

**ESTUDIO DE LOS LODOS GENERADOS POR LAS UNIDADES DE  
SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA POTABLE EL TABLAZO EN LA CIUDAD DE POPAYÁN.**

**EDSON DANIEL PABON SALAZAR  
JESSICA INDIRA RODRIGUÉZ TORRES**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN-CAUCA  
2015**

**ESTUDIO DE LOS LODOS GENERADOS POR LAS UNIDADES DE  
SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA POTABLE EL TABLAZO EN LA CIUDAD DE POPAYÁN.**

**EDSON DANIEL PABON SALAZAR  
JESSICA INDIRA RODRIGUÉZ TORRES**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**Director  
JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ MERA  
Ingeniero Sanitario, Ph.D.**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN-CAUCA  
2015**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Popayán 27 de Abril del 2015

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
2. JUSTIFICACIÓN .....	11
3. OBJETIVOS .....	12
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	12
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
4. MARCO TEÓRICO.....	13
4.1. GENERALIDADES DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA (PTAPs) .....	13
4.2. EFECTOS DE LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS EN FUENTES HÍDRICAS. ....	13
4.3. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DE LODOS EN PTAP's. ....	14
5. METODOLOGÍA.....	16
5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PTAP EL TABLAZO.....	16
5.1.1. Estructuras de Sedimentación.....	16
5.1.2. Estructuras de Filtración.....	17
5.2. METODOLOGÍA PARA PRIMER OBJETIVO.....	17
5.2.1. Puntos de Muestreo. ....	17
5.2.2. Determinación de caudales (Q).....	17
5.2.3. Determinación de la cantidad de lodos evacuados. ....	18
5.3. METODOLOGÍA PARA SEGUNDO OBJETIVO.....	19
5.3.1. Consideraciones Iniciales.....	19
5.3.2. Sedimentabilidad.....	20
5.3.3. Producción de Volumen de Sedimento .....	20
5.3.4. Ensayo para estimación de Tamaño de Partícula. ....	20
5.3.5. Determinación del contenido de humedad en los lodos. ....	21
5.3.6. Determinación de Sólidos Totales Volátiles (SV). ....	21
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS DATOS .....	22

6.1.	CAUDALES GENERADOS DURANTE EL LAVADO.....	22
6.2.	CANTIDAD DE LODO GENERADA DURANTE EL LAVADO .....	25
6.3.	CARACTERIZACIÓN DEL LODO.....	30
6.3.1.	Sedimentabilidad.....	30
6.3.2.	Producción de Volumen de Sedimento .....	31
6.3.3.	Ensayo para Estimación de Tamaño de Partícula.....	33
6.3.4.	Determinación del contenido de humedad en los lodos .....	34
6.3.5.	Determinación de Sólidos Totales Volátiles (STV) .....	34
7.	CONCLUSIONES.....	36
8.	RECOMENDACIONES .....	37
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	38
	ANEXOS .....	42
	ANEXO A. Datos de campo y determinación de Caudal y Volumen de Muestra...42	
	ANEXO B. Calculo de sólidos suspendidos .....	47
	ANEXO C. Metodología Curva de Sedimentabilidad y Eficiencia del Proceso .....	49
	ANEXO D. Contenido de Humedad .....	52
	ANEXO E. Determinación de Sólidos Totales Volátiles .....	53

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de flujos generados por las unidades de filtración y sedimentación.....	24
Tabla 2. Cantidad de ST y SS generada en un lavado de Sedimentador y Filtro ..	28
Tabla 3. Generación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Suspendidos (SS) por mes. ....	29
Tabla 4. Remoción total para diferentes cargas superficiales.....	31
Tabla 5. Cantidad de lodo retenido para diferentes tamaños de poro. ....	33
Tabla 6. Contenido de humedad de lodos en las unidades de Filtración y Sedimentación .....	34
Tabla 7. Cantidad de STV generada en un lavado de Sedimentador y filtro.....	35
Tabla 8. Generación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (SV) .....	35
Tabla 9. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Sedimentador 1 .....	42
Tabla 10. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Sedimentador 2 .....	43
Tabla 11. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Filtro 1 .....	44
Tabla 12. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Filtro 1 .....	45
Tabla 13. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Filtro 2 .....	46
Tabla 14. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Sedimentador 1 .....	47
Tabla 15. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Sedimentador 2.....	47
Tabla 16. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Filtro 1. ....	48
Tabla 17. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Filtro 2. ....	48
Tabla 18. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro la turbiedad. Para Sedimentadores .....	49
Tabla 19. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro la turbiedad. Para Filtros.....	50
Tabla 20. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro los Sólidos Suspendidos. Para sedimentadores.....	50
Tabla 21. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro los Sólidos Suspendidos. Para Filtros. ....	51
Tabla 22. Calculo del contenido de humedad del lodo de Sedimentadores .....	52
Tabla 23. Calculo del contenido de humedad del lodo de Filtros.....	52
Tabla 24. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Sedimentador 1 .....	53
Tabla 25. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Sedimentador 2 .....	54
Tabla 26. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Filtro 1 .....	55
Tabla 27. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Filtro 2 .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de caudal para sedimentadores .....	22
Figura 2. Curva de Caudal para filtros .....	23
Figura 3. Relación de agua tratada en la planta con el lodo generado .....	24
Figura 4. Sólidos Suspendedos Vs Tiempo - Sedimentadores. ....	25
Figura 5. Carga Contaminante Vs Tiempo - Sedimentadores.....	25
Figura 6. Porcentaje de SS evacuados Vs Tiempo para unidades de sedimentación.....	26
Figura 7. Carga Contaminante Acumulada Vs Tiempo para unidades de sedimentación.....	26
Figura 8. Sólidos Suspendedos Vs Tiempo – Filtros.....	26
Figura 9. Carga Contaminante Vs Tiempo – Filtros. ....	26
Figura 10. Porcentaje de SS evacuados Vs Tiempo para unidades de filtración...27	
Figura 11. Carga Contaminante Acumulada Vs Tiempo para unidades de filtración.....	27
Figura 12. Relación de sólidos suspendedos generados en la planta. ....	29
Figura 13. Columna de sedimentabilidad en sedimentadores .....	30
Figura 14. Columna de sedimentabilidad en filtros .....	30
Figura 15. Lodo sedimentado en cono Imhoff para Sedimentadores.....	32
Figura 16. Lodo sedimentado en cono Imhoff para filtros .....	32
Figura 17. Porcentaje de sólidos retenidos a diferentes tamaños de poro. ....	33
Figura 18. Velocidad de sedimentación Vs Fracción Remanente .....	51

## INTRODUCCIÓN

La Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento básico (Resolución 64/292, 2010), de igual forma nuestra constitución política lo ha acogido como derecho fundamental (artículo 93 CP, 1991). Según las Naciones Unidas más de 2000 millones de personas han logrado acceder a fuentes mejoradas de agua potable en los últimos 21 años (ONU, 2013). Como se observa es imprescindible el tratamiento del agua para consumo humano, para ello se han creado las Plantas Potabilizadoras de Agua, donde mediante diferentes procesos ésta es liberada de los sólidos, microorganismo, y demás impurezas que contiene el líquido captado, pero en el proceso de tratabilidad se generan residuos los cuales, de no ser dispuestos de manera adecuada genera afectaciones al medio ambiente.

El proceso de potabilización del agua emplea diferentes tipos de coagulantes y dosis, que dependen de factores como el contenido de sólidos y el pH que el agua presenta al ingresar a la planta potabilizadora. Como consecuencia de esta aplicación se genera una importante cantidad de residuos semisólidos, genéricamente conocidos como lodos ricos en aluminio o hierro dependiendo del coagulante utilizado (Panizza, 2008), los cuales deben ser debidamente tratados y de ser posible aprovechados, por lo cual se hace necesario realizar una caracterización de estos con el fin de sugerir posibles usos.

Una adecuada caracterización tanto del contenido de los efluentes como de su cantidad permitirá la selección de una tecnología que controle de forma adecuada los residuos generados en las Plantas Potabilizadoras de Agua, y de ser posible se pueda realizar algún tipo de aprovechamiento. Esto generarían un cambio positivo en nuestro país, ya que permite minimizar el impacto ambiental generado por estos residuos, reduce los índices de contaminación a las fuentes hídricas y podrían ser incorporados de forma productiva ayudando a disminuir costos si se sustituyera por alguna materia prima como materiales de producción y/u otro método donde se puedan aplicar.

El presente documento contiene una propuesta para el estudio de los sólidos generados en las unidades de sedimentación y filtración de la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Tablazo en La Ciudad de Popayán, con parámetros que permitan determinar los flujos de agua de lavado y la cantidad de lodos generados, al igual que su caracterización.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento del agua para consumo humano implica la producción de lodos como subproductos. El volumen de dichos lodos es variables algunos autores citan que este valor representa un aproximado de 0.3% a 1% del agua tratada, provenientes de la remoción de sólidos suspendidos presentes en el agua cruda y de reactivos adicionales (Sandoval, SF), mientras otros afirman que este valor podría llegar hasta el 5% (Armenter y Cristiá, 2003); siendo los sedimentadores donde más se generan, produciendo en promedio entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40% (Raigosa, 2012).

La principal dificultad que se presenta en el manejo de estos residuos es su alto contenido de agua (99%) y su pobre capacidad de deshidratación, principalmente la de los lodos producidos por aluminio (Flores *et al.*, 1998, citado por Palacios y Vera, 2013). Generalmente estos lodos son llevados a rellenos de seguridad o en el peor de los casos dispuestos directamente a las fuentes hídricas, condición que no está permitida y se encuentra legislada por el Decreto 3930 de 2010 expedido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, el cual en su Artículo 25 prohíbe la disposición de los lodos generados en el tratamiento de agua en fuentes hídricas superficial, subterráneas, marinas, y sistemas de alcantarillado.

Las descargas de estos residuos o lodos en las corrientes naturales de agua llega a plantear problemas importantes, ya que, si bien estos residuos son principalmente inorgánicos, van formando depósitos o bancos de lodos en los tramos lentos del cauce, a la vez que aumentan la turbiedad y el color de las aguas receptoras, más aun si se está empleando carbón, disminuyendo la actividad fotosintética de las plantas acuáticas (Ramírez, 2008). Por otro lado, El nivel de aluminio en el agua varía mucho, en algunos casos puede exceder de 10 mg/l en la vecindad de las plantas donde es elaborado (Castañeda, 1999), además, cuando el aluminio se moviliza en lagos y ríos, se ha demostrado que es tóxico para la vida acuática (Freeman y Everhart, 1971), ya que por la presencia de exceso de aluminio, las reacciones de hidrolisis del aluminio ocasionan disminución del pH al liberar iones  $H_3O^+$ , atribuyéndose a esto un efecto de aumento de la toxicidad de este metal sobre algunos organismos como *Daphnia Magna* o Pulga de Agua (Satizábal *et al.*, 1999). De igual forma se plantea que los lodos que aumentan la turbiedad del agua de las fuentes receptoras, pueden incluso disminuir el nivel de oxígeno disuelto (OD) en el agua y presentar alto contenido de patógenos por lo que se requiere su estabilización (Moeller, D. 2000, citado por Palacios y Vera, 2013). Lo expuesto permite contextualizar la problemática global que existe por la generación de lodos en las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP's) y conlleva a plantear soluciones.

Los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda producen un peso equivalente de sólidos de lodo ya que al reaccionar con el coagulante, son estos los que precipitan en forma de floc (Martínez, 2012), por lo tanto la composición de los lodos generados en un sistema de abasto depende de la calidad del agua cruda así como de los procesos empleados para la potabilización y la época del año, el lodo producido durante la coagulación contiene óxidos e hidróxidos metálicos y contaminantes orgánicos e inorgánicos como arcilla, arena y microorganismos, entre otros elementos (Villegas *et al*, 2005). Por tal motivo es de gran importancia realizar la caracterización de estos lodos para conocer su composición, encaminados a un posible tratamiento y/o aprovechamiento.

## 2. JUSTIFICACIÓN

En nuestro país para el año 2003 se contaba con más del 86.1% de la cobertura de agua potable según estadísticas de IRCA (Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano) (MADS, 2010), lo cual nos indica que en la mayoría de nuestros municipios se cuenta con PTAP las cuales en su proceso generan lodos. En el caso de la planta de tratamiento de agua potable El Tablazo del Municipio de Popayán se trata un caudal medio de 650 L/s, teniendo en cuenta el porcentaje de volumen de lodos que puede llegar a generarse en este tratamiento según Sandoval, en esta planta se estarían generando alrededor de 6,5 L/s de lodos, suponiendo que fuera un volumen del 1% de agua tratada, es decir, 561,6 m<sup>3</sup> por día.

En el caso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable El Tablazo, estos lodos se han venido vertiendo directamente sobre el Río Cauca, hecho que contribuye a la problemática que se ha dado a nivel nacional por la mala disposición de estos residuos.

La PTAP de El Tablazo se abastece principalmente del Río Piedras, y tiene como fuentes alternas los Ríos Pisojé y Cauca, diseñada para tratar un caudal de 950 L/s, aunque actualmente está tratando un caudal aproximado de 650 L/s, los coagulantes usados en el proceso son el sulfato de aluminio (alumbre) y cal, los cuales hacen parte de la composición de los lodos, donde la mayor porción es generada por los dos sedimentadores y la restante en el lavado de los filtros (Acueducto y Alcantarillado de Popayán, 2009).

En este sentido existe un gran interés por parte del Acueducto de Popayán en buscar soluciones que faciliten la adecuada disposición de los lodos, por tanto se ha planteado en este trabajo realizar la caracterización y cuantificación de los lodos generados en la Planta de Tratamiento de El Tablazo, con el fin de brindar herramientas, generando una contribución al área ambiental que más adelante permitan establecer algún tipo de tratamiento de los residuos generados por la potabilización del agua.

