M.B S.A E.S.P**

DIEGO ARMANDO SANABRIA GAMBOA

TONY LAINER COBA VILLA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2009

**IMPLEMENTACION DE LA DOSIFICACION DE CARBON ACTIVADO PARA LA
REMOCION DE MATERIA ORGANICA EN LA ETAPA DE PRETRATAMIENTO
DE LA PLANTA DE BOSCONIA DEL A.M.B S.A E.S.P**

DIEGO ARMANDO SANABRIA GAMBOA

TONY LAINER COBA VILLA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero Químico

Director

Ingeniero Químico CRISOSTOMO BARAJAS FERREIRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Codirector

Químico JHON JAIRO BARRENECHE MARTINEZ

JEFE DE PLANTA BOSCONIA AMB

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

BUCARAMANGA

2009

DEDICATORIA

A Dios, por darme la salud y el entendimiento suficiente para afrontar cada instante de mi vida.

A mi madre Jovita, siempre estarás en mi mente y en mi corazón, y donde estés se que estás conmigo en todo lo que hago.

A mis hermanas Alexandra y Nelly, por ser mi apoyo incondicional.

A todos los que de una u otra forma contribuyeron para que esto fuera una realidad.

Tony Coba

En este momento tan especial para mí en el cual cumplo con todas mis expectativas y metas quiero agradecer primero que todo a Dios por estar siempre conmigo y bendecirme en cada momento.

Gracias a mis padres Elizabeth y José Anibal, y a mis hermanos por ser un apoyo en los momentos mas difíciles y disfrutar conmigo los momentos agradables, a esta gran universidad la cual hizo posible lograr mis objetivos con sus grandes profesionales que me brindaron sus saberes para crecer profesional y personalmente, a todas las personas que han estado cerca en todo este proceso que hoy culmina favorablemente.

Diego Armando Sanabria G.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. MARCO TEORICO	3
1.1 Carbón Activado	3
1.1.2 Ventajas y desventajas del uso del carbón activado en polvo	4
1.2 Adsorción	5
1.2.1 Variables que afectan la adsorción en sistemas líquidos	6
1.3 Tipos de unidades de mezcla rápida mecánica	7
1.3.1 Mezcla en línea mecánica	7
1.3.2 Retromezclado	8
1.4 Triahalometanos	8
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	9
2.1 Prueba de trazadores	9
2.1 Construcción de filtro piloto	10
2.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos en el laboratorio	11
2.4 Determinación de la dosificación óptima de carbón activado en ensayos de laboratorio	11
2.5 Procesamiento y análisis de resultandos	12
2.6 Diseño a implementar en planta	12
3. ANALISIS DE RESULTADOS	13
3.1 Tiempo de retención	13
3.2 Determinación de las variables medibles presentes en el agua	14
3.2.1 Medición de la remoción de color	15
3.2.2 Medición de la remoción de turbiedad	16
3.2.3 Medición de la remoción de mercurio	17
3.2.4 Verificación de materia orgánica usando la técnica AUV ₂₅₄	17

3.3	Isoterma de Adsorción	18
3.4	Dimensiones del tanque de dosificación	20
3.4.1	Recomendaciones que se deben tener en cuenta para el diseño para el diseño de del dosificador	21
3.5	Especificación de la bomba dosificadora para carbón activado	22
4	CONCLUSIONES	24
5	RECOMENDACIONES	25
6	BIBLIOGRAFIA	26
7	ANEXOS	29

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Trazado de la isoterma de adsorción	6
Figura 2. Mezclador en línea mecánico	7
Figura 3. Tipos de retromezcladores en sistemas de agitación	8
Figura 4. Filtro piloto planta Bosconia	10
Figura 5. Conductividad vs. Tiempo	13
Figura 6. Equipos para medición de algunas variables presentes en el agua	14
Figura 7. Porcentajes de remoción vs color	15
Figura 8. Porcentajes de remoción vs turbiedad	16
Figura 9. Porcentaje de remoción versus concentración de mercurio	17
Figura 10. Concentración de carbón vs AUV_{254}	18
Figura 11. Isoterma de Freundlich para el carbón estudiado	19
Figura 12. Dimensiones del tanque de dosificación	21
Figura 13. Esquema indicativo de la operación de un filtro rápido de arena	30
Figura 14. Medios de filtración	31
Figura 15. Esquema de flujo en un filtro	31
Figura 16. Dimensiones para mezclado rápido de seis paletas planas	33

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Ventajas y desventajas del uso del carbón activado en polvo	4
Tabla 2.	Ficha técnica del carbón activado sin dispersión referencia SDA	36
Tabla 3.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 1	37
Tabla 4.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 2	37
Tabla 5.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 3	38
Tabla 6.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 4	38
Tabla 7.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 5	39
Tabla 8.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 6	39
Tabla 9.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 7	40
Tabla 10.	Resultados fisicoquímicos de la muestra 8	40
Tabla 11.	Resultados de la técnica AUV ₂₅₄	41

LISTA DE ANEXOS

		Pág.
ANEXO A	Generalidades de los filtros de arena antracita	29
ANEXO B	Consideraciones y ecuaciones de diseño	33
ANEXO C	Características del carbón utilizado en laboratorio	36
ANEXO D	Resultados fisicoquímicos y técnica AUV ₂₅₄	37
ANEXO E	Generalidades de la formación de trihalometanos	42

RESUMEN

Título: IMPLEMENTACION DE LA DOSIFICACION DE CARBON ACTIVADO PARA LA REMOCION DE MATERIA ORGANICA EN LA ETAPA DE PRETRATAMIENTO DE LA PLANTA DE BOSCONIA DEL A.M.B S.A E.S.P*

Autor: SANABRIA GAMBOA Diego Armando., COBA VILLA Tony Lainer. **

Palabras claves: Carbón activado, adsorción, potabilización de agua, dosificador.

El objetivo de este trabajo fue determinar la dosis óptima de carbón activado en polvo para la remoción de materia orgánica en la etapa de pretratamiento de la planta de Bosconia del A.M.B. S.A. E.S.P. El estudio se dividió en dos partes principales, la determinación de la dosis óptima de carbón activado y el diseño de un dosificador para su posterior implementación en la planta.

La importancia de éste estudio radica en encontrar una relación entre las diferentes variables del proceso y minimizar el costo de tratamiento utilizando las propiedades del adsorbente, además de conocer el impacto económico en la potabilización que se viene realizando sin carbón activado para comparar los resultados y justificar el desarrollo de la tecnología.

Los resultados experimentales mostraron que la remoción de materia orgánica con carbón activado y sulfato de aluminio líquido resultó ser más efectivo que el proceso convencional que se realiza en la planta para remoción con sulfato de aluminio en la etapa de coagulación; lográndose remociones de color y materia orgánica entre el 25 y 35% más que solo usando sulfato de aluminio. Estos valores se encuentran por debajo de los mínimos establecidos por el Estado y la empresa, para considerar la calidad del agua apta para consumo humano y reducir costos de producción a niveles más competitivos.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Crisóstomo Barajas Ferreira. Co director John Barreneche Martínez

ABSTRACT

Title:* IMPLEMENTATION OF THE POWERED ACTIVATED COAL DOSAGE FOR THE REMOVAL ORGANIC MATTER AT THE STAGE OF PRETREATMENT IN THE PLANT OF BOSCONIA OF A.M.B S.A. E.S.P*

Autor: SANABRIA GAMBOA Diego Armando., COBA VILLA Tony Lainer. **

Keywords: powered activate carbon, adsorption, drinking water treatment

The aim of this work was to determinate the powered activated coal dose required to remove organic matter in the process of drinking water production at the Bosconia's water pretreatment plant of A.M.B. S.A. E.S. P. This study was carried out in to two phases; at first to determinate the optimal powered activated carbon dose and second part to design an industrial dispenser according to the conditions of the plant.

The importance of this study is to find a relationship between the different variables of the process and minimize the cost of treatment using the properties of the adsorbent, besides knowing the economic impact on the drinking water treatment that has been done without activated coal as a comparison and justify the development of technology.

To use powered *activated carbon* and Aluminum Sulfate for removing organic matter under water plant conditions was found to be the most efficient among the currently drinking water treatment with only aluminum sulfate. The results indicate that combine aluminium sulfate with an activated-carbon absorption process gives rise to 25-35% removal of the color and organic matter. This value meets or exceeds the Colombian regulatory or guidelines for Colombian drinking water quality and reducing costs to competitive levels.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Crisóstomo Barajas Ferreira. Co director John Barreneche Martínez

INTRODUCCION

El agua es el recurso hídrico más importante para la humanidad, se ha visto disminuido por muchos factores, entre ellos, el calentamiento global, el malgasto y la contaminación de las fuentes por empresas, desechos y otros agentes perjudiciales. Por lo que se hace necesario utilizar nuevas formas de tratamiento para estas corrientes.

El carbón activado posee características deseables para remover materiales presentes en el agua y que por su alta toxicidad se hace necesario diseñar dosificadores para su uso industrial. Su bajo precio hace que el tratamiento con éste tenga un margen costo-beneficio muy alto siendo importante para su implementación en pequeñas o grandes plantas de potabilización, además siendo interesante su fácil almacenamiento y transporte.

La adsorción se fundamenta en la adherencia superficial en los intersticios de las partículas del carbón además del área que posee cada una de éstas y que se refleja en la alta retención de este tipo de sustancias ocupando poco volumen.

Para este tipo de tratamientos se utilizan en general dos tecnologías, columna en lecho fijo y tanque agitado. El uso del tanque agitado en potabilización de aguas ha demostrado ser de gran efectividad, mejorando su calidad, reduciendo el uso de polímeros sintéticos y de sulfato de aluminio para la remoción de materia orgánica; además, con esta tecnología se logra remover iones de metales pesados como el mercurio y el arsénico

Realizando los correspondientes ensayos, se ha podido concluir que este tipo de adsorbente es eficaz para moléculas de gran tamaño como las de conglomerados de materia orgánica, trabaja mejor a temperatura ambiente y las que mejor se adsorben son de tipo no biodegradable o que su tiempo de degradación es muy largo.