### **3. OBJETIVOS**

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

Realizar el estudio de los lodos generados por las unidades de sedimentación y filtración de la planta de tratamiento de agua potable El Tablazo en la ciudad de Popayán.

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

- Determinar los flujos de agua de lavado y la cantidad de lodos generados por las unidades de sedimentación y filtración de la planta de tratamiento.
- Caracterizar los lodos generados en los sedimentadores y filtros de la planta potabilizadora de agua El Tablazo.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1. GENERALIDADES DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR PLANTAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA (PTAPs)**

En el proceso de potabilización del agua natural los sólidos suspendidos pasa por los sedimentadores donde las partículas se precipitan permitiendo así la clarificación del agua, en algunas ocasiones las partículas son tan finas que es necesario la aplicación previa de coagulantes (Sulfato de Aluminio) que permiten el aglutinamiento de dichos sólidos de modo que por su peso puedan precipitarse durante el proceso de sedimentación, son estos sedimentos los llamados lodos (Raigosa, 2012); los cuales podrían ser aproximadamente 5% del agua tratada en la planta (Armenter y Cristiá, 2003)

Los lodos producidos por las PTAP's están constituidos por sólidos suspendidos, provenientes de los desechos de los procesos de coagulación-floculación, sedimentación y el retrolavado de los filtros, generalmente estos sólidos suspendidos son del 75 al 90% de los sólidos totales y una cantidad de sólidos volátiles del 20 al 35% (Sandoval *et al*, SF), están formados por limos, arcillas y partículas de menor tamaño que las de la arena (Hernández *et al*, 2006); sin embargo, a estos componentes se debe añadir aquellos residuos que se generan en el proceso de tratamiento del agua, como lo son los óxidos hidratados de aluminio, junto con materiales de naturaleza orgánica e inorgánica (Martínez, 2012).

### **4.2. EFECTOS DE LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS EN FUENTES HÍDRICAS.**

Dado que el principal coagulante usado para la potabilización del agua es el sulfato de aluminio, los lodos producidos por estas son ricos en aluminio, lo cual plantea un problema ambiental ya que dependiendo el pH de la fuente receptora puede aumentar la toxicidad del metal tanto en plantas como en peces, pues en un principio es difícil tener efectos tóxicos a pH neutros, mientras en aguas alcalinas o acidas sucede lo contrario (Páez, 2005).

Por otra parte las altas concentraciones de sólidos suspendidos pueden afectar la biota acuática, principalmente por la reducción de la penetración de la luz a través

de la columna de agua dificultando la asimilación de energía por medio de la fotosíntesis, teniendo un impacto directo sobre la fauna acuática (Bilotta y Brazier, 2008).

### **4.3. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DE LODOS EN PTAP's.**

Ramírez (2008) en su artículo “Lodos producidos en el tratamiento de agua potable”, expone el caso de la estación de tratamiento de agua potable del CYII ubicada en Madrid - España, en la cual se trata un caudal de 1 m<sup>3</sup>/s, y se estudian los fangos originados en las purgas de los decantadores y del lavado de los filtros, donde se generan 58680 m<sup>3</sup>/mes de volumen de agua de lavado correspondiente al 2.26% del agua tratada, de los cuales 50400 m<sup>3</sup>/mes (1.94%) corresponden a los filtros y el 8280 m<sup>3</sup>/mes (0.32%) de los sedimentadores; generando 1660 kg/día de lodo, es decir 49800 kg/mes de materia seca.

Martínez (2012), describe la Planta de Tratamiento de agua potable de Checa en Quito - Ecuador, que opera con un caudal medio de 15 L/s, donde se produce 154.4 m<sup>3</sup>/mes de lodo con una humedad de 96.3%, lo cual representa el 0.45% del caudal de ingreso medio, y provienen de las unidades de sedimentación (31.8 m<sup>3</sup>/mes), floculación (8.7 m<sup>3</sup>/mes) y filtración (113.8 m<sup>3</sup>/mes), generando 5868.97 kg/mes en base seca. El lodo estudiado presenta características como una concentración media de 2821 mg/L de SST provenientes del lavado de sedimentadores y 179.6 mg/L de filtros y además la cantidad de sólidos volátiles bordea el 26% de los sólidos totales.

López y Rivas (2013), estudiaron las características físico-químicas de los lodos generados en los sedimentadores de la planta potabilizadora de agua EMAARS-EP en La Estancilla – Ecuador, donde más de la mitad de las partículas pertenecían a limos (70.024%); y en una menor cantidad por arena muy fina (21.744%) y arcilla (8.232%).

Torres et al (2012), determina las características del lodo procedente de las unidades de sedimentación de una PTAP convencional que opera con un caudal de 600 L/s, donde estas unidades generan la mayor cantidad de lodos (90% del total) con 99.7% de humedad. Por otra parte el análisis granulométrico mostró que las partículas sólidas que forman los lodos son finas y de tamaño reducido, 55.5% con tamaño inferior a 0.025mm y con predominancia de limos sobre arcillas.

Cerón et al (SF), realizaron un estudio físico-químico de los lodos de una PTAP de México, hallaron que estos se encuentran constituidos por un 56.16% de arena, 26.72% de Limo y 17.12% Arcilla, y la humedad de los lodos espesados es de 95.9%.

El estudio realizado a los lodos de sedimentadores de la Planta Pisamo, una de las cuatro plantas de la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira hecho por Villegas et al (2005), reporta que el lodo presenta una humedad promedio de 99.2%, además este cuenta con una concentración de sólidos totales del orden de 9747 mg/L y 7693 mg/L de sólidos suspendidos.

## **5. METODOLOGÍA**

### **5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PTAP EL TABLAZO**

La planta de tratamiento de agua potable El Tablazo se encuentra ubicada en la zona norte de la ciudad de Popayán, tiene como principal fuente de abastecimiento el Río Piedras; Cuenta con un caudal de diseño de 950 L/s y un caudal nominal en condiciones de operación para los últimos años de 650 L/s. La planta de tratamiento es de tipo convencional, donde se lleva a cabo los procesos de aireación, coagulación (Sulfato de Aluminio), floculación, sedimentación, filtración, estabilización del pH y desinfección.

La dosis de coagulante depende de la calidad del agua cruda, época del año y otros factores, llegando a ser nula en caso de que la turbiedad de esta se encuentre por debajo de 5 NTU.

Los sedimentadores generan entre el 60% y el 70% de los sólidos totales y los filtros entre el 30% y el 40% según lo observado por la literatura consultada, se seleccionaron estas dos estructuras para realizar la caracterización de los efluentes de lavado. Los lavados de cada estructura dentro de la PTAP son realizados por el operador de turno.

#### **5.1.1. Estructuras de Sedimentación.**

La planta cuenta con cuatro (4) unidades de sedimentación de alta tasa, cada una constituida por dos (2) zonas, la primera llamada zona de quietamiento con una longitud de 7,10x8m, seguida de la zona de sedimentación de 29x8m y una profundidad promedio útil de 3.85 m. El lavado de estas estructuras se realiza mensualmente, en primer lugar se cierra la válvula de entrada al sedimentador y luego se abre la válvula de desagüe vaciando todo el contenido de la estructura, mientras esto sucede el operador encargado va limpiado con agua a presión las placas y paredes del sedimentador y cuando el nivel del agua es más bajo empuja el lodo decantado en el fondo de toda la estructura hasta el desagüe, los tiempos en que esto se realiza y la cantidad del lodo evacuado dependen del criterio y laboriosidad del operador.

### **5.1.2. Estructuras de Filtración.**

Existen ocho (8) filtros rápidos a gravedad con lecho mixto de arena y antracita, con un área total de filtración de 363 m<sup>2</sup>. En cuanto al lavado de las unidades de filtración, según los registros de operación de la planta durante el día se lavan en promedio 5 filtros en época de invierno, lo que equivale a 160 lavados al mes. Para cada uno de ellos el operador de turno desocupa el filtro cerrando la entrada y esperando que filtre el agua que esta retenida, posteriormente el operador limpia las paredes y canales de la estructura con agua a presión, finalmente se abre una válvula que permite la salida de agua potable de un tanque de almacenamiento con un volumen aproximado de 500 m<sup>3</sup> el cual lava el área de filtración de manera ascendente, evacuándola mediante canales hasta el desagüe, pasando por el punto de muestreo escogido anteriormente.

## **5.2. METODOLOGÍA PARA PRIMER OBJETIVO**

### **5.2.1. Puntos de Muestreo.**

Se escogieron los sedimentador 1 y 2 junto con los filtros 1 y 2, ya que el acceso a los desagües de estas estructuras facilitaba más los muestreos a comparación de las demás; determinándose los flujos de agua de lavado en la época de segunda temporada de lluvia y la concentración de sólidos suspendidos entre otros parámetros.

### **5.2.2. Determinación de caudales (Q)**

El caudal se determinó mediante el método de Manning (Anexo 1), para el cual se determinó la sección transversal y la pendiente del canal por donde circula el efluente de lavado y se midieron las alturas de la columna del agua en el punto del muestreo escogido durante el tiempo de lavado para cada una de las estructuras en evaluación, con lo cual se pasó posteriormente a determinar el caudal usando la fórmula de Manning (ver fórmula 1).

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Fórmula 1}).$$

A= Área transversal, para canales rectangulares (m<sup>2</sup>)

n= coeficiente de rugosidad, para el concreto 0.013

R= Radio hidráulico (m)

S<sub>0</sub>= Pendiente hidráulica

En el caso de los sedimentadores se tomó esta medida cada 10 minutos durante el tiempo de lavado de la estructura que inicialmente se consideró en 1 20 minutos. Para los filtros se tomó la medida al minuto 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 y 30, durante los primeros 10 minutos se tomó con mayor frecuencia debido a que en este tiempo salía la mayoría de los sólidos. Se obtuvieron 12 datos para sedimentadores y 11 datos para filtros, en total se realizó un muestreo para cada sedimentador y tres para los filtros, 2 para el Filtro 1 y uno para filtro 2.

### 5.2.3. Determinación de la cantidad de lodos evacuados.

Para determinar la cantidad de lodo evacuado se determinó la turbiedad. Esta medida se hizo en cada punto donde se determinaron los datos de caudal, con los mismos intervalos de tiempo mencionados en el numeral anterior, tanto para sedimentadores como para filtros, y se seleccionaron los puntos más representativos para medir sólidos suspendidos; generando una curva de SS vs tiempo, con lo cual se determina la cantidad de sólidos que se genera en promedio por el lavado de cada unidad.

La determinación de sólidos suspendidos se realizó con base en la guía 009 emitida por el IDEAM, en cada caso se filtraron 50 ml utilizando disco de filtrado de fibra de vidrio, previamente secados y pesados; un Erlenmeyer y una bomba de vacío. Se secó en una estufa a 103-105°C, durante 24 horas asegurando que el filtro con la muestra estuvieran totalmente seco, luego se pasó a enfriar en un desecador hasta temperatura ambiente y se pesó. La ecuación para determinar la concentración de sólidos suspendidos se presenta en la fórmula 2 (Anexo 2)

$$SS \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{Volumen de la Muestra, ml}} \quad (\text{Fórmula 2})$$

Dónde:

A = peso del filtro + residuo seco, mg, y

B = peso del filtro, mg

Para finalizar se determinó la carga contaminante en cada punto a partir de los resultados obtenidos aplicando la Formula 3.

$$C. C. = \frac{Q \times SS \times \Delta t}{1000000} \quad (\text{Formula 3})$$

Donde:

C.C.= Carga Contaminante (Kg SS)

Q= Caudal (L/s)

SS= Sólidos Suspendidos (mg/L)

$\Delta t$ = Variación del tiempo (s)

### 5.3. METODOLOGÍA PARA SEGUNDO OBJETIVO

#### 5.3.1. Consideraciones Iniciales

La planta de tratamiento opera con sulfato de aluminio (alumbre) como coagulante cuando el agua cruda ingresa con turbiedades mayores a 5 NTU, debido a que la época del año en la que se realizaron los muestreos fue lluviosa y la calidad del agua presentó turbiedades donde fue necesario el uso del coagulante, los lodos evaluados contaron con la presencia de sulfato de aluminio.

Con el fin de realizar el objetivo de caracterizar los lodos generados en la planta se realizaron las siguientes pruebas: sedimentabilidad de las partículas en el agua, producción de volumen de sedimentos, medidas indirectas del tamaño de partícula a través de filtraciones sucesivas, se evaluó el contenido de humedad del lodo y por último se determinó el contenido de materia orgánica midiendo los sólidos volátiles.

Se tuvieron en cuenta 2 tipos de muestra para los ensayos, las generadas en las unidades de sedimentación y las de filtración. En el caso del sedimentador se hizo una muestra compuesta, para la cual se tomaron 12 muestras cada 10 minutos durante aproximadamente 120 minutos, que como se había dicho anteriormente es en promedio el tiempo que dura el lavado de la estructura. En el caso del filtro se tomaron muestras al minuto 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 y 30, los primeros minutos se tomaron más muestras ya que es la porción donde salen la mayoría de los sólidos.

El volumen de las muestras para hacer la muestra compuesta dependía del caudal en cada tiempo, se calculaba el caudal como se planteó anteriormente y tomando un volumen aproximado del lavado total de la unidad, se procedió a hacer el siguiente cálculo (Fórmula 4) para obtener finalmente una muestra compuesta de 20 litros, los cuales fueron usados en los diferentes ensayos (Anexo 1).

$$\text{Volumen de la muestra (L)} = \frac{Q \times \Delta t \times 20}{\text{Volumen final}} \quad (\text{Fórmula 4})$$

Donde:

Q= Caudal L/s

$\Delta t$ = Variación del tiempo (seg)

Volumen final= Para sedimentadores 1000 m<sup>3</sup>, para filtros 500 m<sup>3</sup>

### **5.3.2. Sedimentabilidad**

Con el fin de conocer el comportamiento de estos lodos se desarrollaron cuatro pruebas, dos para sedimentadores y dos para filtros; donde se determinó la curva de sedimentación y la eficiencia de remoción a la muestra compuesta tomada, mediante el ensayo de la columna de sedimentación tomado de la guía de laboratorio de operaciones unitarias para la determinación de la sedimentabilidad de partículas discretas de la Universidad del Cauca; la cual se realizó en una columna en PVC de diámetro de 4" y una altura de 1 m, con un grifo de muestreo a 0.6 m de altura, donde se tomaron muestras de 100 ml al minuto 0 (inicial), 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 90 y 120.