El propósito de la remoción de materia orgánica es debido el grave riesgo de encontrar sustancias húmicas y que si no se reducen su concentración eficientemente en etapas de tratamiento previas a la desinfección con cloro libre se promueve la formación de compuestos orgánicos halogenados, entre los que se encuentran los trihalometanos (TTHM), que están formados por un átomo de carbono, un átomo de hidrogeno y tres átomos de halógenos. Los TTHM están dentro de la clasificación de sustancias reconocidas como agentes cancerígenos, muta génicos y posiblemente teratogenicos¹.

¹ SIMMOW, V.F. y TARDIF, R. G. "The mutanogenic activity of halogenated compounds found in chlorinated drinking water". Water Chlorination: Enviromental Impact and Healt effects. Vol. 2. 1978. p 417-432.

1. MARCO TEORICO

1.1 Carbón activado

“El carbón activado, o carbón activo, es un material poroso que se ha sometido a reacción con gases oxidantes (como CO_2 o aire), con vapor de agua, o bien a un tratamiento con adición de productos químicos como el H_3PO_4 durante (o después) de un proceso de carbonización, con el objeto de aumentar su porosidad. Los carbones activados poseen una capacidad de adsorción elevada y se utilizan para la purificación de líquidos y gases. Mediante el control adecuado de los procesos de carbonización y activación se puede obtener una gran variedad de carbones activados que posean diferentes distribuciones de tamaño de poros.”²

El carbón activado se puede obtener de diferentes materias primas tales como conchas de coco, carbón mineral, madera, huesos etcétera, en general todo lo que contenga carbono se puede activar, la diferencia es su rendimiento o capacidad para absorber un contaminante específico, estos a su vez se caracterizan según el tamaño del poro convirtiéndolo ya sea en un adsorbente microporoso o macroporoso. Existen tres tamaños de poros, microporos diámetro menor a 2 nm, mesoporos diámetro entre 2 y 50 nm, macroporos diámetro mayor a 50nm.

Para el tratamiento de agua potable el carbón activado es producido a partir de la madera en forma granular o en polvo. Posee una estructura macroporosa por lo cual su superficie interna es muy grande (900 a 1100 m^2/gr), haciendo que el

² El carbón activado [en línea]

<http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm> [citado el 26 de mayo de 2009]

carbón tenga una adsorción ideal para que sea utilizado en la eliminación de moléculas grandes que suelen producir coloraciones en el agua.³

1.1.2 Ventajas y desventajas del uso del carbón activado en polvo

Tabla 1. Ventajas y desventajas del uso del carbón activado en polvo

Ventajas	Desventajas
Utilizar carbón activado en polvo ofrece una gran flexibilidad en proceso por qué se puede escoger la calidad y el tipo de absorbente, así como la dosis a emplear para remover determinado contaminante.	Un inconveniente que se presenta con el carbón activado en polvo es que la dosificación depende de la concentración en equilibrio del contaminante, es decir que depende de la isoterma de adsorción y del porcentaje de remoción que desea conseguir del contaminante.
La aplicación de carbón activado en polvo requiere instalaciones más simples, semejantes a los otros productos sólidos aplicados en la planta.	Se debe preservar la superficie activa del carbón, previniendo su revestimiento, sellamiento, por agentes químicos, especialmente por los coagulantes.

Fuente. Autores

Para las plantas de tratamiento de agua potable se utiliza el carbón activado en polvo porque su instalación es más simple, lo cual genera un menor costo en el proceso

³ El carbón activado en el tratamiento del agua [en línea].
http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_olores_y_sabores.htm [citado 26 de mayo de 2009]

1.2 Adsorción

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de la otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera un fenómeno subsuperficial. La sustancia que se concentra en la superficie se llama **adsorbato** y la fase adsorbente se llama **adsorbente**. Existen dos tipos de adsorción: adsorción física (fisoadsorción) que se basa en las fuerzas intermoleculares débiles (Van der Waals o electroestáticas), cuyos efectos son reversibles, y la adsorción química (químico adsorción) que se basa en las fuerzas de naturaleza covalente, cuyos efectos son casi irreversibles.⁴

La adsorción de materia orgánica con carbón activado en el agua cruda de la planta de tratamiento de Bosconia es una adsorción física debido a que los enlaces son débiles por que las fuerzas que predominan son las de Van der Waals, este tipo de adsorción prevalece generalmente a temperaturas bajas.⁵ La adsorción de solutos en soluciones, por carbón activado en polvo, parece ser el resultado del carácter hidrofóbico del soluto o de una gran afinidad del soluto por el carbón activado; en general se puede representar por el modelo de Freundlich que en realidad es la que casi siempre se ajusta bien en los sistemas líquidos, la cual relaciona matemáticamente la concentración residual en la solución con la adsorbida, a una temperatura y condiciones específicas:

$$q = \frac{X}{m} = KC^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

Donde: q = masa del contaminante adsorbida por unidad de masa de adsorbente.

⁴ DUDAMEL, Wilmer., LAPLANCHE, Alain., WOLBERT, Dominique., DE CAZEAUDMEC, Yolanda. La adsorción de micropoluentes orgánicos sobre carbón activo en el tratamiento del agua potable. [En línea] <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripa/ripa/pdfs/Capitulo_06.pdf>

⁵ Procesos de adsorción [en línea]. <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf> [citado el 26 de mayo de 2009]

X= cantidad de sustancia adsorbida, igual a la diferencia entre la concentración del afluente, C_0 , y la concentración del efluente, C.

$$X = C_0 - C$$

m = masa de carbón activado.

K= constante para cada soluto y temperatura.

C= concentración residual de soluto después de la adsorción.

n= constante para cada soluto y temperatura ($n > 1$).

La ecuación anterior se puede escribir de forma logarítmica (forma lineal) así:

$$\log q = \log \frac{X}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (2)$$

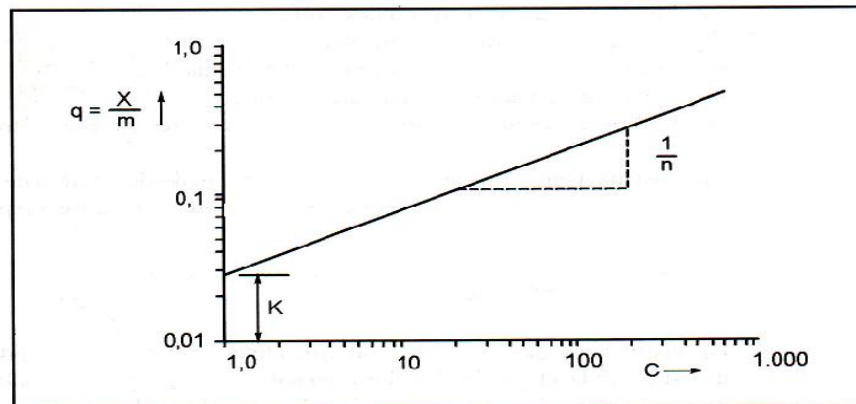


Figura 1 Trazado de la isoterma de adsorción.
Fuente: Purificación del agua

1.2.1 Variables que afectan la adsorción en sistemas líquidos

1. Características físicas y químicas del adsorbato (tamaño de molécula, composición molecular, polaridad molecular).

⁶ ROMERO ROJAS, Jairo Albero. PURIFICACION DEL AGUA. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2ª Edición, Bogotá, Colombia, 2006.

2. Características físicas y químicas del adsorbente (área superficial, tamaño de poro, composición química).
3. Concentración del adsorbato en fase líquida.
4. Características de la fase líquida (pH, temperatura).
5. Tiempo de residencia.⁷

1.3 Tipos de unidades de mezcla rápida mecánica

Existen dos tipos de unidades de mezcla mecánica: el retromezclador (es el más conocido) y el mezclador de línea mecánico.

1.3.1 Mezclador en línea mecánico: Este tipo de mezclador puede reemplazar a los grandes mezcladores y a los retro mezcladores, debido a que proporciona una agitación casi instantánea, mezclando o dispersando en un volumen muy pequeño y con un bajo consumo de energía.

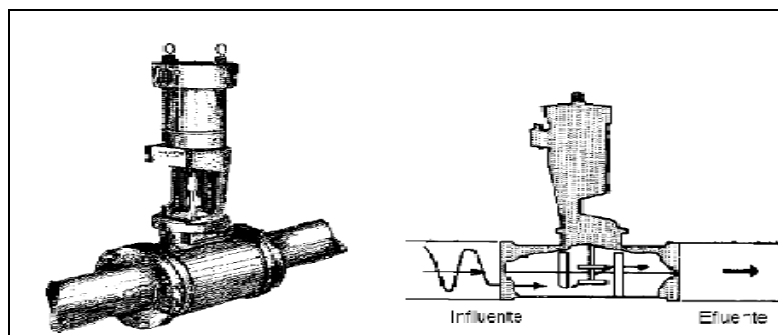


Figura 2. Mezclador en línea mecánico.
Fuente: Tratamiento de agua para consumo humano.

⁷GRANADOS CASTAÑO, Natalia Andrea. Determinación de la dosis más efectiva de carbón activado en polvo con sulfato de aluminio líquido para la potabilización de agua en la empresa aguas y aguas de Pereira. Pereira, 2007, 206h. Trabajo de grado (Tecnólogo químico). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Disponible en Tesis digitales en línea de la biblioteca de la Universidad Tecnológica de Pereira [En línea] < <http://biblioteca.utp.edu.co/tesisdigitales/texto/628162G748d.swf> >

1.3.2. Retromezclador⁸: Está compuesto de un tanque diseñado para un tiempo de retención determinado y un sistema de agitación.

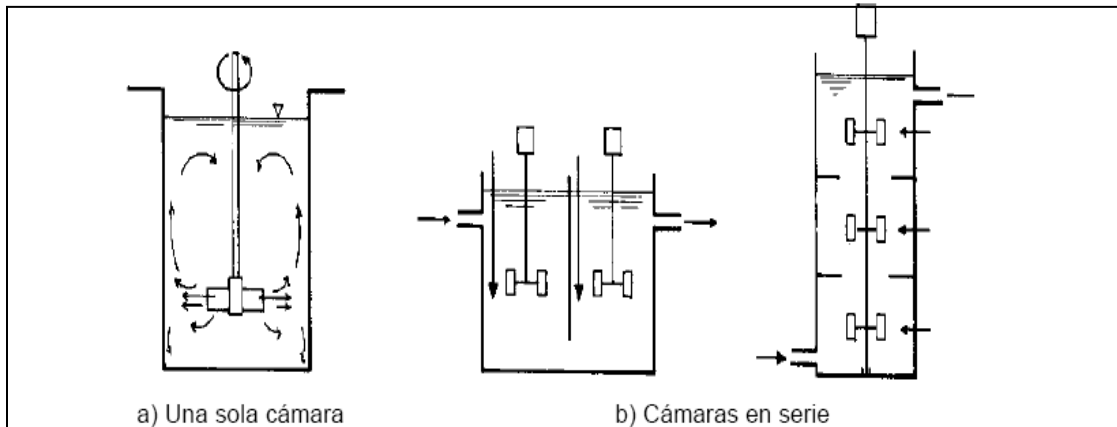


Figura 3. Tipos de retromezcladores en sistemas de agitación
Fuente: Purificación del agua

1.4 Trihalometanos⁹

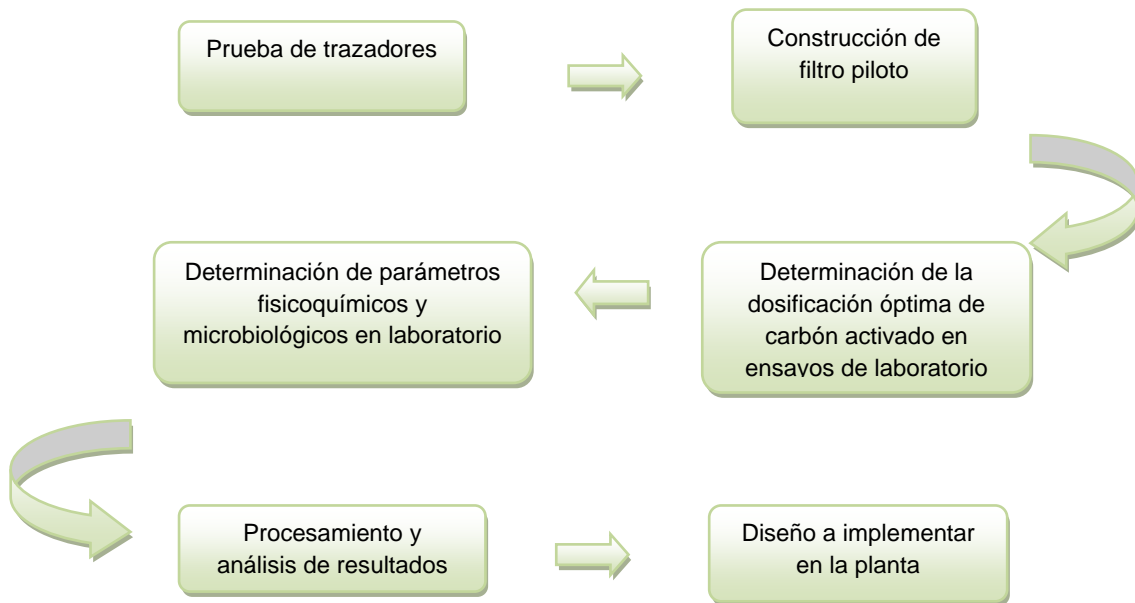
Los trihalometanos son compuestos químicos orgánicos encontrados en efluentes de planta de tratamiento donde la desinfección se realiza con cloro libre, el de mayor incidencia es el cloroformo, aunque se catalogan como trihalometanos totales (TTHM) al grupo de sustancias conformados por cloroformo (CHCl_3), diclorobromometano (CHCl_2Br), dibromoclorometano (CHBr_2Cl y bromoformo (CHBr_3)

En Colombia el ministerio de salud estableció según la resolución 2115 de 2007, como valor admisible en aguas para consumo de 0,2 mg/l de TTHM.

⁸ DE VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. En línea < <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/filtrarap.html>>

⁹ CAMARGO VALERO, Miller. y CRUZ TORRES, Luis E. Sustancias Húmicas en Aguas Para Abastecimiento. En: Revista de Ingeniería e Investigación. No. 44 (Dic., 1999); p 63 – 72.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL



Para la realización de este trabajo se definieron una serie de etapas las cuales se describen a continuación:

2.1 Prueba De Trazadores¹⁰

El objetivo de esta prueba fue determinar el tiempo de retención desde pretratamiento hasta la entrada a la planta. Mediante un conductímetro se midió cada minuto la conductividad de la solución ($\mu\text{s}/\text{cm}$) a la entrada (solo para el inicio de la prueba) y a la salida, utilizando cloruro de sodio (Naci) como trazador. Los datos obtenidos se registraron en una gráfica de conductividad vs tiempo y el tiempo de retención fue aquél en el que la conductividad a la salida era igual a la medida inicialmente a la entrada.

¹⁰ ACUÑA ZAMBRANO, Delsy Liliana. Modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectan el proceso de determinación de la dosis óptima de coagulantes en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. Bucaramanga, 2008, 116 h. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingeniería y administración.

El tiempo de retención medido se usó para simular en las pruebas de jarras el tiempo necesario de contacto entre el carbón y el agua cruda antes de la entrada a tratamiento.

2.2 Construcción de Filtro Piloto

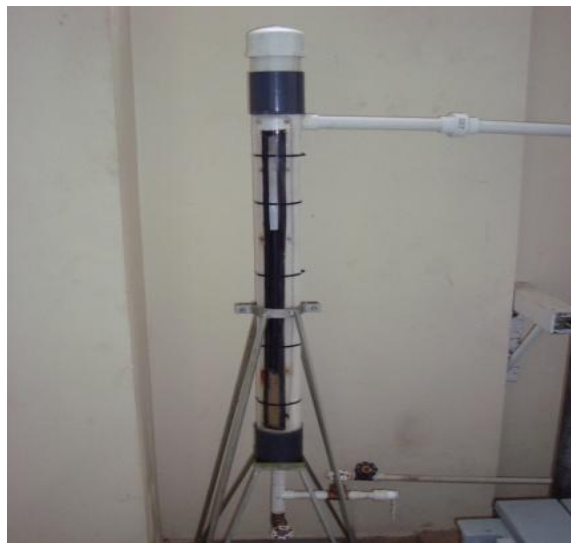


Figura 4. Filtro piloto planta Bosconia.
Fuente: Autores

Se construyó un filtro a escala piloto de los que se encuentran en la planta de Bosconia para simular la etapa de filtración. Para ello se utilizó un tubo PVC de 3 pulgadas de ancho por 1 metro de altura, malla de acero inoxidable, un visor y una tapa perforada de acrílico, además, se tuvo en cuenta la velocidad de filtración promedio así como las cantidades de antracita, arena torpedo y arena fina.

2.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos en el laboratorio.

El río Suratá tiene altas concentraciones de materia orgánica debido a sus afluentes, viéndose reflejado en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua que ingresa al tratamiento. Se recolectaron muestras de agua del río para analizar algunos de estos parámetros además de la relación entre ellos y la remoción del carbón activado en el pretratamiento. Los parámetros que se verificaron fueron color, turbiedad, concentraciones de mercurio, pH, alcalinidad, arsénico y tiempo de sedimentación; de acuerdo a los procedimientos descritos en la guía de laboratorio de la planta Bosconia.

Además de estos parámetros, se determinaron otros adicionales como los microbiológicos E-Coli y coliformes, y AUV 254 que se almacenaron en frascos ámbar para su posterior análisis en el laboratorio de control de calidad de la empresa.

2.4 Determinación de la dosificación óptima de carbón activado en ensayos de laboratorio

Se trazó la isoterma de Freundlich para encontrar la dosis óptima de carbón activado necesaria para la disminución de materia orgánica con la variación de color. Usando los resultados obtenidos en la prueba anterior, se realizaron las pruebas de jarras que permitirán establecer la dosis de sulfato de aluminio líquido que requiere cada tipo de agua.

Dependiendo de la turbiedad del agua cruda, las muestras se repartieron en cuatro intervalos, 0-30, 31-100, 101-1000, y mayores de 1000; posterior al ensayo, se tomaron muestras de agua cruda, sedimentada y filtrada. Se escogieron las

muestras de cada parte del proceso simulado en laboratorio, se almacenaron estas y se verificaron en ellas todos los parámetros enunciados en la etapa anterior.

2.5 Procesamiento y análisis de resultados

Basándose en los datos obtenidos en el laboratorio, se determinó la dosis de carbón óptima para cada tipo de intervalo y se analizó la viabilidad de la adición del adsorbente.

2.6 Diseño a implementar en Planta

Finalmente, se diseñó la unidad de dosificación, describiendo cada una de las especificaciones del mismo.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

3.1 Tiempo de retención

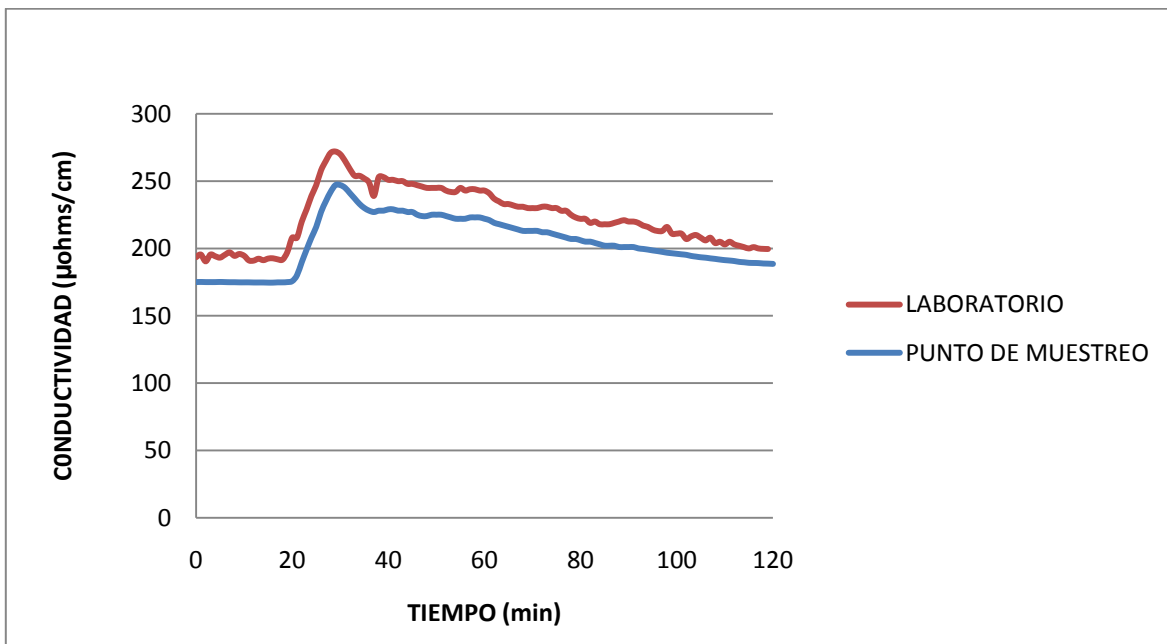


Figura 5 Conductividad vs tiempo
Fuente: Autores

Se estableció el tiempo de retención. Este es el tiempo de contacto entre el carbón activado y el agua cruda desde el punto de dosificación en el pretratamiento hasta la mezcla rápida, este el tiempo es aquel donde la conductividad alcanza su valor máximo, en la grafica se observa el punto de inflexión que comparten ambas curvas en el tiempo de 25 minutos luego de verter el trazador en la canaleta de pretratamiento,