Para realizar el análisis de las partículas sedimentables, se procedió a hacer la gráfica velocidades de sedimentación vs fracción remanente de turbiedad, donde posteriormente se escogieron los puntos más representativos para determinar sólidos suspendidos y realizar una nueva curva de velocidades de sedimentación vs fracción remanente de sólidos suspendidos. En el Anexo 3 se presenta la metodología para desarrollar la curva y determinar la eficiencia del proceso.

### **5.3.3. Producción de Volumen de Sedimento**

Se determinó la producción de volumen sedimentado con base en la prueba con el cono Imhoff. Para la prueba se tomó 1 L de la muestra compuesta, luego se dejaron sedimentar los sólidos por 60 minutos, registrando el volumen de sólidos sedimentables a diferentes tiempos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, y 60 minutos; finalmente se realizó la gráfica de Volumen de Lodo sedimentado versus Tiempo.

### **5.3.4. Ensayo para estimación de Tamaño de Partícula.**

La determinación del tamaño de partícula se realizó teniendo en cuenta la cantidad de lodo retenido al filtrar muestras compuestas del lavado de las unidades de sedimentación (100ml) y filtración (1000ml) en una batería de tamices

de distintos tamaños de poro (0.25mm, 0.106mm, 0.053mm) filtrando desde el poro más grande al más pequeño y terminando por filtrar el residuo en un filtro en fibra de vidrio (0.0014mm), previamente tarados; se depositó la muestra en el centro de los tamices, luego se realizaron los lavados necesarios con agua caliente, para evitar la aglomeración de partículas por la grasa que pueda estar en el sedimento, retirando el primer tamiz y lavando la parte inferior dejando caer el líquido de lavado en el segundo. Se repitió el proceso con todos los demás y finalmente en el filtro en fibra de vidrio, luego se dejó escurrir y se llevó la batería y el filtro a secado en estufa a  $105^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas aproximadamente, para finalizar se pesaron las muestras, hallando así el peso del sólido retenido en cada tamaño de poro.

### 5.3.5. Determinación del contenido de humedad en los lodos.

Determinar este parámetro es de suma importancia ya que la humedad aporta volumen al lodo, por tanto, contribuye para el dimensionamiento de estructuras que ayuden a su tratamiento. La humedad de los lodos se determinó por pérdida de peso secando las muestras en un horno a  $105^{\circ}\text{C}$  usando capsulas de porcelana previamente secadas y pesadas hasta que no hubo una variación en el peso, esta prueba fue realizada a la muestra compuesta del lavado de las unidades y al lodo sedimentado del ensayo en el cono Imhoff (lodo espesado),

### 5.3.6. Determinación de Sólidos Totales Volátiles (SV).

La determinación de sólidos volátiles se realizó por diferencia de pesos de manera indirecta (ver Formula 5, 6 y 7) calculando en primer lugar sólidos totales (ST) y totales fijos (STF). Se secaron 25 ml de cada muestra en crisoles de porcelana previamente secados y pesados en el horno a  $105^{\circ}\text{C}$  registrando su peso al final, posteriormente se sometieron las muestras a calcinación en la mufla a  $550^{\circ}\text{C}$  durante 3 horas, después de dejar reposar las muestras se depositaron dentro del desecador hasta que alcanzaron temperatura ambiente y se pesaron de nuevo.

$$ST = \frac{\text{Peso del recipiente (mg)} - \text{Peso de la muestra seca en el horno (mg)}}{\text{Volumen de la muestra (L)}} \quad (\text{Formula 5})$$

$$STF = \frac{\text{Peso del recipiente (mg)} - \text{Peso de la muestra incinerada (mg)}}{\text{Volumen de la muestra (L)}} \quad (\text{Formula 6})$$

$$STV = ST - STF \quad (\text{Formula 7})$$

## 6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS DATOS

Los datos que se presentan a continuación, se determinaron a partir del estudio realizado en las unidades de filtración y sedimentación de la planta de tratamiento El Tablazo de la ciudad de Popayán, se realizaron en temporada de lluvia por lo cual se usó coagulante durante el funcionamiento del sistema de tratamiento.

### 6.1. CAUDALES GENERADOS DURANTE EL LAVADO.

En la Figura 1 se presentan las curvas de caudal generadas por los muestreos realizados a las unidades de sedimentación. Las curvas muestran un comportamiento similar en las dos unidades evaluadas, en ambos casos el lavado presentó una duración de 120 min, y generó caudales entre 100 y 344 L/s, para un promedio de 200 L/s. El volumen de agua de lavado generado por unidad de sedimentación se estimó en 1381 m<sup>3</sup>/mes, y para las 4 unidades de la planta de tratamiento fue 5524 m<sup>3</sup>/mes.

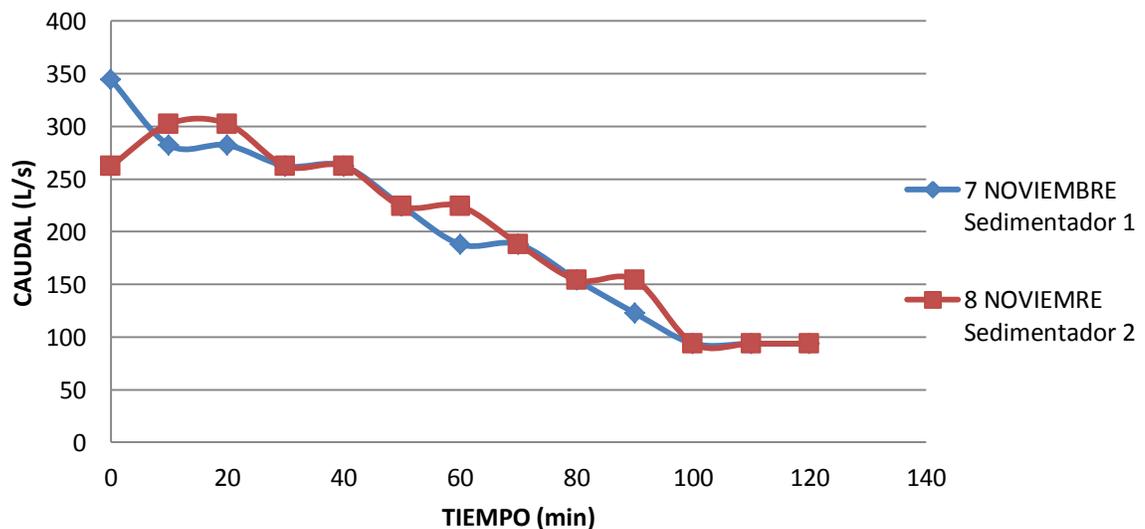


Figura 1. Curva de caudal para sedimentadores

La Figura 2 presenta los datos obtenidos por los muestreos realizados a las unidades de filtración. Las curvas desarrolladas muestran un comportamiento similar en todos los casos, con una duración de 30 minutos por lavado en cada una de las unidades y un caudal promedio de 287 m<sup>3</sup> por unidad. Considerando que durante el día se realiza el lavado de 5 unidades lo que equivale a 160

lavados al mes, se estimó que en promedio para los 8 filtros que operan en la planta se presenta un volumen de agua de lavado de 82232 m<sup>3</sup>/mes.

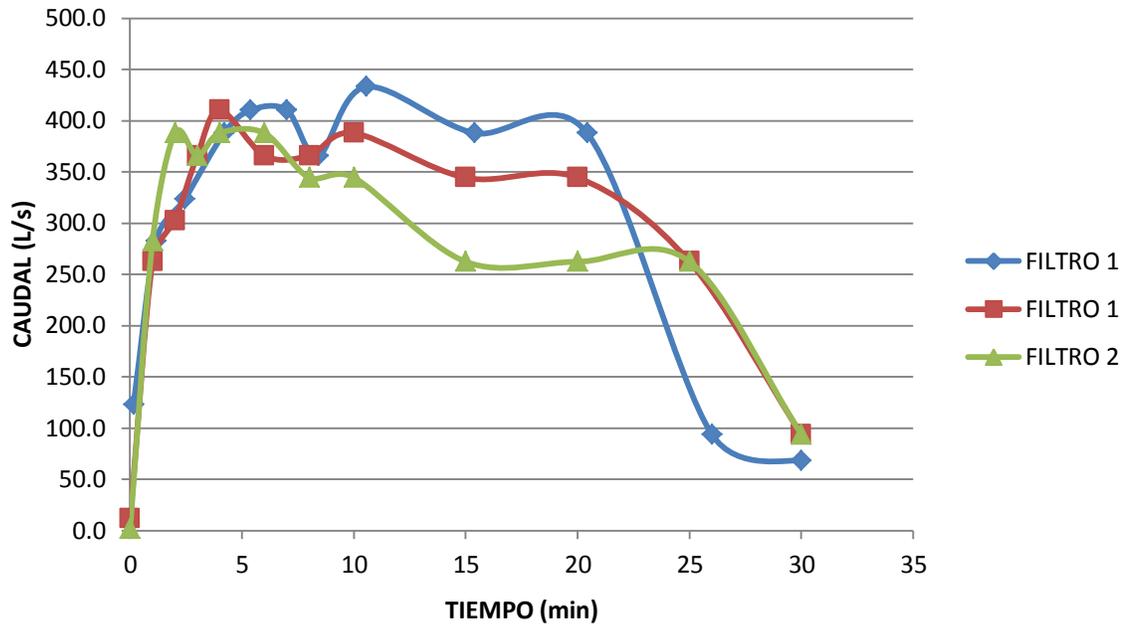


Figura 2. Curva de Caudal para filtros

Con los datos obtenidos se calculó el volumen total de agua de lavado y los porcentaje generados con relación al caudal de entrada a la planta que en promedio es de 0.65 m<sup>3</sup>/s; se determinó que al mes este volumen de agua de lavado corresponde al 5.2% del agua tratada, del cual el 5524 m<sup>3</sup>/mes es generado en las unidades de sedimentación y el 82232 m<sup>3</sup>/mes restante en las unidades de filtración, que equivalen al 0.3% y 4.9% respectivamente (Figura 3).

Un estudio realizado por Ramírez (2008) expone el caso de la estación de tratamiento de agua potable del CYII, donde en promedio para un caudal de entrada de 1 m<sup>3</sup>/s se generan 58680 m<sup>3</sup>/mes de volumen de agua de lavado correspondiente al 2.26% del agua tratada, de los cuales 50400 m<sup>3</sup>/mes (1.94%) corresponden a los filtros y el 8280 m<sup>3</sup>/mes (0.32%) de los sedimentadores. Por otra parte Martínez (2012), plantea que la producción de lodo corresponde a 0.45% del caudal de ingreso. Este reporte parece indicar que las frecuencias de lavado de los filtros están muy altas, sin embargo una afirmación de este tipo debe asegurarse con información adicional tomada durante la época seca donde las turbiedades son más bajas a las alcanzadas durante la presente evaluación y no se presenta adición de coagulante. Algunos autores como Armenter y Cristiá

reportaron en el 2003 valores aproximados al 5% del volumen generado de agua de lavado con respecto al caudal de entrada, lo cual es muy cercano al dato anteriormente reportado del 5.2% que generó el presente estudio.

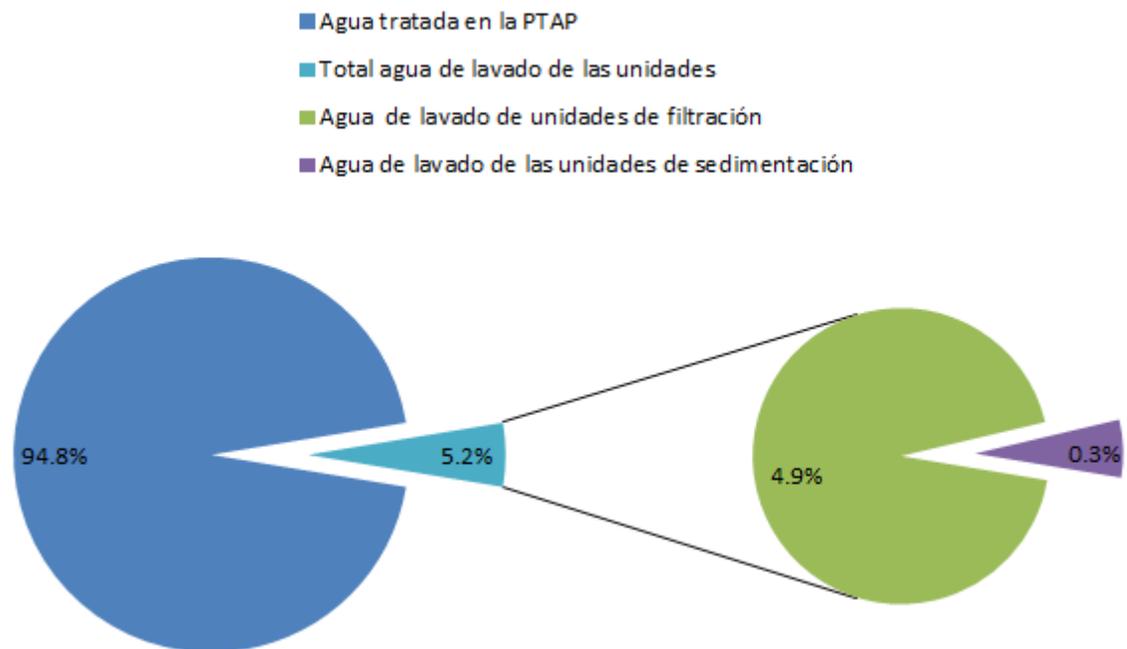


Figura 3. Relación de agua tratada en la planta con el lodo generado

En total la planta genera un aproximado de 87756 m<sup>3</sup>/mes de agua de lavado. Los resultados de la primera fase del estudio se presentan en la Tabla 1, donde encontramos el resumen de los flujos generados durante los lavados de las unidades de sedimentación y filtración de la planta de tratamiento.

Tabla 1. Resumen de flujos generados por las unidades de filtración y sedimentación.

UNIDAD \ PARAMETRO	Volumen de agua de lavado generado por unidad (m <sup>3</sup> )	Volumen total de agua de lavado generado (m <sup>3</sup> /mes)	Volumen total de agua de lavado generado (%)	CAUDAL PROMEDIO (L/s)	CAUDAL PICO (L/s)	TIEMPO DE LAVADO (min)
SEDIMENTADORES	1381	5524	6%	200	323	120
FILTROS	514	82232	94%	287	410	30

## 6.2. CANTIDAD DE LODO GENERADA DURANTE EL LAVADO

La cantidad de lodo evacuado durante el lavado fue medido con base en sólidos suspendidos. En la Figura 4 se presenta la curva de concentración en la evacuación de lodos para los sedimentadores, mientras la Figura 5 muestra el comportamiento de la carga contaminante a través del tiempo.

En el caso de los sedimentadores el muestreo se realizó en dos unidades diferentes, con dos métodos de lavado diferente, dado que cada lavado se hace a criterio del operador. En el caso del sedimentador uno el operador comienza a evacuar el lodo con agua a presión al minuto 20, mientras en el sedimentador dos fue al minuto 40, lo cual explica la diferencia en la salida del lodo; ; por otra parte la diferencia en los picos de lodo se debe a la metodología usada por cada operador, pues en el caso del sedimentador 2 el lavado fue más minucioso logrando evacuar completamente los sólidos sedimentados en el fondo de la estructura.

Si se estandarizara el lavado de las estructuras sería posible un ahorro en el consumo de agua, ya que el tiempo de 120 minutos que dura un lavado normalmente se podría reducir a 80 minutos, donde ya se habría evacuado en promedio 16 mil kg de SS es decir 90% de la totalidad del lodo generado (ver Figuras 6 y 7), donde para su evacuación se utiliza aproximadamente 82% del agua total de lavado, aunque por otra parte, se recomienda más cuidado a la hora de evacuar los lodos con el agua a presión, ya que de esto depende que salga mayor cantidad de lodo como es el caso del Sedimentador 2.

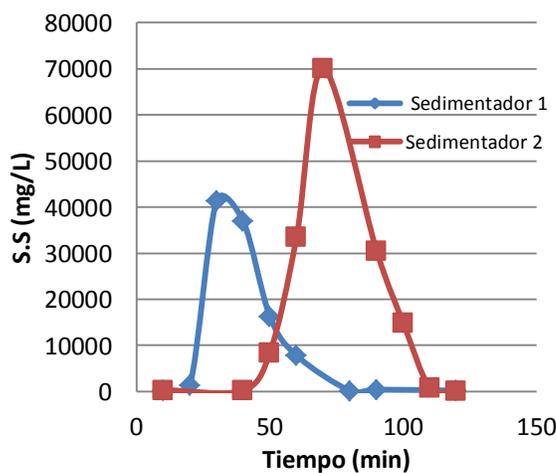


Figura 4. Sólidos Suspendidos Vs Tiempo - Sedimentadores.

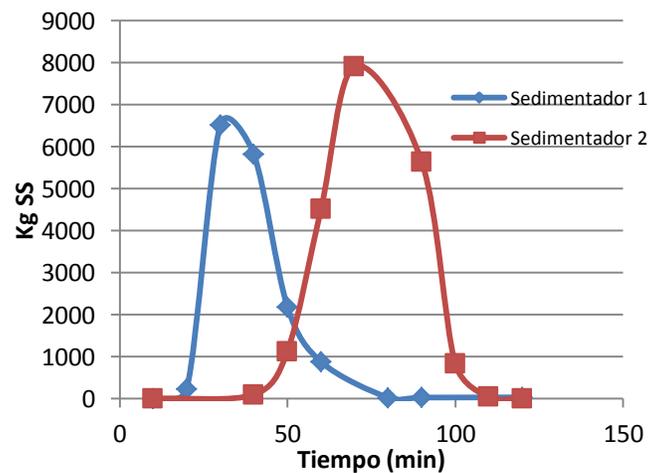


Figura 5. Carga Contaminante Vs Tiempo - Sedimentadores.

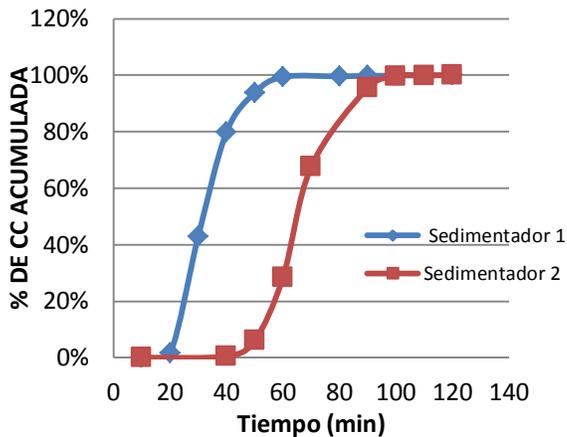


Figura 6. Porcentaje de SS evacuados Vs Tiempo para unidades de sedimentación

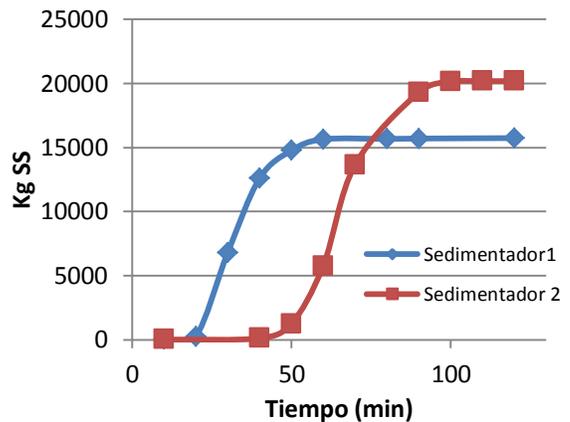


Figura 7. Carga Contaminante Acumulada Vs Tiempo para unidades de sedimentación

La caracterización del efluente de filtros en términos de SS se presenta en la figura 8 y 9, donde se muestra la concentración de SS a través del tiempo así como la carga contaminante en diferentes momentos. En ambos casos se presentó una similitud en el comportamiento de las curvas.

La mayor evacuación de lodo sucede durante los primeros 10 minutos donde se presentan concentraciones de sólidos suspendidos entre 900 y 8 mg/L, con cargas contaminantes de hasta 15 kg de SS. Un pequeño incremento en la concentración de los SS se presenta en el minuto 25, alcanzando valores de 126 mg/L y hasta 10 kg de SS, lo cual corresponde al efecto del agua de lavado de muros y plaquetas de fondo.

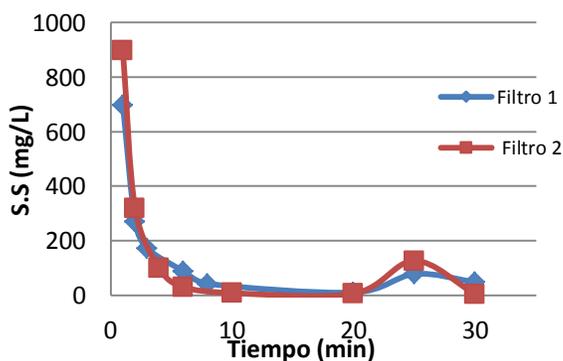


Figura 8. Sólidos Suspendidos Vs Tiempo – Filtros.

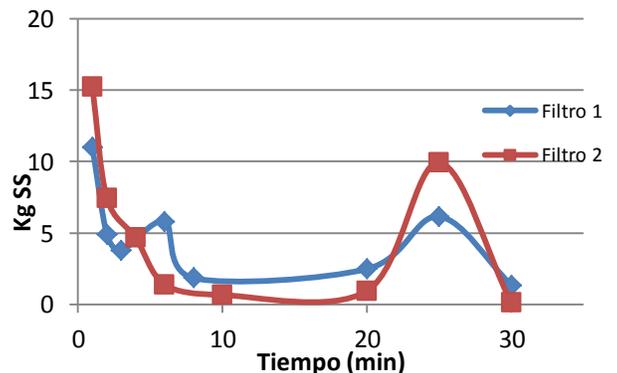


Figura 9. Carga Contaminante Vs Tiempo – Filtros.

En la figura 10 se presenta el porcentaje de sólido evacuado en el tiempo y así como el volumen de agua gasto en el tiempo, mientras en la Figura 11 se observa la carga contaminante acumulada. Estas curvas indican que alrededor de 30 Kg de SS es decir cerca del 80% de los sólidos sale hasta el minuto 20 y que para su evacuación se utiliza aproximadamente 80% del agua total de lavado. Este resultado es importante de considerar para un posible tratamiento, ya que se podrían tratar los lodos de los primeros 20 minutos,.

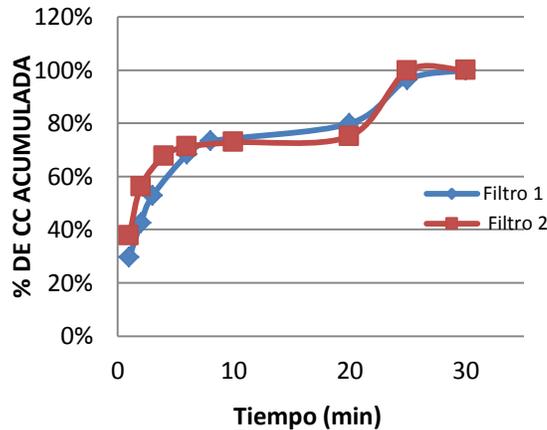


Figura 10. Porcentaje de SS evacuados Vs Tiempo para unidades de filtración.

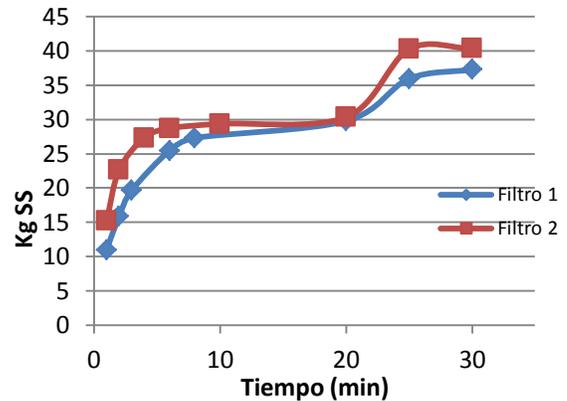


Figura 11. Carga Contaminante Acumulada Vs Tiempo para unidades de filtración.

Los picos en las concentraciones de sólidos suspendidos puede llegar a 70 mil mg/L en sedimentadores y 900 mg/L para el caso de los filtros, estas altas concentraciones reducen la producción primaria de las algas, y en el caso de los sedimentadores esta puede llegar a ser nula, debido a la obstrucción en la penetración de la luz a través de la columna de agua, Generando un impacto directo en los consumidores primarios donde se puede presentar una reducción de poblaciones (Bilotta y Brazier, 2008).

En la Tabla 2 se observa la cantidad promedio de ST y SS generados por cada lavado tanto de las estructuras de sedimentación como de filtración según los muestreos realizados (Anexo 2).

Tabla 2. Cantidad de ST y SS generada en un lavado de Sedimentador y Filtro

Cantidad de sólidos generados en un lavado (Kg)			
Sólidos totales generados en un lavado de Sedimentador			
Sedimentador 1		Sedimentador 2	
16882		26618	
Promedio		21750	
Sólidos Suspendidos generados en un lavado de Sedimentador			
Sedimentador 1		Sedimentador 2	
15738		20192	
Promedio		17965	
Sólidos totales generados en un lavado de Filtro			
Filtro 1	Filtro 1	Filtro 2	Promedio
79	98	97	91
Sólidos suspendidos generados en un lavado de Filtro			
Filtro 1	Filtro 1	Filtro 2	Promedio
32	37	40	37

Teniendo en cuenta el número de lavados que se hace al mes de cada una de las unidades, (4 para sedimentadores, y 160 para filtros) se puede estimar en 101.6 ton/mes la generación de ST y 77.7 ton/mes de SST en la planta de tratamiento (Tabla 3), al relacionar estos valores se determina una concentración de SS del 76.4% de los ST, y un 23.6% restantes de Sólidos Disueltos, los cuales muy seguramente pertenece a sales de aluminio debido a que el coagulante utilizado es el Sulfato de Aluminio, o a sales disueltas presentes en el agua cruda.

Así mismo estos datos se encuentra dentro del rango de concentración de sólidos suspendidos del 75 a 90% de los sólidos totales citado por el autor Martínez (2012), donde además la Planta de Tratamiento de agua potable de Checa que opera con un caudal de 15 L/s, genera 5949.4 kg/mes, con una relación de 396.6; por otra parte Ramírez (2008) expone el caso de una planta que trata un caudal de 1000 L/s y genera 1660 kg/día de lodo, es decir 49800 kg/mes, con una relación de 49.8; comparando los anteriores datos con los obtenidos en el presente estudio, donde nuestra relación de lodo generado sobre caudal es de 119.6, se observa una gran diferencia en la producción de sólidos en las diferentes plantas, esto debido a que la cantidad de lodo generado en cada una de estas depende de las características del agua cruda, coagulante, clima y otra serie de factores.