3.2 Determinación de las variables medibles presentes en el agua

La medición y control de los parámetros se realizaron en diferentes equipos; el color en UPC se realizó con el espectrofotómetro HACH DR2800, la turbiedad en NTU con el equipo turbidímetro HACH 2100N, mercurio en mg Hg /l con el equipo Analizador BACHARACH 50D y finalmente, unidades de pH con el peachimetro METTLER TOLEDO.



Figura 6 Equipos para medición de algunas variables presentes en el agua
Fuente: Autores

A continuación se relacionan los resultados de la remoción de color, materia orgánica y mercurio en las diferentes etapas de la simulación del tratamiento en la prueba de jarras.

3.2.1 Medición de la remoción de color

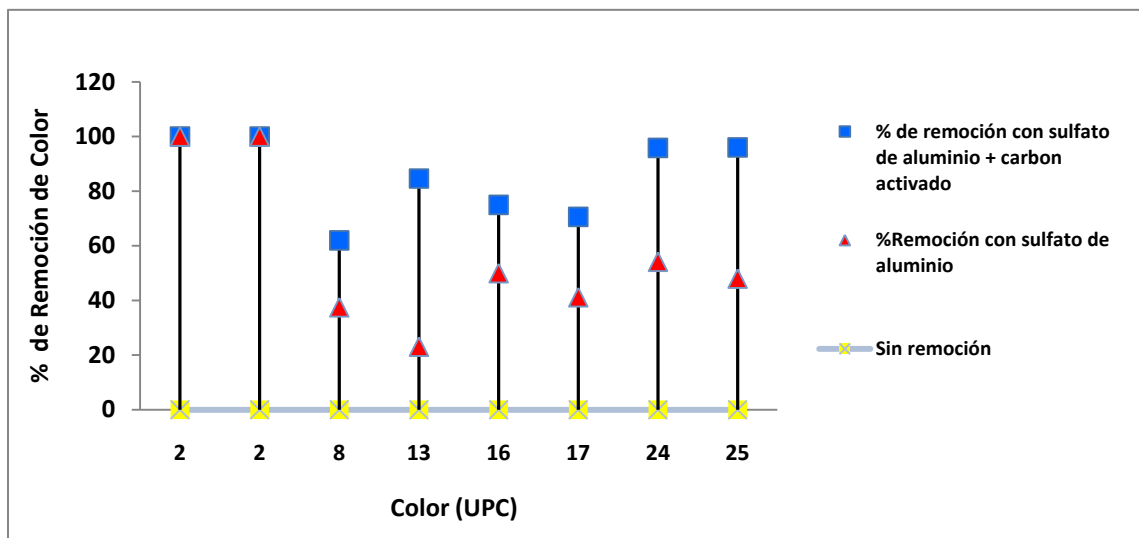


Figura 7 Porcentaje de remoción vs Color
Fuente: Autores

En la figura 7 se muestran los resultados de remoción de color para las muestras de agua cruda, cada una con diferente color y turbiedad. Para cada muestra se calculó el porcentaje de remoción de color utilizando sulfato de aluminio líquido y la mezcla de éste con carbón activado. Puede observarse que para los rangos de color y turbiedades estudiadas existe una diferencia más o menos constante entre los porcentajes de remoción calculados, correspondiente a entre un 18 y un 32%, con lo que se puede concluir que la mezcla de carbón activado y sulfato de aluminio es más eficiente que realizar la remoción solamente con el sulfato.

3.2.2 Medición de remoción de turbiedad

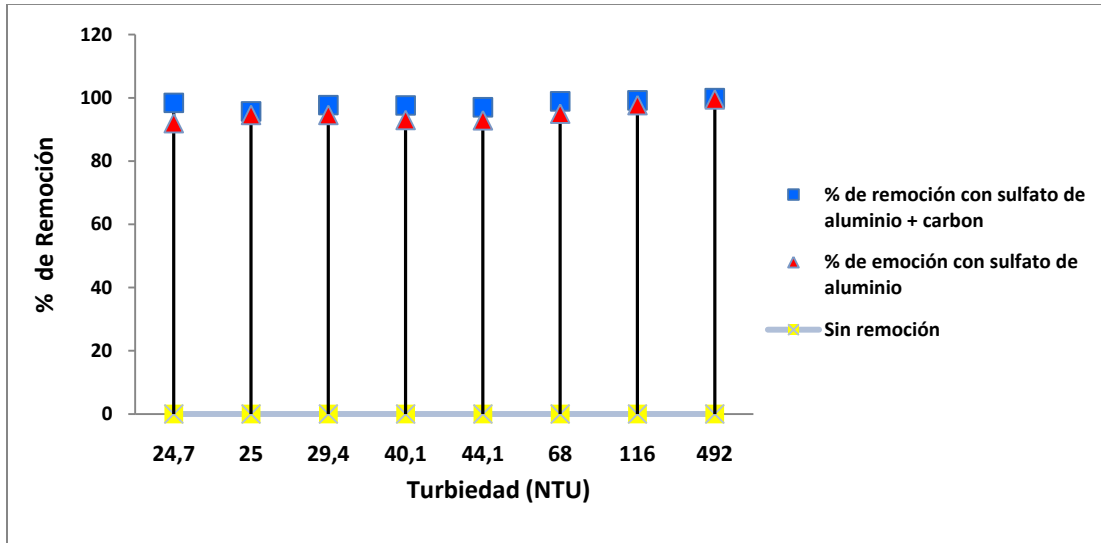


Figura 8 Porcentaje de remoción vs turbiedad
Fuente: Autores

En la anterior figura, se muestran los porcentajes de remoción calculados a partir de las turbiedades en el agua tanto al principio como al final del proceso, expresando esta diferencia entre ellas en porcentaje; se puede observar que se da un aumento en la remoción de turbiedad, alcanzando en algunos experimentos remociones del 99,99%, lo que demuestra la importancia de adicionar carbón activado en conjunto con el sulfato al proceso.

3.2.3 Porcentaje de remoción de mercurio

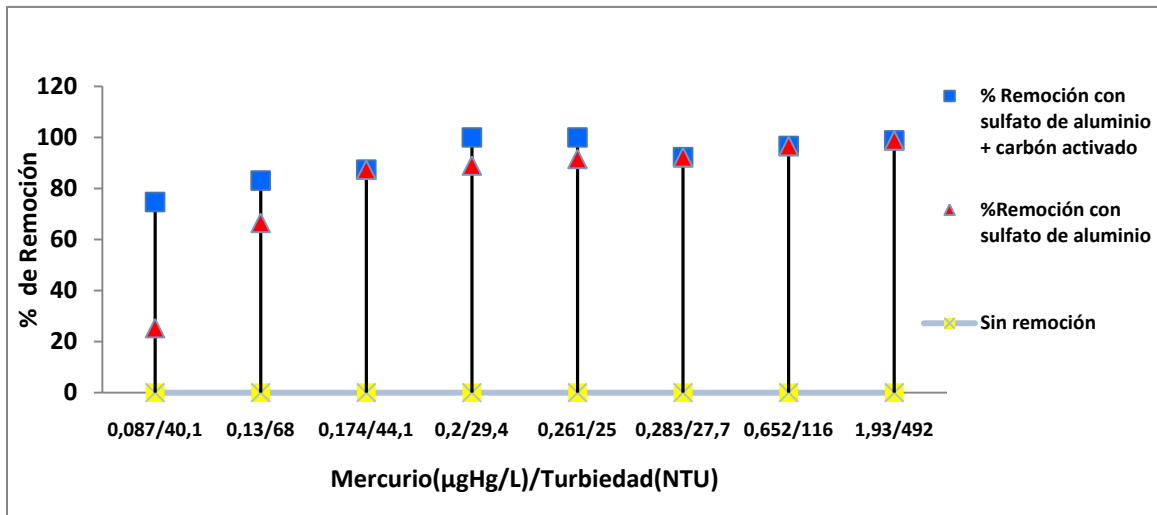


Figura 9 Porcentaje de remoción vs concentración de mercurio
Fuente: Autores

En la figura anterior se puede apreciar que para remover mercurio en el agua cruda de la planta de tratamiento de Bosconia, es más recomendable el uso de la coagulación mejorada con carbón, debido a que se obtienen porcentajes de remoción casi del 100%, esto disminuiría el uso de exceso en la dosis de coagulante que regularmente es usado para tal fin cuando la presencia del mercurio es muy alta en el agua de captación.

3.2.4 Verificación de materia orgánica en el agua usando la técnica AUV₂₅₄

Para observar cómo se comporta la remoción en los dos puntos más importantes del tratamiento en el laboratorio para las diferentes muestras, se usó un espectrómetro de luz a 254 nm y determinar con la absorbancia la cantidad de materia orgánica presente.