Tabla 3. Generación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Suspendedos (SS) por mes.

ST(Sólidos Totales)		
ton/mes generados en los filtros	ton/mes generados en los sedimentadores	<b>ton/mes generados en la planta</b>
14.6	87.0	<b>101.6</b>
SS(Sólidos Suspendedos)		
ton/mes generados en los filtros	ton/mes generados en los sedimentadores	<b>ton/mes generados en la planta</b>
5.8	71.9	<b>77.7</b>

En la Figura 12 se detalla la distribución de las 77.7 ton/mes de SST que son generadas en la planta, se observa que la mayor producción es originada por los sedimentadores con un 92% aportando 71.9 ton/mes, mientras en los filtros se genera solo el 8% de estos con 5.8 ton/mes, al comparar estos resultados con los volúmenes de lodo generados en la planta por el lavado de cada una de estas unidades, se observa que a pesar de que los filtros son quienes generan el mayor volumen de agua de lavado, son los sedimentadores quienes aportan la mayor cantidad de sólidos suspendidos, dado que el efluente de lavado de estas unidades contiene mayor concentración de sólidos en comparación con las unidades de filtración.

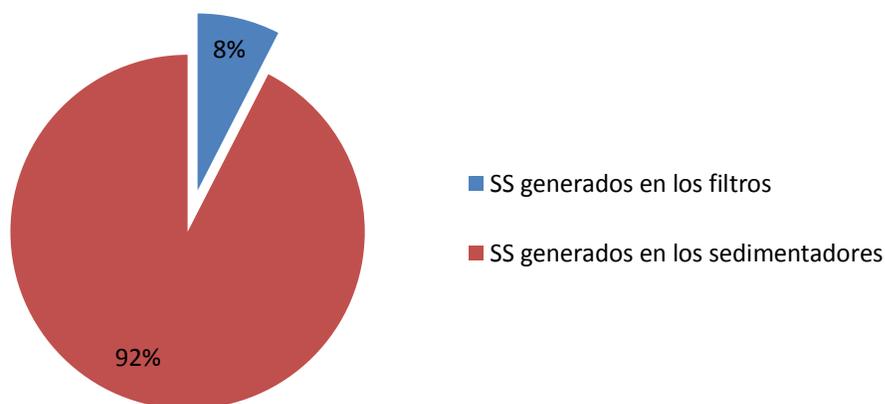


Figura 12. Relación de sólidos suspendidos generados en la planta.

## 6.3. CARACTERIZACIÓN DEL LODO

### 6.3.1. Sedimentabilidad

Las Figuras 13 y 14 se encuentran las gráficas de velocidad de sedimentación vs fracción remanente de los datos de los dos pruebas realizadas tanto para los sedimentadores como para los filtros, se puede observar que con respecto a la correlación de los datos se tienen aproximaciones del 77% y 86% respectivamente; lo cual nos indica que las pruebas arrojaron altas similitudes permitiendo replicarlas y predecir el comportamiento de las partículas sedimentables.

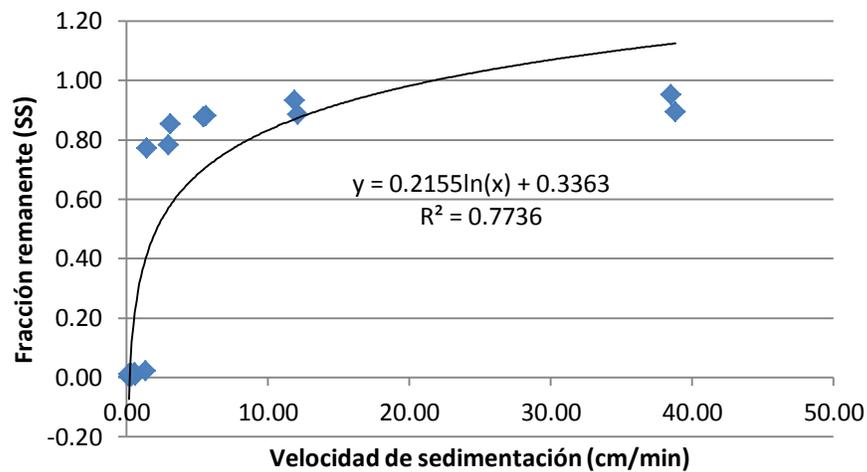


Figura 13. Columna de sedimentabilidad en sedimentadores

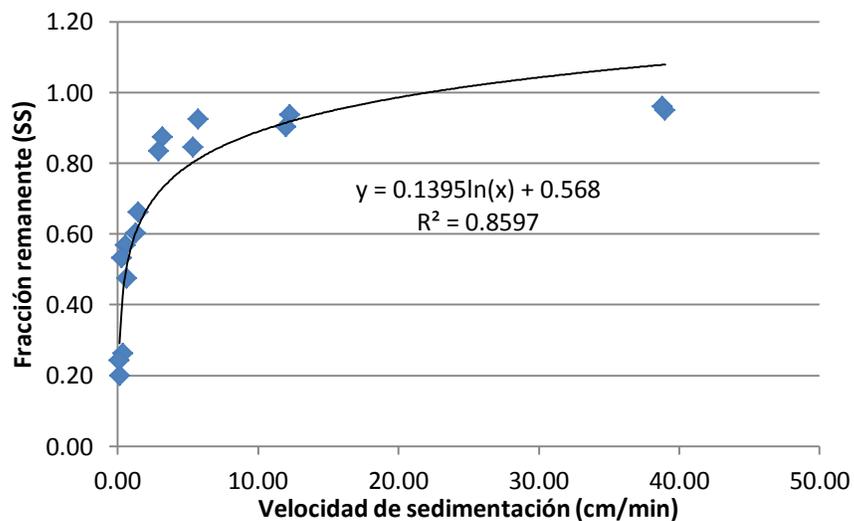


Figura 14. Columna de sedimentabilidad en filtros

En la Tabla 4, se observan las remociones totales para diferentes velocidades de sedimentación (carga superficial), en el caso de los sedimentadores la eficiencia más alta aproximada al 84% se logra con cargas superficiales de 1 cm/min o 14.4 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-día), en cuanto a los filtros para cargas superficiales de 0.5 cm/min o 7.2 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-día) se logran eficiencias alrededor del 77%. Lo cual indica que el tamaño de partículas presentes en los filtros es más pequeño que en el sedimentador.

Tabla 4. Remoción total para diferentes cargas superficiales

Velocidad de sedimentación (Cargas Superficiales)		Remoción total (%)	
cm/min	(m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> -día))	Sedimentadores	Filtros
3	43,2	72	64
1	14,4	84	72
0,5	7,2	--	77

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000 presentado por el Ministerio de Desarrollo Económico Colombiano en su título C, presenta algunos criterios para el diseño de sedimentadores uno de ellos es la carga superficial a utilizar en el caso de los sedimentadores de flujo horizontal plantea que debe estar entre 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>-día) y 30 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>-día), por otro lado los sedimentador de flujo ascendente o vertical se habla de entre 20 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>-día) y 30 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>-día). Al compararlos con los datos obtenidos se puede observar que las pruebas realizadas para los sedimentadores las mayores eficiencias se alcanzan con cargas superficiales que se aproximan a los 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>-día), indicando que posiblemente se puede usar sedimentador de flujo horizontal para remover las partículas sedimentables, en los filtros se encontró que para cargas superficiales de 7.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>-día) se alcanzaban eficiencias del 76%, y al compararlos con los datos registrados por la RAS 2000 se observan que son cargas superficiales muy bajas y que posiblemente se deben usar polímeros para permitir eficiencias mayores.

### 6.3.2. Producción de Volumen de Sedimento

La prueba de producción de volumen de sedimento por lavado de cada unidad realizada con el cono Imhoff, muestra que en promedio a los 40 minutos el lodo ya ha decantado tanto en las unidades de sedimentación como en las de filtración

(Figura 15 y 16), con un volumen de 287.5 ml y 1.45 ml respectivamente; si se considera el volumen de lodo generado por el lavado de cada una de las unidades al mes, teniendo en cuenta que los sedimentadores se lavan una vez al mes y son 4 unidades, y en las unidades de filtración se registran en promedio 160 lavados al mes en época de invierno; se tendría una producción de lodo espesado de 1.6 m<sup>3</sup>/mes para los sedimentadores y de 0.12 m<sup>3</sup>/mes para los filtros.

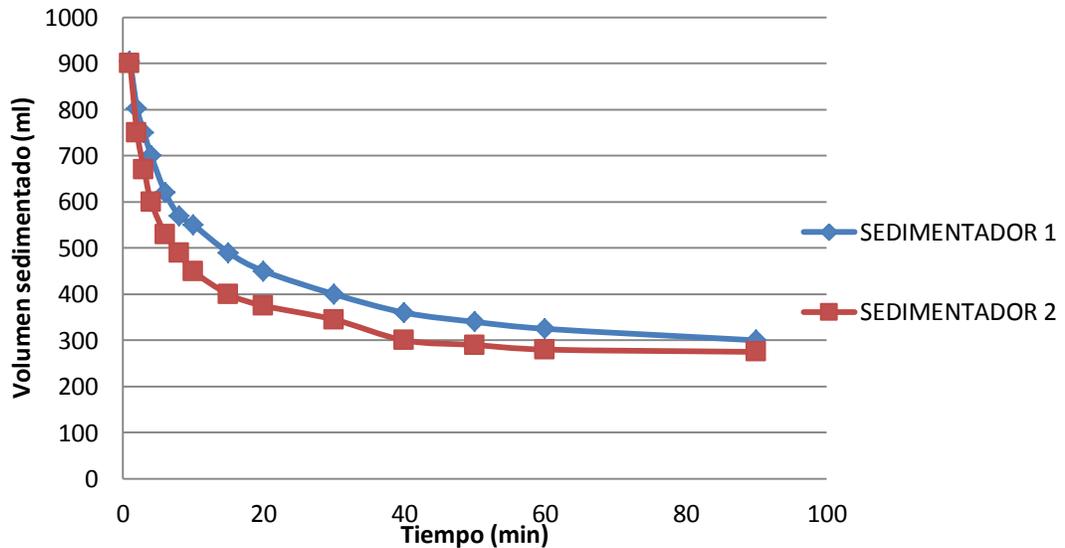


Figura 15. Lodo sedimentado en cono Imhoff para Sedimentadores

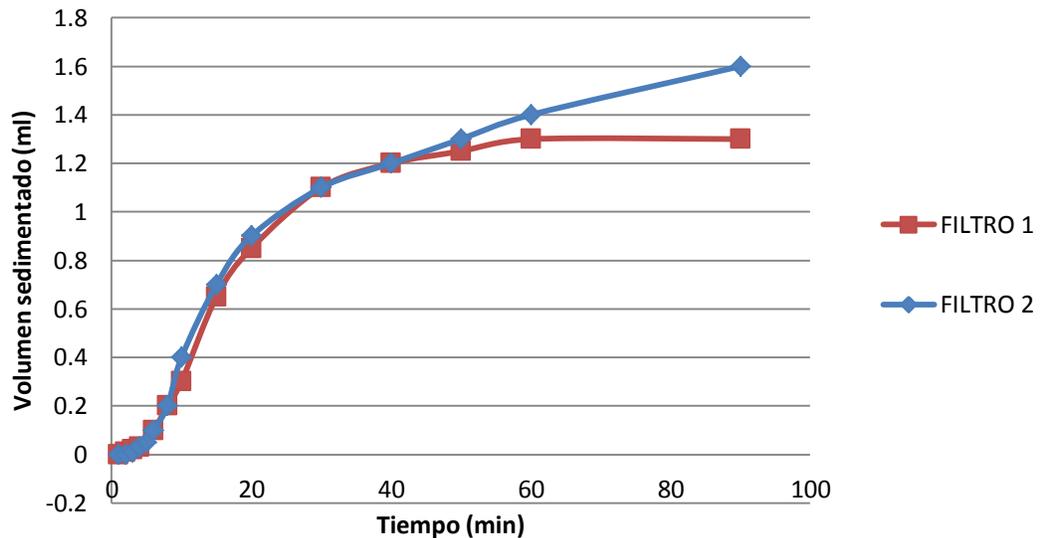


Figura 16. Lodo sedimentado en cono Imhoff para filtros

### 6.3.3. Ensayo para Estimación de Tamaño de Partícula

La estimación del tamaño de partícula se realizó teniendo en cuenta la cantidad de lodo retenido en tamices de distintos tamaños de poro (0.25 mm, 0.106 mm, 0.053 mm, 0.0014 mm) tal como se planteó en la metodología. La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos de los dos muestreos realizados en cada una de las unidades estudiadas y en la Figura 17 se observa el porcentaje promedio de sólidos retenidos para cada tamaño de poro.

Tabla 5. Cantidad de lodo retenido para diferentes tamaños de poro.