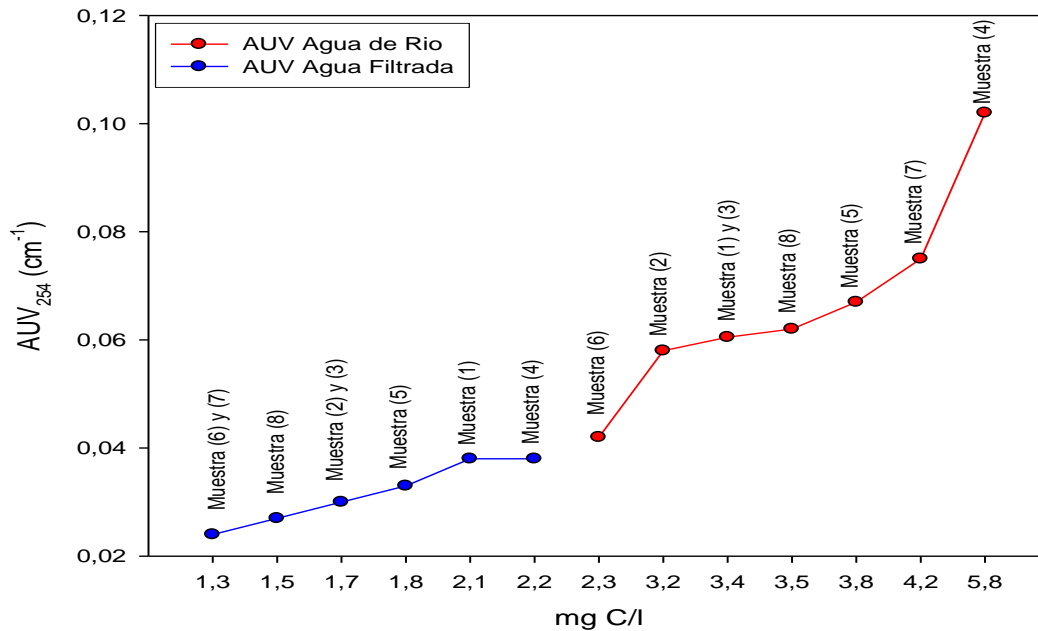


Figura 10 Absorbancia vs Carbón Orgánico Total
Fuente: Autores

Las remociones con el carbón activado, se ven reflejadas en la diferencia tan notable entre los dos puntos de tratamiento, la poca presencia de materia orgánica en la filtración se puede remover en la etapa posterior de cloración

3.3 Isoterma de Adsorción

Es de vital importancia conocer la dosis óptima para no realizar gastos excesivos de carbón activado, como el tratamiento se realiza a temperatura más o menos constante, se puede realizar una isoterma que nos relacione la cantidad de color con la dosificación del adsorbente necesaria para una remoción efectiva.

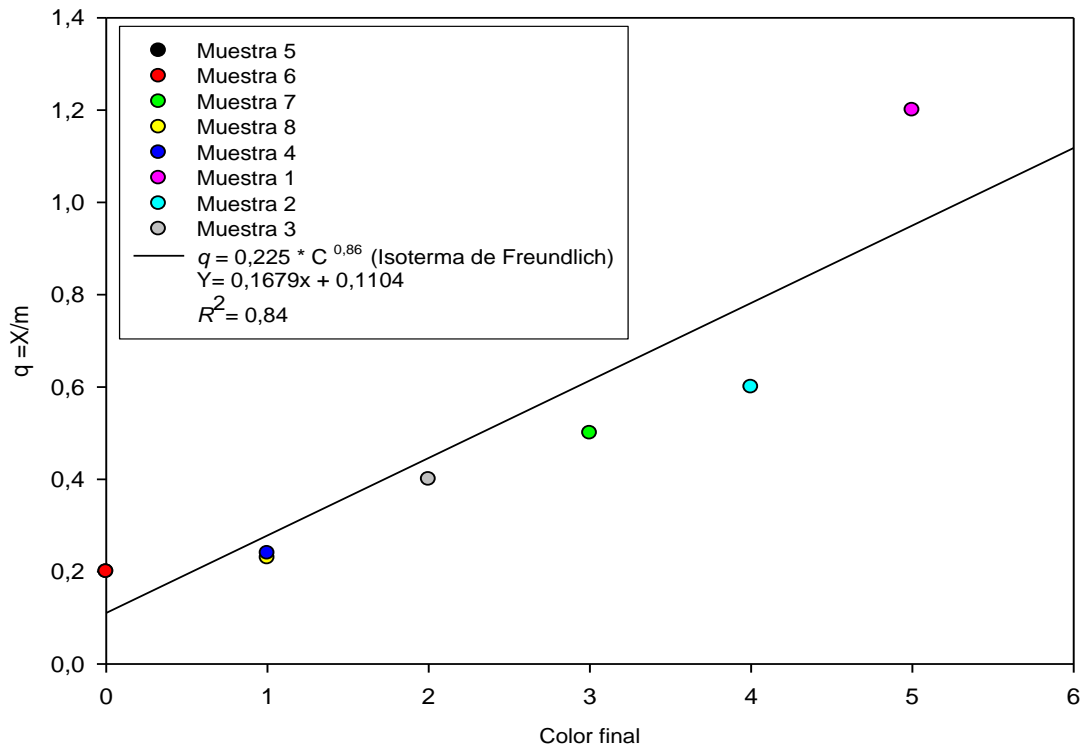


Figura 11 Isoterma de Freundlich para el carbón estudiado
Fuente: Autores

Se encontró que el pH presente en el agua cruda y en el agua tratada no se veía muy afectada por la adición de adsorbato al coagulante, por lo que se promedió, además, el factor de correlación es del 0,84 siendo considerable el hecho de que debido a que no se presentaron lluvias considerables en los seis meses de desarrollo del proyecto no se pudo conocer la relación de remoción para turbiedades más altas.

Además, se determinó una relación directa entre el porcentaje de remoción y la cantidad de carbón que debe ser suministrado dada por la ecuación de la recta de linealización.

3.4 Dimensiones del tanque de dosificación

Se realizó el diseño del tanque de dosificación teniendo en cuenta las ecuaciones para tal fin, éstas se encuentran en el anexo B

Volumen del tanque = 2m^3

$$V = \frac{\pi D^3}{4} = 2$$

$$D = 1,37 \text{ m}$$

Suponiendo:

$$\frac{H}{d} = 3; \quad \frac{h}{d} = 1; \quad \text{se tiene: } H = D \text{ y } h = d$$

Las demás dimensiones del tanque serían:

$$H = 1,37\text{m}; \quad d = 0,46\text{m}; \quad W = 0,092\text{m}; \quad r = 0,115\text{m}; \quad s = 0,343\text{m}; \quad h = 0,46\text{m}$$

Número de pantallas: cuatro, montadas verticalmente desde el fondo hasta la superficie, con un ancho de: $e = 0,137 \text{ m}$

Potencia requerida del agitador

$$P = 6,3 * 1000 * (1,67)^3 * (0,46)^5 = 604,34 \text{ w}$$

Régimen del fluido

$$N_{Re} = \frac{1000 * 1,67 * 0,46^2}{8,9 * 10^{-4}} = 397047,2$$

Gradiente de velocidad

$$G = \sqrt{\frac{604,034}{8,9 * 10^{-4} * 2}} = 582,7s^{-1}$$

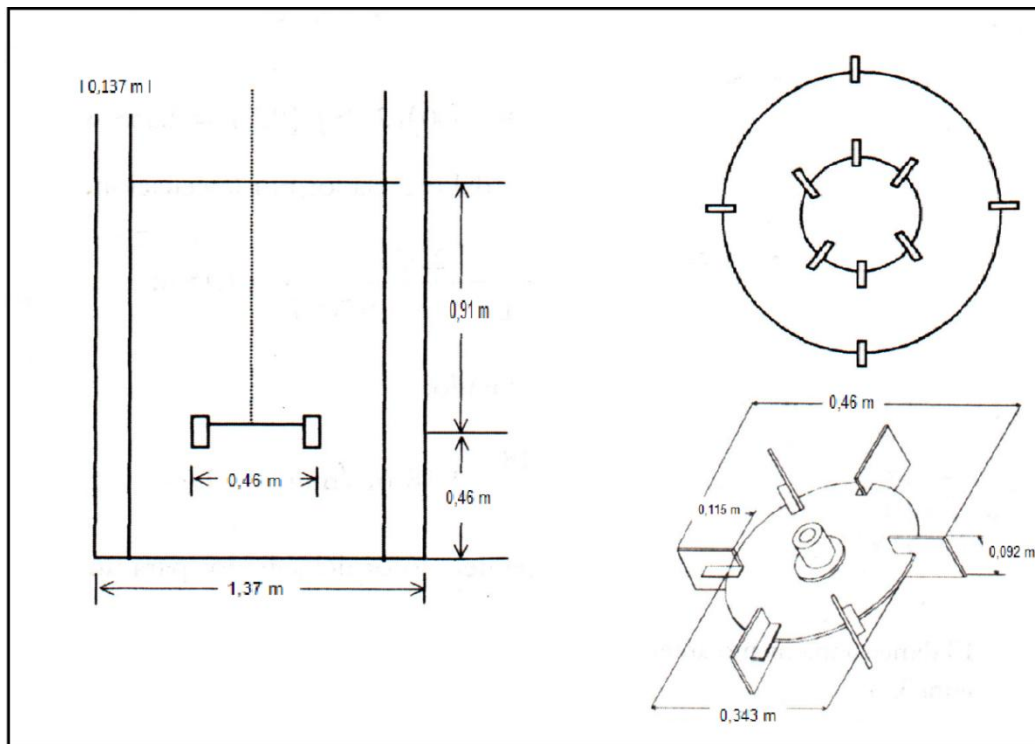


Figura 12. Dimensiones del tanque de dosificación

Fuente: Autores

3.4.1 Recomendaciones que se debe tener en cuenta para el diseño del dosificador:

- Desde el punto de vista de la corrosión, lo más indicado es construir el tanque en fibra de vidrio o en polietileno, y el agitador debe ser en acero inoxidable.

- Si se presenta vorticidades o remolino másico del fluido, se puede mejorar instalando el impulsor excéntricamente respecto al tanque, aproximadamente un 20% o 30% del radio.
- El carbón activado es un producto fino y difícil de mantener en suspensión. Por lo tanto se van a formar camas de sólidos en las aristas del fondo del tanque, es normal y será un volumen muerto del depósito. Se recomienda que en los puertos de purga y de descarga del tanque no queden cubiertos por depósitos de carbón.
- Para mejor efectividad del carbón activado en el tratamiento de agua, es deseable que el carbón sea pre humectado antes de ser adicionado al tanque de preparación de la suspensión.
- Se debe considerar que en los tramos de tubería horizontales el producto tiende a depositarse en la parte inferior de la tubería, una alta velocidad de flujo minimiza este efecto.
- Para la limpieza de la tubería se recomienda sustituir los codos horizontales por tees con taponés.
- En las paradas de la dosificación es adecuado no dejar la tubería llena con suspensión, sino con agua, esto es importante desde el punto de vista del tiempo de vida de la bomba debido a que si se deja sedimentos de carbón activado puede causar deterioro en las partes internas de la bomba.

3.5 Especificaciones de la bomba dosificadora para carbón activado

Generalmente, para la bomba dosificadora de suspensiones se utilizan estas características.

- Se debe usar una bomba dosificadora para un caudal máximo de 1000 l/s y mínimo de 650 l/s;
- Velocidad del reducto a 60 Hz de 373 rpm.

- Construcción robusta en acero inoxidable 316 y sello mecánico.
- Construcción motor Hierro fundido.
- Diseño compacto.
- Bajo valor de NPSH requerido.
- Incluido control de temperatura para protección del estator y motor.
- Óptima adaptación a diferentes productos y capacidades.
- Manejo de presiones de 0 hasta 12 bar.
- Caudal continuo proporcional a la velocidad.
- Precisión en el control de flujo.
- Fácil automatización.
- Alta resistencia a la abrasión, puede dosificar incluso medios viscosos con alta consistencia como polímeros y medios viscosos con ó sin sólidos hasta un 10 %.
- Sin pulsaciones.
- A través de un variador de frecuencia se consigue ajustar el caudal con una precisión del 1 %.

4 CONCLUSIONES

Mediante el proceso coagulación mejorada se determinó a nivel experimental la dosis óptima de carbón activado en polvo para la remoción de materia orgánica, color y mercurio al agua del río Suratá, fuente de abastecimiento de la planta Bosconia AMB S.A. E.S.P, lográndose porcentajes de remoción en intervalos de 25 a 35% mayores a los que se logran con el proceso actual que utiliza la planta.

Además, los valores de remoción obtenidos cumplieron o superaron los valores mínimos establecidos por la regulación colombiana y la empresa, para producir un agua apta para consumo humano y reducir costos de producción a niveles más competitivos.

Se realizó el diseño de un dosificador de carbón activado de acuerdo a las características de operación de la planta especificando todas las dimensiones correspondientes.

5. RECOMENDACIONES

Adicionar 0.4 ml (5 gotas) de hipoclorito al 5.25% al filtro piloto en la etapa de retrolavado, a fin de asegurar que la medición de la carga de microorganismos sea representativa de la muestra y no el resultado de la contenida en ésta más la que pueda haber quedado en el filtro como resultado de un muestreo anterior.

Medir la cantidad de trihalometanos después del proceso de cloración en la red de distribución para verificar la eficiencia de la remoción de la materia orgánica con la dosis y el tipo de carbón analizado.

Por otra parte, aunque se considera que con las pruebas de jarras se lograron resultados razonables de las dosis óptimas de sulfato de aluminio y de carbón activado, se recomienda el diseño e implementación de un dosificador a escala piloto que permita establecer las dosis óptimas in situ y contemplar de este modo todos los rangos de turbiedad posibles.

Como consideración final, este trabajo podría complementarse analizando la remoción de materia orgánica a partir de la metodología descrita y otros tipos de carbón activado, con el objeto de seleccionar el más adecuado a las características del proceso de potabilización del agua.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] ACUÑA ZAMBRANO, Delsy Liliana. Modelo de correlación entre las variables medibles en línea que afectan el proceso de determinación de la dosis optima de coagulantes en la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. Bucaramanga, 2008, 116 h. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingeniería y administración.

[2] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Edition. American Public Health Association, Washington, DC. (1998).

[3] ARRIAGADA, R. GARCIA, R. CID, R. Retención de Hg (II) y Cr (VI) en carbones activados de origen lignocelulósico. UNIVERSIDAD DE CONCEPCION. [en línea].

<http://www.icp.csic.es/cyted/Monografias/Monografias2001/B1-219.pdf> [citado en 25 de mayo de 2009]

[4] CAMARGO VALERO, Miller. y CRUZ TORRES, Luis E. Remoción de Sustancias Húmicas por Coagulación con Alumbre. En: Revista de Ingeniería e Investigación. No. 44 (Dic., 1999); p 63 – 79.

[5] DE VARGAS, Lidia. Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. [En línea]

<http://www.cepis.opsoms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomol/filtrarap.html>
[citado en 25 de mayo de 2009]

[6] DUDAMEL, Wilmer., LAPLANCHE, Alain., WOLBERT, Dominique., y DE CAZEAUDMEC, Yolanda. La adsorción de micropoluentes orgánicos sobre carbón activo en el tratamiento de agua potable. [en línea]. http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_06.pdf. [[citado en 26 de mayo de 2009]

[7] El carbón activado [en línea].
<http://www.oviedo.es/personales/carbon/cactivo/impqcatex.htm> [citado en 26 mayo de 2009]

[8] El carbón activo en el tratamiento del agua [en línea].
http://potablewater.iespana.es/tratamiento_de_olores_y_sabores.htm [citado en 26 de mayo de 2009]

[9] ESCOBAR, H., GONZÁLES, S. y CAMARGO, M. Control de subproductos de desinfección en sistemas de abastecimiento de dos municipios colombianos. En: Revista de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. No. 213 (Mayo, 2006); p 13-19.

[10] GLIBOTA, G. Absorción de arsénico en filtros de carbón activado comerciales análisis y comparación de resultados. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE. [en línea] <http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2005/7-Tecnologia/T-092.pdf> [citado 26 de mayo de 2009]

[11] GRANADOS CASTAÑO, Natalia Andrea. Determinación de la dosis más efectiva de carbón activado en polvo con sulfato de aluminio líquido para la potabilización de agua en la empresa aguas y aguas de Pereira. Pereira, 2007, 206h. Trabajo de grado (Tecnólogo químico). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Disponible en Tesis digitales en línea de la biblioteca de la Universidad Tecnológica de Pereira.
<http://biblioteca.utp.edu.co/tesisdigitales/texto/628162G748d.swf>>

[12] Procesos de adsorción [en línea].

<http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf> [citado en 26 de mayo de 2009]

[13] RAMIREZ, José M. y ACUÑA, Dora. Aplicación y uso del carbón activado en polvo o granular para el tratamiento de aguas superficiales afectadas por contaminación Antropogénica. En: Revista Evolución. Vol. 2, No 2. (2004).

[14] ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2ª Edición, Bogotá, Colombia, 2006.

[15] ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuíquímica. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1ª Edición. Bogotá, 1996.

[16] SIMMOW, V.F. y TARDIF, R. G. “The mutagenic activity of halogenated compounds found in chlorinated drinking water”. Water Chlorination: Environmental Impact and Health effects. Vol. 2. 1978. p 417-432.

7. ANEXOS

Anexo A. Generalidades de los filtros de arena-antracita

El primer filtro de arena se inventó en Escocia en 1804. En 1829 la compañía del río 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 la filtración. Aunque la coagulación y la sedimentación remueven cerca del 90% de la turbiedad y el color, una cierta cantidad de floc pasa al tanque de sedimentación y se necesita su remoción. Por ello, para lograra la clarificación final se usa filtración a través de medios porosos que por lo general son arena o arena y antracita.

En la planta de purificación la filtración remueve el material suspendido, medido en la práctica como turbiedad, compuesto de floc, suelo, metales oxidados y microorganismos.

La remoción de microorganismos es de gran importancia puesto que muchos de ellos son extremadamente resistentes a la desinfección, y sin embargo, son removibles mediante filtración. Lo anterior indica por qué en la práctica se considera que el propósito principal de la filtración es remover turbiedad e impedir la interferencia de la turbiedad con la desinfección, al proteger a los microorganismos de la acción del desinfectante.

El filtro rápido por gravedad es el tipo de filtro más utilizado en tratamiento de aguas. La operación de filtración supone dos etapas: filtración y lavado.

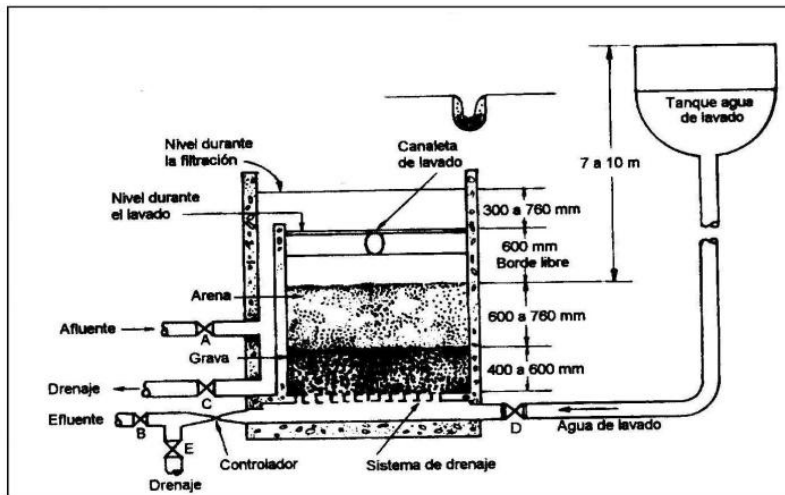


Figura 13. Esquema indicativo de la operación de un filtro rápido de arena
Fuente: Purificación del agua

En un filtro rápido convencional, el final de la etapa de filtración o carrera de filtro se alcanza cuando los sólidos suspendidos (turbiedad) en el efluente comienzan a aumentar; cuando la pérdida de carga es tan alta que el filtro ya no produce agua a la tasa deseada, o cuando la carrera de filtro es de 36 horas o más. Por lo general, 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 utilizan generalmente un solo medio (arena o antracita), un medio dual (arena y antracita) o un lecho mezclado (arena, antracita y granate o ilmenita). En la figura 13 se pueden comparar los tres tipos de medios filtrantes usados comúnmente en tratamientos de aguas.