<b>SEDIMENTADORES</b>			
TAMAÑO DE PORO (mm)	PESO RETENIDO (mg) SEDIMENTADOR 1	PESO RETENIDO (mg) SEDIMENTADOR 2	PROMEDIO (mg)
0.25	58.0	5.2	32
0.106	103.1	97.8	100
0.053	202.8	177.8	190
0.0014	553.7	544.0	549
<b>FILTROS</b>			
TAMAÑO DE PORO (mm)	PESO RETENIDO (mg) FILTRO 1	PESO RETENIDO (mg) FILTRO 2	PROMEDIO (mg)
0.25	0.4	1.0	0.7
0.106	2.8	5.0	3.9
0.053	8.8	8.0	8.4
0.0014	63.9	77.8	70.9

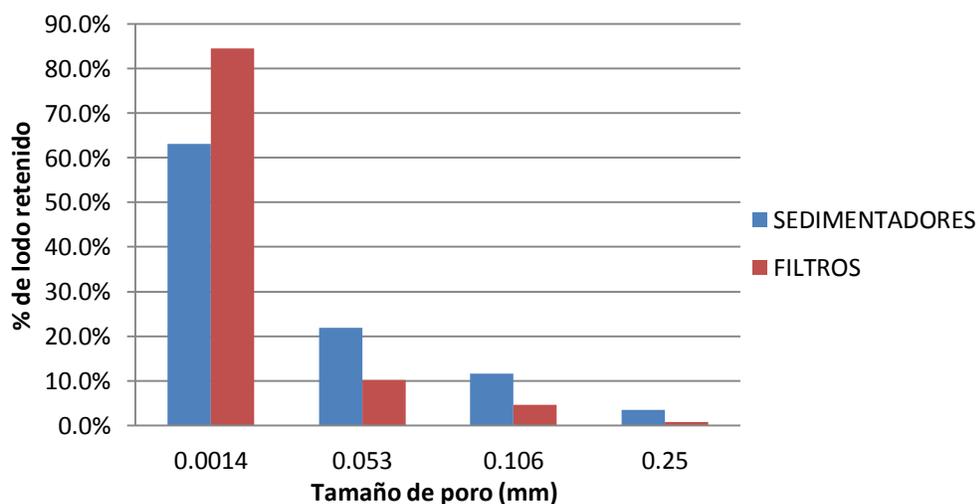


Figura 17. Porcentaje de sólidos retenidos a diferentes tamaños de poro.

El lodo en las unidades de sedimentación se caracteriza por tener un 63% de partículas retenidas en un poro de 0.0014 mm, en el caso de las unidades de filtración este valor asciende al 84%; lo que indica que en su mayoría los lodos están formados por partículas finas como limo y arcilla, al igual que la caracterización física hecha a los lodos de la Planta Potabilizadora de Agua EMAARS-EP por López y Rivas (2013), donde más de la mitad de las partículas pertenecían a limos; y en una menor cantidad por arena muy fina, así mismo otros estudios como el realizado por Guimaraes y Morita (2003) plantea que por lo menos el 70% de las partículas del lodo proveniente de sedimentadores tienen diámetros entre 0.002 y 0.20 mm, o el realizado por Torres *et al* (2012) donde por lo menos el 55.5% de las partículas del lodo contaban con un tamaño menor de 0.025mm.

#### 6.3.4. Determinación del contenido de humedad en los lodos

En la Tabla 6 se observan la concentración de humedad promedio de los lodos en cada una de las unidades estudiadas (Anexo 4), tanto en el agua de lavado de cada unidad, que en el caso de los filtros fue de 99.9% y para los sedimentadores fue de 99.1%; como la del lodo espesado, 96.6% para filtros y 95.9% para sedimentadores, igual a la reportada en el estudio realizado por Cerón *et al* (SF), obteniendo una reducción de la humedad del 3.3% en promedio y aunque tienen un alto grado de humedad, está en el rango reportado por algunos autores como Villegas *et al* (2005), quien reporta humedades del orden de 99.2% para sedimentadores, además otros autores como Pérez y Urrea, han citado que la espesar estos lodos llegarían a tener un porcentaje de materia seca de 4 a 5%.

Tabla 6. Contenido de humedad de lodos en las unidades de Filtración y Sedimentación

FILTROS		SEDIMENTADORES	
Agua de lavado	Lodo espesado	Agua de lavado	Lodo espesado
99.9%	96.6%	99.1%	95.9%
REDUCCION DE LA HUMEDAD AL ESPESARLOS			
3.4%		3.2%	

#### 6.3.5. Determinación de Sólidos Totales Volátiles (STV)

La Tabla 7 muestra la cantidad promedio de sólidos volátiles que se genera en un lavado de cada unidad (Anexo 5), si se tiene en cuenta el número de lavados que se realizan al mes de las diferentes estructuras (4 para sedimentadores, 160 para

filtros), se estima que la producción mensual de sólidos volátiles en la Planta de Tratamiento de Agua Potable el Tablazo estaría alrededor de 32.6 Ton/mes (Tabla 8).

Tabla 7. Cantidad de STV generada en un lavado de Sedimentador y filtro.

CANTIDAD DE SÓLIDOS GENERADOS EN UN LAVADO (Kg)			
SÓLIDOS VOLATILES GENERADOS EN UN LAVADO DE SEDIMENTADOR			
SEDIMENTADOR 1	SEDIMENTADOR 2	PROMEDIO	
5777	8686	7231	
SÓLIDOS VOLATILES GENERADOS EN UN LAVADO DE FILTRO			
FILTRO 1	FILTRO 1	FILTRO 2	PROMEDIO
18	13.5	38.5	23

Tabla 8. Generación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Totales Volátiles (SV)

STV (Sólidos Totales Volátiles)		
ton/mes generados en los filtros	ton/mes generados en los sedimentadores	<b>ton/mes generados en la planta</b>
3.7	28.9	<b>32.6</b>

Al relacionar estos datos con la cantidad de ST producida en la planta que se estima alrededor de 101.6 ton/mes, se observa que los STV son cerca del 32% de los ST, lo cual quiere decir que en su mayoría los lodos están constituidos por compuestos inorgánicos. Sandoval *et al* (SF) reporta que la concentración de sólidos volátiles en lodos de este tipo debe estar entre un 20 y 35% de los sólidos totales y según Martínez (2012) en promedio 26% de los sólidos totales son volátiles.

## 7. CONCLUSIONES

Las conclusiones que arrojó el estudio de los efluentes de lavado de las unidades de sedimentación y de filtración de la planta El Tablazo en la ciudad de Popayán, corresponden a la época de lluvia:

- En promedio para las unidades de filtración de la PTAP se generan 82232 m<sup>3</sup>/mes de efluente de lavado, mientras en las unidades de sedimentación el promedio generado es de 5524 m<sup>3</sup>/mes; Lo cual representa el 5.2% del agua tratada mensualmente en la planta.
- Los lavados de filtros reportaron un caudal promedio de 187 l/s y un caudal pico de 410 L/s durante los 30 minutos que generalmente demora, en los sedimentadores el caudal promedio fue de 200 L/s y el caudal pico de 323 L/s con un tiempo de lavado de 120 minutos.
- La planta el Tablazo genera en promedio una concentración de sólidos suspendidos del 76.4% de los sólidos totales, de los cuales 71.8 ton/mes de lodo son generadas por los sedimentadores y 5.8 ton/mes por los filtros.
- El estudio realizado demuestra que existe mayor cantidad de compuestos inorgánicos en el lodo, puesto la cantidad de sólidos volátiles presentes bordea el 32.12% de los sólidos totales.
- La prueba de laboratorio realizada para la determinación de tamaño de partículas en los lodos generados en las unidades de sedimentación y filtración, arrojó que en ambos casos la gran mayoría de estos están formados con tamaños de partículas inferiores a 0.014 mm, lo que indica que las partículas son finas como limos.
- Los lodos generados en las PTAP están compuestas por agua en un 99.9% para las unidades de filtración y un 99.1% para las de sedimentación, se pudo observar que al espesarlos por sedimentación perdían en promedio un 3.3 % de humedad en los dos caso.
- Se determinó que al usar el proceso de sedimentación como alternativa de tratamiento, la eficiencia más alta que podría alcanzar el lodo proveniente del sedimentador es del 84% con cargas superficiales de 14.4 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-dia), en cuanto a los filtros para cargas superficiales de 7.2 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-dia) se logran eficiencias al rededor del 77%.

## 8. RECOMENDACIONES

Teniendo como consideración que el actual estudio se realizó en época lluviosa, sería de gran importancia replicarlo y realizar la caracterización de los lodos generados en la Planta el Tablazo para las diferentes épocas del año con base en la metodología ya planteada, a fin de obtener datos más representativos.

Para un posible tratamiento y aprovechamiento de estos lodos se deberán medir otro parámetro como la concentración de Aluminio y Sulfatos, aspecto microbiológico, DBO y DQO, entre otros que permitan determinar su calidad.

Para que los muestreos sean replicables se debe asegurar que la manera como cada operador haga los lavados en las estructuras de sedimentación y filtración sean lo más parecidos posible, ya que se pudo observar que varían según la forma como estos se realicen.

Para un posible tratamiento se recomienda usar el agua de lavado de filtros de los primeros 20 minutos ya que a este momento se ha evacuado cerca del 80% del total de sólidos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYÁN – S.A. E.S.P. Manual Para la Construcción de Redes de Acueducto y Alcantarillado en el Municipio de Popayán, 2009. 20 p.

ARMENTER, Josep. CRISTIÁ, Joan. CUSIDÓ, Joan. ARTEAGA, Francisco y CREMADES, Lázaro. Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica. En: Tecnología del Agua. Barcelona, España. Enero 2002. 28 p.

ASAMBLEA GENERAL DE LAS NACIONES UNIDAS. Resolución 64/292 (3, Agosto, 2010). Agua potable salubre y al saneamiento como un derecho humano fundamental para el completo disfrute de la vida y de todos los demás derechos humanos. Asamblea General. 2010. 3 p.

BILOTTA G.S., BRAZIER R.E. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. Water Research, Volume 42, Issue 12, June 2008, 2849-2861 p

CASTAÑEDA, Onia. Determinación de la toxicidad de los lodos generados por una planta potabilizadora, utilizando bioensayos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México 1998 – 1999.

CERON Oswaldo, MILLÁN Sandra, ESPEJEL Fabricio, RODRÍGUEZ Arturo y RAMÍREZ Rosa María. Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción. Instituto de Ingeniería, UNAM. Coordinación de Ingeniería Ambiental, Edif. 5, Ciudad Universitaria. Coyoacán CP. 04510 México,

COLOMBIA. ASAMBLEA NACIONAL CONSTITUYENTE. Constitución política de Colombia, artículo 93, 1991

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 (25, Octubre, 2010). Por el cual se reglamenta en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El ministerio 1993. 25 p.

Freeman, R.A., y W.H. Everhart, (1971). Toxicity of Aluminum Hydroxide Complexes in neutral and basic media to Rainbow Trout. Trans. Am. Fish. Soc.100:644.

IDEAM. Sólidos suspendidos. Laboratorio de química ambiental del IDEAM, Julio de 1997 (Guía 009).

Guimarães M., Morita D. (2003), Incorporação de Lodo de Estações de Tratamento de Água em Blocos Cerâmicos. Iniciação Científica Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, Brasil, 2003.

HERNÁNDEZ Darwin, VILLEGAS Juan David, CASTAÑO Juan Mauricio, PAREDES Diego. Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 5, núm. 8, enero-junio, Medellín, 2006, 119-132 p

LOPEZ Jaime, RIVAS Jonathan. Estabilización de lodos generados en la planta potabilizadora de agua EMAARS-EP en la Estancilla, mediante compostaje. Calceta Ecuador, 2013, 91 h. Trabajo de grado (Ingeniero en Medio Ambiente). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

MARTÍNEZ, Marco. Estudio para el Tratamiento, Manejo y Disposición Final de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Agua Potable. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, 2012. 22 p.

NACIONES UNIDAS NUEVA YORK, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU, Junio, 2013), Objetivos de Desarrollo del Milenio informe de 2013. 4 p.

NACIONES UNIDAS NUEVA YORK, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Resolución 64/292 (28, Junio, 2013). Por el cual se establece el derecho humano al agua y el saneamiento, asamblea general de las naciones unidas, 2010.

PÁEZ-OSUNA Federico. Efecto de los metales. Efecto de los metales en organismos acuáticos. En: BOTELLO A. V., RENDON J., GOLD-BOUCHOT G., AGRAZ-HERNANDEZ C. Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y tendencias, 2da edición. México: 2005. p 343-360.

PALACIOS, Lizandro y VERA, DIEGO. Aprovechamiento de Lodos Generados en los Sedimentadores de la Planta Potabilizadora de Agua La Estancilla- Manabí, para Ladrillos de Construcción. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Calceta-Ecuador.: Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí – Manuel Félix López, 2013. 5 p.

PANIZZA, Amalia. ALDAMA, Alejandro. CHACALO, Alicia. VACA, Mabel. GRABINSKY, Jaime. MÁRQUEZ, Cirio y DURÁN, Carmen. Evaluación del compost elaborado a partir de lodos con alto contenido de sulfato de aluminio. En: Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. México Mayo 2008, 343 p.

PÉREZ Francisco, URREA Mario. Abastecimiento de Aguas: Tratamiento de Fangos. Universidad Politécnica de Cartagena, SF. 54 p

RAIGOSA, Mario. Evaluación de Alternativas para el Manejo de Lodos Provenientes de las Plantas de Potabilización de Agua de los Municipios del Departamento de Risaralda Mediante el Análisis Costo-Beneficio. Trabajo de grado Administrador Ambiental. Colombia: Universidad Tecnológica De Pereira. Febrero del 2012.

RAMÍREZ, Francisco. Lodos producidos en el tratamiento del agua potable. En: Revista técnica industrial. Junio 2008, 1 p.

República de Colombia, Ministerio de Desarrollo Económico. REGLAMENTO TECNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS-2000: Sistemas de Potabilización. Bogotá D.C.: Dirección de Agua potable y Saneamiento Básico, 2000. 198 p (Sección II, Título C)

SANDOVAL Luciano, MARTIN Alejandra, PIÑA Martin, MONTELLANO Patricia. Estudio piloto para reducir el volumen de lodos de Plantas Potabilizadoras. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, Juitepec, Moleros, México. 13 p

SATIZÁBAL, Alexandra. ANDRADE, Mercedes. ZUÑIGA, María del Carmen. Toxicidad Aguda del Aluminio sobre *Daphnia Magna* en Aguas con Diferentes Niveles de Dureza. En: Actual Biol, Colombia -Cali 1991, 139 p.

TORRES Patricia, HERNANDEZ Darwin, PAREDES Diego. Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. Universidad del Valle Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira Colombia. Revista Ingeniería de Construcción, Volumen 27. 2012, 145-154 p

VILLEGAS, Juan. CASTAÑO Juan. CUERVO Diego. Recuperación de Sulfato de Aluminio a Partir de Lodos Generados en Plantas de Potabilización de Agua. En: Scientia et Technica. Universidad Tecnológica de Pereira. Octubre del 2005, 224p.

## ANEXOS

### ANEXO A. Datos de campo y determinación de Caudal y Volumen de Muestra.

Tabla 9. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Sedimentador 1

Pendiente (S) = 0.01834										
SEDIMENTADOR 1, 7 Noviembre										
Tiempo (min)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hco (m)	Velocidad (m/S)	Caudal (L/s)	dt (s)	Volumen (L)	% Volumen	Volumen de muestra (L)
0	0.125	0.15	1.45	0.103	2.296	344.36				
10	0.11	0.132	1.42	0.093	2.138	282.19	600	169311.9	12.6%	2.51
20	0.11	0.132	1.42	0.093	2.138	282.19	600	169311.9	12.6%	2.51
30	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	600	157420.5	11.7%	2.33
40	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	600	157420.5	11.7%	2.33
50	0.095	0.114	1.39	0.082	1.967	224.18	600	134510.0	10.0%	1.99
60	0.085	0.102	1.37	0.074	1.844	188.06	600	112834.8	8.4%	1.67
70	0.085	0.102	1.37	0.074	1.844	188.06	600	112834.8	8.4%	1.67
80	0.075	0.09	1.35	0.067	1.713	154.15	600	92492.1	6.9%	1.37
90	0.065	0.078	1.33	0.059	1.573	122.66	600	73594.7	5.5%	1.09
100	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	600	56275.0	4.2%	0.83
110	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	600	56275.0	4.2%	0.83
120	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	600	56275.0	4.2%	0.83

Continuación (ANEXO A)

Tabla 10. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Sedimentador 2

Pendiente (S) = 0.01834										
SEDIMENTADOR 2, 8 Noviembre										
Tiempo (min)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hco (m)	Velocidad (m/S)	Caudal (L/s)	dt (s)	Volumen (L)	% Volumen	Volumen de muestra (L)
0	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37				
10	0.115	0.138	1.43	0.097	2.192	302.47	600	181480.9	12.8%	2.57
20	0.115	0.138	1.43	0.097	2.192	302.47	600	181480.9	12.8%	2.57
30	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	600	157420.5	11.1%	2.23
40	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	600	157420.5	11.1%	2.23
50	0.095	0.114	1.39	0.082	1.967	224.18	600	134510.0	9.5%	1.90
60	0.095	0.114	1.39	0.082	1.967	224.18	600	134510.0	9.5%	1.90
70	0.085	0.102	1.37	0.074	1.844	188.06	600	112834.8	8.0%	1.60
80	0.075	0.09	1.35	0.067	1.713	154.15	600	92492.1	6.5%	1.31
90	0.075	0.09	1.35	0.067	1.713	154.15	600	92492.1	6.5%	1.31
100	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	600	56275.0	4.0%	0.80
110	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	600	56275.0	4.0%	0.80
120	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	600	56275.0	4.0%	0.80

Continuación (ANEXO A)

Tabla 11. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Filtro 1

Pendiente (S) = 0.01834										
FILTRO 1, 8 Agosto										
Tiempo (min)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hco (m)	Velocidad (m/S)	Caudal (L/s)	dt (s)	Volumen (L)	% Volumen	Volumen de muestra (L)
0.15	0.065	0.078	1.33	0.059	1.573	122.66				
1.15	0.110	0.132	1.42	0.093	2.138	282.19	69	19470.9	3.9%	0.78
2.43	0.120	0.144	1.44	0.100	2.244	323.20	76.8	24821.5	5.0%	0.99
4.2	0.135	0.162	1.47	0.110	2.395	387.93	106.2	41198.0	8.2%	1.65
5.38	0.140	0.168	1.48	0.114	2.442	410.31	70.8	29050.0	5.8%	1.16
7	0.140	0.168	1.48	0.114	2.442	410.31	97.2	39882.2	8.0%	1.60
8.4	0.130	0.156	1.46	0.107	2.346	365.94	84	30739.0	6.1%	1.23
10.54	0.145	0.174	1.49	0.117	2.489	433.07	128.4	55606.8	11.1%	2.22
15.39	0.135	0.162	1.47	0.110	2.395	387.93	291	112887.3	22.6%	4.52
20.42	0.135	0.162	1.47	0.110	2.395	387.93	301.8	117076.9	23.4%	4.68
26	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	334.8	31401.4	6.3%	1.26
30	0.045	0.054	1.29	0.042	1.256	67.82	240	16277.2	3.3%	0.65

Continuación (ANEXO A)

Tabla 12. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Filtro 1

Pendiente (S) = 0.01834										
FILTRO 1, 23 Octubre										
Tiempo (min)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hco (m)	Velocidad (m/S)	Caudal (L/s)	dt (s)	Volumen (L)	% Volumen	Volumen de muestra (L)
0	0.015	0.018	1.23	0.015	0.623	11.22				
1	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	60	15742.0	3.0%	0.60
2	0.115	0.138	1.43	0.097	2.192	302.47	60	18148.1	3.4%	0.69
3	0.13	0.156	1.46	0.107	2.346	365.94	60	21956.5	4.2%	0.83
4	0.14	0.168	1.48	0.114	2.442	410.31	60	24618.6	4.7%	0.93
6	0.13	0.156	1.46	0.107	2.346	365.94	120	43912.9	8.3%	1.66
8	0.13	0.156	1.46	0.107	2.346	365.94	120	43912.9	8.3%	1.66
10	0.135	0.162	1.47	0.110	2.395	387.93	120	46551.4	8.8%	1.76
15	0.125	0.15	1.45	0.103	2.296	344.36	300	103307.8	19.6%	3.91
20	0.125	0.15	1.45	0.103	2.296	344.36	300	103307.8	19.6%	3.91
25	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	300	78710.2	14.9%	2.98
30	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	300	28137.5	5.3%	1.07

Continuación (ANEXO A)

Tabla 13. Calculo de Caudal y Volumen de Muestra para el Filtro 2

Pendiente (S) = 0.01834										
FILTRO 2, 5 Noviembre										
Tiempo (min)	Altura (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Perímetro mojado (m)	Radio Hco (m)	Velocidad (m/S)	Caudal (L/s)	dt (s)	Volumen (L)	% Volumen	Volumen de muestra (L)
0	0.005	0.006	1.21	0.005	0.303	1.82				
1	0.11	0.132	1.42	0.093	2.138	282.19	60	16931.2	3.5%	0.71
2	0.135	0.162	1.47	0.110	2.395	387.93	60	23275.7	4.9%	0.97
3	0.13	0.156	1.46	0.107	2.346	365.94	60	21956.5	4.6%	0.92
4	0.135	0.162	1.47	0.110	2.395	387.93	60	23275.7	4.9%	0.97
6	0.135	0.162	1.47	0.110	2.395	387.93	120	46551.4	9.7%	1.94
8	0.125	0.15	1.45	0.103	2.296	344.36	120	41323.1	8.6%	1.73
10	0.125	0.15	1.45	0.103	2.296	344.36	120	41323.1	8.6%	1.73
15	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	300	78710.2	16.4%	3.29
20	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	300	78710.2	16.4%	3.29
25	0.105	0.126	1.41	0.089	2.082	262.37	300	78710.2	16.4%	3.29
30	0.055	0.066	1.31	0.050	1.421	93.79	300	28137.5	5.9%	1.18

## ANEXO B. Cálculo de sólidos suspendidos

Tabla 14. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Sedimentador 1

SEDIMENTADOR 1, 7 Noviembre								
Peso Inicial (mg)	Volumen (ml)	Peso Filtrado (mg)	SS (mg/L)	Tiempo (min)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo SS (mg/s)	Peso de SS generados (Kg)
18283.5	50	18299.1	312	10	60	282.2	88042.2	5.3
17976.5	30	18019	1417	20	600	282.2	399764.1	239.9
14288.4	5	14495.5	41420	30	600	262.4	10867260	6520.4
20662.8	5	20847.4	36920	40	600	262.4	9686606.5	5812.0
19679.2	5	19760.5	16260	50	600	224.2	3645221.2	2187.1
14761.3	5	14800.3	7800	60	600	188.1	1466852	880.1
10703.6	50	10711.1	150	80	1200	154.2	23123.0	27.7
16007.5	50	16028.4	418	90	600	122.7	51270.9	30.8
11067.5	50	11077.7	204	120	1800	93.8	19133.5	34.4
Total generado								15737.7

Tabla 15. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Sedimentador 2.

SEDIMENTADOR 2, 8 Noviembre								
Peso Inicial (mg)	Volumen (ml)	Peso Filtrado (mg)	SS (mg/L)	Tiempo (min)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo SS (mg/s)	Peso de SS generados (Kg)
18285.1	40	18297.4	308	10	60	302.5	93008.9	5.6
17976.4	50	17987.3	218	40	1800	262.4	57196.1	103.0
14289.2	10	14373.4	8420	50	600	224.2	1887623.8	1132.6
20663.1	10	20998.7	33560	60	600	224.2	7523593.1	4514.2
19678.7	5	20029.1	70080	70	600	188.1	13179101	7907.5
14763.1	5	14915.5	30480	90	1200	154.2	4698599.5	5638.3
10703.7	5	10778	14860	100	600	93.8	1393743.9	836.2
16008.7	30	16032.5	793	110	600	93.8	74408.0	44.6
11068.8	50	11077.6	176	120	600	93.8	16507.3	9.9
Total generado								20191.8

Continuación (ANEXO B)

Tabla 16. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Filtro 1.

FILTRO 1, 23 Octubre								
Peso Inicial (mg)	Volumen (ml)	Peso Filtrado (mg)	SS (mg/L)	Tiempo (min)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo SS (mg/s)	Peso de SS generados (Kg)
10702.1	50	10737	698	1	60	262.4	183132.5	11.0
14289.9	50	14303.4	270	2	60	302.5	81666.4	4.9
14761.5	50	14770.1	172	3	60	365.9	62941.8	3.8
17881.5	50	17885.9	88	6	180	365.9	32202.8	5.8
19678.1	50	19680.2	42	8	120	365.9	15369.5	1.8
18284.6	50	18285.1	10	20	720	344.4	3443.6	2.5
11070	50	11073.9	78	25	300	262.4	20464.7	6.1
18474.1	50	18476.5	48	30	300	93.8	4502.0	1.4
Total generado								37.3

Tabla 17. Cantidad de lodo evacuado por lavado del Filtro 2.

FILTRO 2, 5 Noviembre								
Peso Inicial (mg)	Volumen (ml)	Peso Filtrado (mg)	SS (mg/L)	Tiempo (min)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo SS (mg/s)	Peso de SS generados (Kg)
18284.8	50	18329.7	898	1	60	282.2	253403.4	15.2
17976.5	50	17992.5	320	2	60	387.9	124137.2	7.4
14290.1	50	14295.1	100	4	120	387.9	38792.9	4.7
20661.7	50	20663.2	30	6	120	387.9	11637.9	1.4
19680.7	50	19681.1	8	10	240	344.4	2754.9	0.7
14760.9	50	14761.2	6	20	600	262.4	1574.2	0.9
10704.9	50	10711.2	126	25	300	262.4	33058.3	9.9
16010	50	16010.2	4	30	300	93.8	375.2	0.1
Total generado								40.3

## ANEXO C. Metodología Curva de Sedimentabilidad y Eficiencia del Proceso

En primer lugar se midió la turbiedad en cada punto, donde posteriormente se escogieron los más representativos para elaborar la curva con base a la fracción remanente de sólidos suspendidos de las muestras. Para determinar las velocidades de sedimentación se utilizaron los datos de altura de la columna de agua después de tomar cada muestra del grifo y se dividieron por el tiempo; en cuanto a la fracción remanente se procedió a dividir los datos de turbiedad de cada muestra tomada, entre la muestra del tiempo inicial (ver Formula 7).

$$V_s = \frac{h}{t}; \quad FR_1 = \frac{\text{Turb}}{\text{Turb}_{\text{ini}}} \quad FR_2 = \frac{SS}{SS_{\text{ini}}} \quad (\text{Formula 7})$$

t = tiempo (min)

Turb = Turbiedad (NTU)

Turb<sub>ini</sub> = Turbiedad inicial (NTU)

SS = Sólidos Suspendidos (mg/l)

SS<sub>ini</sub> = Sólidos Suspendidos inicial (mg/l)

h = Altura (cm)

V<sub>s</sub> = velocidad de Sedimentación (cm/min)

FR<sub>1</sub> = Fracción Remanente de turbiedad (NTU)

FR<sub>2</sub> = Fracción Remanente de SST (NTU) - (SST)

Tabla 18. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro la turbiedad. Para Sedimentadores

SEDIMENTADOR 1, 7 NOVIEMBRE					SEDIMENTADOR 2, 8 NOVIEMBRE				
Turb <sub>ini</sub>	=6070 NTU				Turb <sub>ini</sub>	=5830 NTU			
Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)	Altura (cm)	vel (cm/min)	Fracción Remanen	Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)	Altura (cm)	vel (cm/min)	Fracción Remanen
1	5970	38.8	38.80	0.98	1	5460	38.5	38.50	0.94
2	5160	37.5	18.75	0.85	2	5280	37.1	18.55	0.91
3	5900	36.3	12.10	0.97	3	5160	35.6	11.87	0.89
4	5740	34.9	8.73	0.95	4	4960	34.1	8.53	0.85
6	5720	33.6	5.60	0.94	6	4960	32.6	5.43	0.85
8	5570	32.2	4.03	0.92	8	4950	31.5	3.94	0.85
10	5530	31	3.10	0.91	10	4290	29.8	2.98	0.74
15	5370	29.7	1.98	0.88	15	179	28.2	1.88	0.03
20	5080	28.4	1.42	0.84	20	148	26.7	1.34	0.03
30	71	26.8	0.89	0.01	30	119	25	0.83	0.02
40	45	25.2	0.63	0.01	40	113	23.3	0.58	0.02
50	39	23.1	0.46	0.01	50	100	21.8	0.44	0.02
60	34	21.6	0.36	0.01	60	93	20	0.33	0.02
90	29	20	0.22	0.005	90	89	18.5	0.21	0.02
120	25	18.8	0.16	0.004	120	72	18	0.15	0.01

Continuación (ANEXO C)

Tabla 19. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro la turbiedad. Para Filtros.