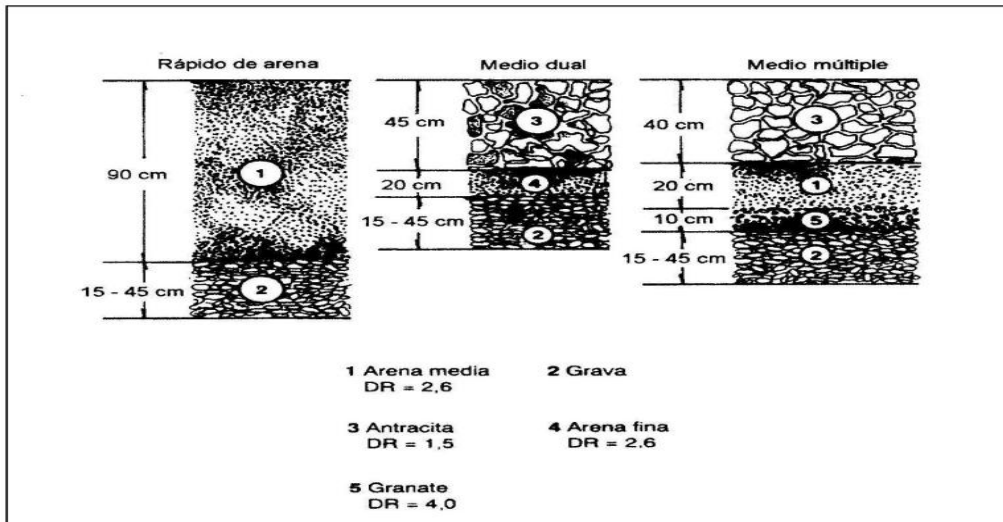


Figura 14 Medios de filtración
Fuente: Purificación del agua

Muchas son las ecuaciones para determinar la pérdida de carga en un filtro limpio. Entre las más conocidas están las de Carmen Kozeny, Fair y Hatch, Rose y Hazen. El flujo de agua de un filtro, a las tasas empleadas en tratamiento de agua, obedece a la ley de Darcy

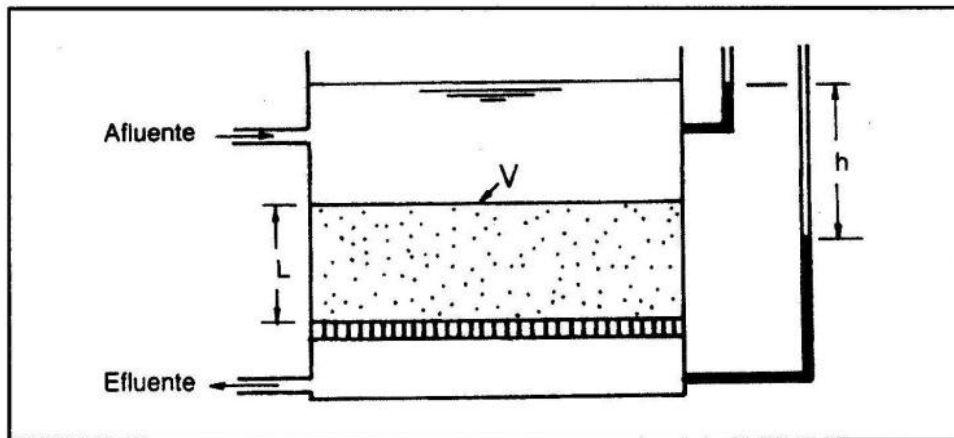


Figura 15 Esquema de flujo en un filtro
Fuente: Purificación del agua

$$v = \frac{k * h}{L} \quad (3)$$

Donde: h = pérdida de carga en el lecho, m
L = profundidad del lecho, m
v = velocidad superficial, m/s
k = coeficiente de permeabilidad, m/s

Por tanto, la tasa de filtración es directamente proporcional a la cabeza o energía disponible de filtración y a la permeabilidad del lecho, e inversamente proporcional al espesor del medio. Mediante análisis dimensional e investigación experimental, Rose estableció una ecuación que permite determinar analíticamente la pérdida de carga por fricción a través de lechos de material granular, granos de arena esféricos de tamaño uniforme, la cual tiene aplicación en el cálculo de pérdida de energía a través de un filtro limpio. La ecuación de Rose es la siguiente:

$$h = 1,067 C_D \frac{1}{e^4} \frac{L v^2}{d g} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{24}{N_{RE}} + \frac{3}{\sqrt{N_{RE}}} + 0,34 \quad (5)$$

$$N_{RE} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (6)$$

Donde: h = pérdida de carga a través del lecho m
 C_D = coeficiente de arrastre
e = porosidad del lecho (volumen de vacios/volumen lecho)
L = profundidad del lecho, m
 ρ = densidad del agua, kg/m³
d = diámetro característico de granos, m
v = velocidad de filtración, m/s
g = aceleración de la gravedad, m/s²
 N_{RE} = número de Reynolds
 μ = viscosidad dinámica, Pa · s

ANEXO B Consideraciones y ecuaciones de diseño

Relaciones en las dimensiones para mezclador rápido

Para un tanque de mezcla rápida de forma cilíndrica y de fondo plano, las dimensiones recomendadas por Richter son:

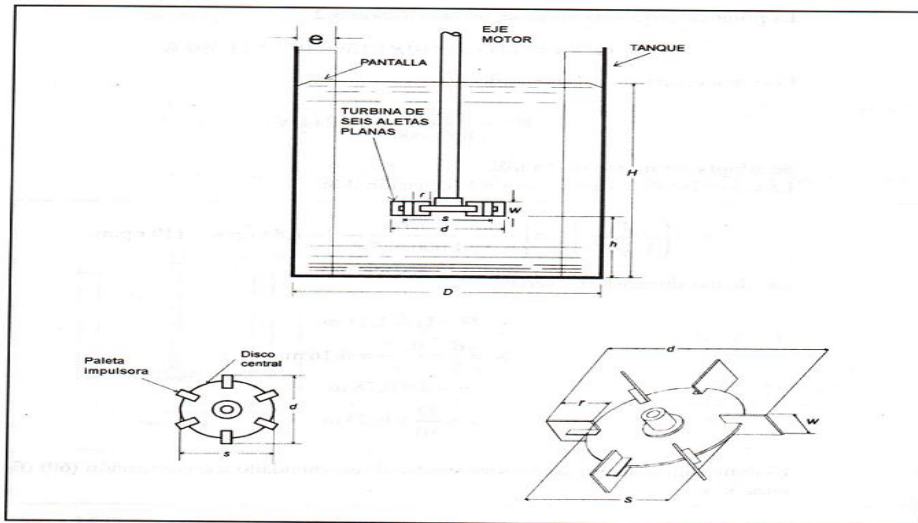


Figura 16 Dimensiones para mezclador rápido de seis paletas planas
Fuente: Purificación del agua.

$$\frac{D}{d} = 3 \quad (7)$$

$$\frac{e}{D} = \frac{1}{10} \quad (8)$$

$$2,7 \leq H/d \leq 3,9 \quad (9)$$

$$0,75 \leq h/d \leq 1,3 \quad (10)$$

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{4} \quad (11)$$

$$\frac{W}{d} = \frac{1}{5} \quad (12)$$

$$\frac{s}{D} = \frac{1}{4} \quad (13)$$

Donde:

d = diámetro del impulsor
h = altura del impulsor sobre el fondo del tanque
W = ancho de la paleta del impulsor
r = longitud de la paleta del impulsor
H = altura del fluido
e = ancho de las pantallas
D= diámetro del tanque de fondo plano
s = diámetro del disco central

Según Rushton, la potencia requerida para establecer condiciones de turbulencia en un tanque de mezcla rápida, $N_{RE} > 100.000$, se determina por la siguiente ecuación.

$$P = K * \rho * N^3 d^5 \quad (14)$$

K= constante
 ρ = densidad del agua, Kg / m³
d= diámetro del impulsor, m
N= velocidad del impulsor, revoluciones / s.

El valor de K, es tomado de la literatura de acuerdo a las siguientes características del tanque:

- Régimen turbulento
- Eje de rotación en el centro
- Tanque de forma cilíndrica de fondo plano y con baffles en sus paredes
- Profundidad de líquido igual al diámetro del tanque
- Elevación del impulsor sobre el fondo del tanque igual al diámetro del impulsor
- El ancho del baffle es igual a 1/10 del diámetro del tanque
- El diámetro del impulsor es igual a 1/3 del diámetro del tanque
- Impulsor de tipo turbina, de seis aletas planas

El valor de N, según la literatura la velocidad del impulsor se puede trabajar en un rango de 2- 150 rpm, para nuestro trabajo de grado tomamos como referencia la mezcla rápida del sulfato de aluminio sólido con el que trabaja la planta que es de 100 rpm.

$$N_{Re} = \frac{\rho N d^2}{\mu} \quad (14)$$

d= diámetro del impulsor, m
 N= revoluciones / s
 ρ = densidad del líquido, Kg / m³
 μ = viscosidad dinámica Pa.s

El modelo básico de diseño de Camp y Stein, es el criterio más usado en la práctica para calcular el gradiente de velocidad, de acuerdo a la ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (15)$$

G = gradiente de velocidad, s-1
 P= potencia introducida al agua, w
 μ = viscosidad dinámica del agua, Pa .s
 V= volumen del tanque, m³

Para optimizar la mezcla rápida se puede usar la expresión:


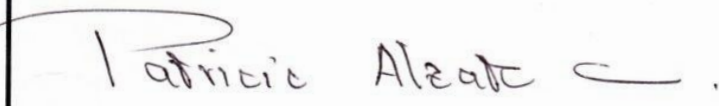

$$G t_0 C^{1,46} = 5,9 * 10^6 \quad (16)$$

G = gradiente de velocidad, s-1
 t₀ = tiempo óptimo de mezcla rápida, s
 C= dosis de carbón activado, mg/l

Anexo C **Ficha técnica del carbón utilizado en el laboratorio**

En la siguiente tabla, se muestran las características más relevantes del carbón estudiado

Tabla 2. Ficha técnica del carbón activado sin dispersión referencia SDA

 SISTEMA DE GESTION DE CALIDAD		
CERTIFICADO DE CALIDAD		
Cliente	ACUEDUCTO METROPOLITANO BUCARAMANGA	
Tipo de Producto	CARBÓN ACTIVADO SIN DISPERSIÓN REFERENCIA SDA	
Fecha de despacho	ABRIL 8 DE 2008	
Fecha de fabricacion	ABRIL 7 DE 2008	
Certificado	80408	
Parámetros	Metodo de Analisis	Resultado de Laboratorio
Número de Yodo (mg I ₂ / g CA)	AWWA B 600-05	803
Humedad (%)	AWWA B 600-05	30.2%
Contenido de Cenizas (%)	ASTM D 2866-94	2.80
Granulometria	AWWA B 600-05	
Malla 100 US Estándar		94.5%
Malla 200 US Estándar		84.3%
Malla 325 US Estándar		79.1%
¹ Estos valores pueden ser modificados de acuerdo con el comprador		
		 CERTIFICADO ISO 9001 Certificado N° SC 162-1
Control de calidad.		