FILTRO 1, 23 OCTUBRE					FILTRO 2, 5 NOVIEMBRE				
Turb <sub>ini</sub> = 39.9 NTU					Turb <sub>ini</sub> = 54 NTU				
tiempo (min)	turbiedad (NTU)	Altura (cm)	vel (cm/min)	Fracción Remanen	tiempo (min)	turbiedad (NTU)	Altura (cm)	vel (cm/min)	Fracción Remanen
1	38.1	39	39.00	0.95	1	53.6	38.8	38.80	0.99
2	37.5	37.9	18.95	0.94	2	52	37.5	18.75	0.96
3	37.3	36.8	12.27	0.93	3	51.9	36.1	12.03	0.96
4	36.2	35.7	8.93	0.91	4	49.6	34.3	8.58	0.92
6	36	34.5	5.75	0.90	6	49.3	32.5	5.42	0.91
8	35.6	33.3	4.16	0.89	8	48.6	31.1	3.89	0.90
10	34.4	32.1	3.21	0.86	10	48.1	29.5	2.95	0.89
15	33	30.9	2.06	0.83	15	46.3	27.8	1.85	0.86
20	31.1	29.7	1.49	0.78	20	43.5	26.3	1.32	0.81
30	26.7	28.6	0.95	0.67	30	39.6	24.7	0.82	0.73
40	21.4	27.3	0.68	0.54	40	34.5	23.1	0.58	0.64
50	18.9	25.9	0.52	0.47	50	30.2	21.6	0.43	0.56
60	15.5	24.5	0.41	0.39	60	27.6	19.9	0.33	0.51
90	13.7	23	0.26	0.343	90	21.3	18.3	0.20	0.39
120	11.5	21.4	0.18	0.288	120	16.9	16.5	0.14	0.31

Tabla 20. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro los Sólidos Suspendidos. Para sedimentadores

SEDIMENTADOR 1 7 NOVIEMBRE		SEDIMENTADOR 2 8 NOVIEMBRE	
FRACCION REMANENTE	vel (cm/min)	FRACCION REMANENTE	vel (cm/min)
0.89	38.80	0.95	38.50
0.89	12.10	0.93	11.87
0.88	5.60	0.88	5.43
0.85	3.10	0.78	2.98
0.77	1.42	0.02	1.34
0.01	0.63	0.01	0.58
0.01	0.36	0.01	0.33
0.0023	0.16	0.01	0.15

Continuación (ANEXO C)

Tabla 21. Datos obtenidos para la curva de sedimentabilidad tomando como parámetro los Sólidos Suspendedos. Para Filtros.

23 OCTUBRE F1		5 NOVIEMBRE F2	
FRACCION REMANENTE	vel (cm/min)	FRACCION REMANENTE	vel (cm/min)
0.95	39.00	0.96	38.80
0.94	12.27	0.90	12.03
0.92	5.75	0.84	5.42
0.87	3.21	0.83	2.95
0.66	1.49	0.60	1.32
0.47	0.68	0.57	0.58
0.26	0.41	0.53	0.33
0.20	0.18	0.24	0.14

Posteriormente con la gráfica velocidades de sedimentación vs fracción remanente, se determinó la remoción total ( $R_T$ ), variando las velocidades de sedimentación ( $V_{sc}$ ) y hallando el área  $\int V_s dc$  (Figura 14).

$$R_T = 1 - C + \frac{1}{V_{sc}} \int V_s dc$$

$R_T$  = Remoción Total

$V_s$  = Velocidad de Sedimentación

$V_{sc}$  = Velocidad de Sedimentación Critica

$1-C$  = Eficiencia de remoción para partículas con  $V_{sc} \geq 0$

$\int V_s dc$  = eficiencia de remoción con  $V_s < V_{sc}$

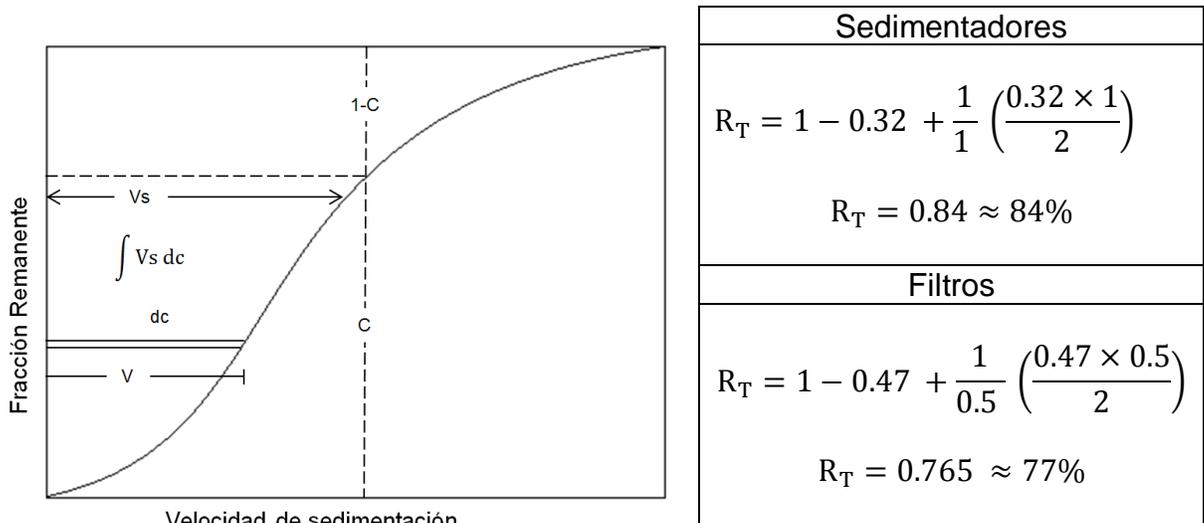


Figura 18. Velocidad de sedimentación Vs Fracción Remanente

## ANEXO D. Contenido de Humedad

Tabla 22. Calculo del contenido de humedad del lodo de Sedimentadores

Peso (mg)	Sedimentador 1, 7 Nov		Sedimentador 2, 8 Nov	
	Lodo espesado	Agua de lavado	Lodo espesado	Agua de lavado
Recipiente	57233	32068.8	57232.8	32067.7
Recipiente y muestra	67563.3	68592.3	66218.8	71954.7
Muestra húmeda	10330.3	36523.5	8986.0	39887
Recipiente y muestra seca	57691.7	32410.1	57579.5	32424.1
Muestra seca	458.7	341.3	346.7	356.4
<b>% Humedad</b>	<b>95.6%</b>	<b>99.1%</b>	<b>96.1%</b>	<b>99.1%</b>

Tabla 23. Calculo del contenido de humedad del lodo de Filtros

Peso (mg)	Filtro 1, 8 Agosto		Filtro 1, 23 Octubre		Filtro 2, 5 Noviembre	
	Lodo espesado	Agua de lavado	Lodo espesado	Agua de lavado	Lodo espesado	Agua de lavado
Recipiente	61306.5	61306.5	61311.7	32067	57232.9	32067.6
Recipiente y muestra	62043.5	92757.1	62708.5	71522.5	58822.4	71731.3
Muestra húmeda	737	31450.6	1396.8	39455.5	1589.5	39663.7
Recipiente y muestra seca	61342.5	61342.5	61352.3	32074.4	57271.4	32074.3
Muestra seca	36	36	40.6	7.4	38.5	6.7
<b>% Humedad</b>	<b>95.12%</b>	<b>99.89%</b>	<b>97.09%</b>	<b>99.98%</b>	<b>97.58%</b>	<b>99.98%</b>

## ANEXO E. Determinación de Sólidos Totales Volátiles

Tabla 24. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Sedimentador 1

SEDIMENTADOR 1, 7 Noviembre													
Vol. (L)	Peso del recipiente (mg)	Peso muestra seca (mg)	Peso muestra incinerada (mg)	Tiempo (min)	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo ST (mg/s)	Peso de STT generado (Kg)	Flujo STV (mg/s)	Peso de STV generado (Kg)
0.025	43470	43478	43475	10	352	232	120	600	282.2	99330	59.6	33862	20.3
0.025	46670	46715	46702	20	1792	1272	520	600	282.2	505678	303.4	146737	88.0
0.025	55762	56868	56471	30	44276	28396	15880	600	262.4	11616581	6969.9	4166395	2499.8
0.025	55008	55982	55632	40	38972	24956	14016	600	262.4	10224984	6135.0	3677342	2206.4
0.025	61752	62186	62068	50	17392	12652	4740	600	224.2	3898997	2339.4	1062629	637.6
0.025	60504	60712	60651	60	8336	5900	2436	600	188.1	1567651	940.6	458109	274.9
0.025	61314	61319	61316	80	224	92	132	1200	154.2	34530	41.4	20348	24.4
0.025	43124	43137	43135	90	540	464	76	600	122.7	66235	39.7	9322	5.6
0.025	42936	42944	42941	120	312	196	116	1800	93.8	29263	52.7	10880	19.6
Total generado											16881.8		5776.6

Continuación (ANEXO E)

Tabla 25. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Sedimentador 2

SEDIMENTADOR 2, 8 Noviembre													
Vol. (L)	Peso del recipiente (mg)	Peso muestra seca (mg)	Peso muestra incinerada (mg)	Tiempo (min)	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo ST (mg/s)	Peso de STT generado (Kg)	Flujo STV (mg/s)	Peso de STV generado (Kg)
0.025	43472	43481	43477	10	384	216	168	600	302.5	116148	69.7	50815	30.5
0.025	46672	46680	46676	40	320	180	140	1800	262.4	83958	151.1	36731	66.1
0.025	55763	55974	55907	50	8456	5772	2684	600	224.2	1895694	1137.4	601708	361.0
0.025	55008	55861	55588	60	34112	23180	10932	600	224.2	7647342	4588.4	2450772	1470.5
0.025	61752	63514	62853	70	70472	44048	26424	600	188.1	13252820	7951.7	4969243	2981.5
0.025	60504	62100	61625	90	63840	44856	18984	1200	154.2	9841161	11809.4	2926451	3511.7
0.025	61314	61686	61576	100	14904	10468	4436	600	93.8	1397871	838.7	416060	249.6
0.025	43125	43146	43139	110	828	568	260	600	93.8	77659	46.6	24386	14.6
0.025	42938	42949	42945	120	448	292	156	600	93.8	42019	25.2	14631	8.8
Total generado											26618.2		8685.6

Continuación (ANEXO E)

Tabla 26. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Filtro 1

FILTRO 1, 23 Octubre													
Vol. (L)	Peso del recipiente (mg)	Peso muestra seca (mg)	Peso muestra incinerada (mg)	Tiempo (min)	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo ST (mg/s)	Peso de STT generado (Kg)	Flujo STV (mg/s)	Peso de STV generado (Kg)
0.04	42933	42967	42959	1	847.5	637.5	210	60	262.4	222356	13.3	55097	3.3
0.04	43463	43479	43477	2	400	355	45	60	302.5	120987	7.3	13611	0.8
0.04	43121	43132	43130	3	267.5	220	47.5	60	365.9	97889	5.9	17382	1.0
0.04	46667	46675	46674	6	215	175	40	180	365.9	78677	14.2	14638	2.6
0.04	55757	55765	55764	8	190	180	10	120	365.9	69529	8.3	3659	0.4
0.04	60499	60504	60503	20	112.5	107.5	5	720	344.4	38740	27.9	1722	1.2
0.04	55004	55012	55010	25	202.5	155	47.5	300	262.4	53129	15.9	12462	3.7
0.04	61745	61752	61752	30	182.5	172.5	10	300	93.8	17117	5.1	938	0.3
Total generado											97.9		13.5

Continuación (ANEXO E)

Tabla 27. Calculo de Sólidos Totales Volátiles Filtro 2

FILTRO 2, 5 Noviembre													
Vol. (L)	Peso del recipiente (mg)	Peso muestra seca (mg)	Peso muestra incinerada (mg)	Tiempo (min)	ST (mg/L)	STF (mg/L)	STV (mg/L)	dt (s)	Caudal (L/s)	Flujo ST (mg/s)	Peso de STT generado (Kg)	Flujo STV (mg/s)	Peso de STV generado (Kg)
0.025	43123	43149	43134	1	1044	448	596	60	282.2	294603	17.7	168183	10.1
0.025	43469	43480	43476	2	456	288	168	60	387.9	176895	10.6	65172	3.9
0.025	60503	60508	60507	4	196	148	48	120	387.9	76034	9.1	18621	2.2
0.025	55007	55010	55010	6	116	96	20	120	387.9	45000	5.4	7759	0.9
0.025	61751	61754	61753	10	132	72	60	240	344.4	45455	10.9	20662	5.0
0.025	42935	42938	42937	20	116	76	40	600	262.4	30435	18.3	10495	6.3
0.025	55761	55768	55765	25	272	164	108	300	262.4	71364	21.4	28336	8.5
0.025	46669	46672	46671	30	140	84	56	300	93.8	13131	3.9	5252	1.6
Total generado											97.3		38.5