F SEG 8.2.4 - 120 /Versión 3/ 23/08/07

Fuente: Sulfoquímica S.A.

ANEXO D. Resultados fisicoquímicos

Tabla 3. Resultados fisicoquímicos de la muestra 1.

Muestra: 1							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
Agua de Río	40,1	17	7,9	53,8	0,087	0,1	12
Agua Tratada con 50 ppm de Sulfato	2,787	10	7,07	40,2	0,065	N	
Con Carbón Activado + sulfato 50ppm)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
5 ppm	1,2	5	7,03	41,4	0,022	N	
15 ppm	1,98	5	6,94	42,2	0,022	N	
25 ppm	1,38	6	7,06	41,6	0,022	N	
35 ppm	0,946	3	6,97	42,2	0,022	N	
45 ppm	1,32	4	7,11	42,2	0,087	N	
55ppm	1,99	3	7,15	44,2	0,022	N	
Agua filtrada	0,926	5	7,16	43,48	0,022	N	0

Tabla 4. Resultados fisicoquímicos de la muestra 2

Muestra: 2							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
Agua de Río	68	16	6,83	56,4	0,13	0,1	5,1
Agua Tratada con 50 ppm de Sulfato	2,962	8	7,05	50,2	0,0435	N	F.R
Con Carbón Activado + sulfato 50ppm)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
3 ppm	2,35	6	7,05	50,2	0	N	
5 ppm	2,12	7	7,2	50,4	0	N	
10ppm	1,14	4	7,15	50	0,022	N	
15 ppm	2,01	7	7,08	49,6	0,022	N	
20 ppm	2,61	7	7,16	50	0,022	N	
25ppm	1,663	6	7,07	51,4	0,022	N	
Agua filtrada	1,03	4	7,02	50,4	0,022	N	5,6

Tabla 5. Resultados fisicoquímicos de la muestra 3

Muestra: 3							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
Agua de Rio	44,1	13	7,26	58	0,174	0,1	2,4
Agua Tratada con 30 ppm de Sulfato	3,09	10	7,31	53,8	0,022	N	3,1
Con Carbón Activado + sulfato 30ppm)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
5 ppm	2,79	8	7,27	54	0,022	N	
8 ppm	2,97	9	7,24	53,6	0	N	
11 ppm	3,85	10	7,24	53,6	0,022	N	
14 ppm	2,65	7	7,4	53,4	0,022	N	11,3
17ppm	3	9	7,4	53,8	0,022	N	
20ppm	3,03	8	7,22	53,8	0,022	N	
Agua filtrada	2,79	8	7,27	54	0,022	N	3,4

Tabla 6. Resultados fisicoquímicos de la muestra 4

Muestra: 4							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
Agua de Rio	492	24	7,88	46	1,93	1	2,3
Agua Tratada con 80 ppm de Sulfato	2,47	11	6,82	28	0,022	N	1,8
Con Carbón Activado + sulfato 80ppm)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
40 ppm	0,202	6	6,83	28	0,087	N	
50 ppm	0,134	4	6,82	28	0,065	N	1,8
60 ppm	0,148	6	6,76	28	0,087	N	
70ppm	0,129	6	6,74	28	0,043	N	
80ppm	0,152	6	6,78	30	0,065	N	
90ppm	0,194	5	6,83	32	0,022	N	
Agua filtrada	0,042	1	7,1	32	0,022	N	1,9

Tabla 7. Resultados fisicoquímicos de la muestra 5

Muestra: 5							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
Agua de Rio	27,7	2	7,18	52	0,283	0	8,3
Agua Tratada con 30 ppm de Sulfato	1,73	0	7,21	46	0,022	N	F.R
Con Carbón Activado + sulfato 30ppm)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
3 ppm	6,19	0	7,21	46	0,043	N	
4 ppm	4,21	0	7,21	46	0,022	N	
5 ppm	2,51	0	7,25	46	0,043	N	1,4
6 ppm	2,53	0	7,15	46	0,043	N	
7 ppm	2,51	0	7,18	46	0,022	N	
8 ppm	2,21	0	7,06	48	0,022	N	
Agua filtrada	1,19	0	7,23	42	0,022	N	3,8

Tabla 8. Resultados fisicoquímicos de la muestra 6

Muestra: 6							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
Agua de Rio	29,4	2	8,01	56	0,2	0	
Agua Tratada con 35 ppm de Sulfato	1,58	0	7,13	50	0,022	N	
Con Carbón Activado + sulfato 35ppm)	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ / L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C /L)
5 ppm	0,767	0	7,15	48	0	N	0
10 ppm	0,544	0	7,17	50	0,022	N	
15 ppm	0,569	0	7,19	48	0,022	N	
20 ppm	0,612	0	7,22	50	0,043	N	
25 ppm	0,498	0	7,17	48	0,022	N	
30 ppm	0,525	0	7,18	50	0,043	N	
Agua filtrada	0,664	0	7,25	46	0	N	0,6

Tabla 9. Resultados fisicoquímicos de la muestra 7

Muestra: 7							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C/L)
Agua de Rio	25	8	7,96	56	0,261	0	3,6
Agua Tratada con 30 ppm de Sulfato	2	5	7,25	50	0,022	N	2
Con Carbón Activado + sulfato 30ppm	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C/L)
5 ppm	1,18	3	7,4	50	0	N	0
10 ppm	1,14	4	7,25	48	0,022	N	
15 ppm	1,74	5	7,39	50	0,022	N	
20 ppm	1,41	5	7,41	48	0	N	
25 ppm	0,967	4	7,31	50	0,022	N	
30 ppm	1,14	5	7,28	46	0,043	N	
Agua filtrada	0,377	3	7,3	46	0	N	F.R

Tabla 10. Resultados fisicoquímicos de la muestra 8

Muestra: 8							
Muestra	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C/L)
Agua de Rio	116	25	7,6	56	0,652	0,9	2,5
Agua Tratada con 80 ppm de Sulfato	2,66	13	7,03	2,4	0,022	N	8,8
Con Carbón Activado + sulfato 80ppm	Turbiedad (NTU)	Color (UPC)	pH	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Mercurio (µg Hg/l)	Sólidos sedimentables (ml sólidos sedimentables/L de muestra)	COT (mg C/L)
50 ppm	1,04	4	7,05	46	0,022	N	0
60 ppm	1	5	7,06	48	0	N	
70 ppm	0,986	6	7,11	48	0,022	N	
80 ppm	0,925	4	7,12	48	0,022	N	
90 ppm	1,14	6	7,14	50	0,022	N	
100 ppm	0,991	4	7,12	48	0,043	N	
Agua filtrada	0,925	1	7,18	46	0,022	N	0

Tabla 11. Resultados de la AUV₂₅₄

FECHA	AGUA DE RIO DOC (mg C/ L)	AGUA FILTRADA DOC (mg C/ L)	AUV ₂₅₄ (cm ⁻¹)
Muestra 1	3,4		0,061
		2,1	0,038
Muestra 2	3,2		0,058
		1,7	0,03
Muestra 3	3,4		0,06
		1,7	0,03
Muestra 4	5,8		0,102
		2,2	0,038
Muestra 5	3,8		0,067
		1,8	0,033
Muestra 6	2,3		0,042
		1,3	0,024
Muestra 7	4,2		0,075
		1,3	0,024
Muestra 8	3,5		0,062
		1,5	0,027

ANEXO E Generalidades de trihalometanos

Las lluvias arrastran material del suelo incorporando así sustancia húmicas (SH) a las fuentes de aguas naturales bien sea en forma soluble o particulada, en una cantidad tal que los convierte en los componentes mayoritarios de la materia orgánica natural. Del carbono orgánico natural (CON) en aguas solo el 10 por ciento como máximo corresponde al carbono orgánico particulado que puede incluir algas, zooplancton, y humina entre otros. Para el carbono orgánico disuelto (COD) se ha establecido que en promedio cerca del 45% de este corresponde a ácidos húmicos y fúlvicos; aunque en aguas con alto contenido de color puede alcanzar el 90% del COD.

Los SH son los causantes de impartir color a las aguas naturales, ya que solo 4 mg/l de ácidos húmicos generan 100 UPC de color, desmejorando únicamente la estética del agua, pues no se ha encontrado que estas sustancias causen directamente un efecto nocivo sobre la salud.

El grave riesgo de encontrar SH radica en que si no se reduce su concentración eficientemente en la etapa de tratamiento previas a la desinfección con cloro, se promueve la generación de compuestos orgánicos halogenados los cuales se han clasificado en:

- Compuestos orgánicos halogenados volátiles: La mayor cantidad de este grupo corresponde a los trihalometanos, que representan entre el 5 y el 20% del total de los compuestos halogenados generados en la desinfección con cloro.
- Compuestos orgánicos halogenados no volátiles: Este grupo representa entre el 17 y 25% del total, la mayor cantidad de este grupo corresponde a los ácidos haloacéticos (HAA). También comprende a los haloacetoneitrilos y haloacetonas.

La presencia de sustancias orgánicas halogenadas en agua para consumo atentan contra la salud de la población servida, pues existe un riesgo potencial al consumirlas en la medida que existen evidencias epidemiológicas, las cuales indican que la incidencia de ciertos cánceres pueden ser asociadas al consumo de aguas cloradas.

La formación de THM es dependiente de la concentración de cloro libre, contenido de materia orgánica soluble aportado principalmente por SH, relación cloro libre/COT, pH, tiempo de contacto, temperatura y concentración de bromo presente en el agua cruda.