

**CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS POR LAS UNIDADES DE  
SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA POTABLE EL ARROYO EN EL MUNICIPIO DE SANTANDER DE  
QUILICHAO**



**EVERTH PÉREZ VALENCIA  
CARLOS ANDRÉS RAMOS LEDEZMA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SANTANDER DE QUILICHAO-CAUCA  
2020**

**CARACTERIZACIÓN DE LODOS GENERADOS POR LAS UNIDADES DE  
SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUA POTABLE EL ARROYO EN EL MUNICIPIO DE SANTANDER DE  
QUILICHAO**

**EVERTH PÉREZ VALENCIA  
CARLOS ANDRÉS RAMOS LEDEZMA**

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

**Director  
JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ MERA  
Ingeniero sanitario, MSc, PhD.**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SANTANDER DE QUILICHAO-CAUCA  
2020**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a Dios, nuestro creador por habernos permitido llegar a este punto de nuestra carrera universitaria, por habernos dado unos padres luchadores que siempre han tenido la visión de progreso y nos motivaron día a día, lo cual nos ha servido para salir adelante.

A la Universidad del Cauca por haber abierto las puertas de esta hermosa carrera en el municipio de Santander de Quilichao.

A EMQUILICHAO E.S.P por el convenio con la Universidad del Cauca mediante el cual, se pudo realizar esta investigación.

Al ingeniero Javier Fernández, nuestro director de trabajo de grado, por haber estado con nosotros guiándonos y aportando sus conocimientos, y así poder desarrollar el presente proyecto.

A la ingeniera Luz Stella Figueroa, docente de la Universidad del Cauca y exgerente de EMQUILICHAO por ser parte de los procesos administrativos necesarios para realizar esta investigación.

Al ingeniero José Ramón, profesional universitario de la PTAP El Arroyo, a los operadores y funcionarios, quienes estuvieron atentos al desarrollo del trabajo de campo.

A nuestros compañeros, amigos y familiares, que de una u otra forma aportaron en algún momento de nuestras vidas para que el sueño de llegar a este punto de la carrera universitaria se hiciera realidad.

## **DEDICATORIA**

Después de terminar otra etapa crucial en la formación de nuestras vidas, queremos dedicar el presente trabajo como una muestra de haber alcanzado una de nuestras metas propuestas.

A nuestros padres, quienes se esforzaron mucho para darnos la educación y podernos formar como profesionales. Ellos son el pilar fundamental de nuestra existencia, por su amor, apoyo, comprensión, sacrificio y entrega total, por inculcarnos el deseo de superación, teniendo siempre presente los valores primordiales que debemos tener en cada paso de la vida.

A todas aquellas personas y empresas que se dedican al sector hidráulico.

A nuestros compañeros y profesores que ayudaron a superar las dificultades y aportaron su grano de arena.

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
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 LAS PTAP.....	13
4.2. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DE LODOS EN LAS PTAP.....	14
5. METODOLOGÍA .....	16
5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PTAP EL ARROYO .....	16
5.1.1. Características del agua cruda.....	17
5.1.2. Estructuras de Sedimentación .....	18
5.1.3. Estructuras de Filtración.....	19
5.2. METODOLOGÍA PARA EL PRIMER OBJETIVO .....	20
5.2.1. Determinación de caudales (Q) .....	20
5.3. METODOLOGÍA PARA EL SEGUNDO OBJETIVO.....	21
5.3.1. Consideraciones iniciales.....	21
5.3.2. Puntos de muestreo .....	22
5.3.3. Determinación de la cantidad de lodos evacuados .....	23
5.3.4. Sedimentabilidad.....	24
5.3.5. Producción de volumen de sedimento.....	25
5.3.6. Determinación de tamaño de partícula .....	26
5.3.7. Determinación del contenido de humedad en los lodos .....	27
6. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	28
6.1. Caudales generados durante el lavado .....	28
6.2. Cantidad de lodo generado durante el lavado.....	32
6.2.1. Sedimentadores.....	32
6.2.2. Filtros .....	33
6.3. Caracterización del lodo .....	36
6.3.1. Sedimentabilidad.....	36
6.3.2. Producción de volumen de sedimento.....	38

6.3.3. Ensayo para estimación de tamaño de partícula.....	40
6.3.4. Determinación del contenido de humedad en los lodos .....	42
6.3.5. Determinación del contenido de materia orgánica .....	42
7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	43
8. CONCLUSIONES .....	45
9. REFERENCIAS.....	46
ANEXOS.....	48
ANEXO 1. Determinación de caudal y volumen de muestra.....	48
ANEXO 2. Cálculo de sólidos totales.....	64
ANEXO 3. Curva de sedimentabilidad .....	68
ANEXO 4. Estimación de tamaño de partícula .....	71
ANEXO 5. Determinación del contenido de humedad.....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de Tratamiento de Agua Potable El Arroyo .....	16
Figura 2. Lavado de las unidades de sedimentación .....	18
Figura 3. Filtro N°1 .....	19
Figura 4. Determinación de caudales .....	20
Figura 5. Toma de muestras Filtro N°1 .....	22
Figura 6. Muestras Sedimentador N°1 y Filtro N°1 .....	23
Figura 7. Columna de sedimentación .....	24
Figura 8. Cono Imhoff.....	25
Figura 9. Tamices y filtros de papel .....	26
Figura 10. Muestras compuestas sometidas a evaporación .....	27
Figura 11. Curva de caudal para sedimentadores - agosto .....	28
Figura 12. Curva de caudal para sedimentadores - octubre.....	29
Figura 13. Curva de caudal para filtros - agosto.....	29
Figura 14. Curva de caudal para filtros - septiembre - octubre .....	30
Figura 15. Curva de caudal para filtros - octubre .....	30
Figura 16. Relación de agua tratada en la planta con el efluente de lavado.....	31
Figura 17. Sólidos Totales Vs Tiempo - Sedimentadores .....	32
Figura 18. Distribución acumulada de STT evacuados Vs Tiempo .....	33
Figura 19. Sólidos Totales Vs Tiempo - Filtros .....	33
Figura 20. Distribución acumulada de STT evacuados Vs Tiempo .....	34
Figura 21. Relación de sólidos totales generados en la planta .....	35
Figura 22. Vel. de sedimentación vs Fracción remanente Sedimentadores .....	36
Figura 23. Vel. de sedimentación vs Fracción remanente Filtros .....	37
Figura 24. Cono Imhoff - Sedimentadores.....	38
Figura 25. Volumen sedimentado en cono Imhoff para Sedimentadores .....	39
Figura 26. Volumen sedimentado en cono Imhoff para Filtros.....	39
Figura 27. Distribución acumulada de sólidos retenidos - Sedimentadores .....	41
Figura 28. Distribución acumulada de sólidos retenidos - Filtros.....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Calidad del agua cruda período de estudio.....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 2. Dosis y cantidad de productos químicos utilizados.....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 3. Resumen de flujos generados por las unidades de estudio .....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 4. Cantidad de STT generados en un lavado.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 5. Generación de STT generados por mes.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 6. Cantidad de lodo retenido para diferente tamaño de poro .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 7. Contenido de humedad de lodos en las unidades .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 8. Contenido de materia orgánica para sedimentadores .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 9. Contenido de materia orgánica para filtros.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 10. Comparación volúmenes de agua usados en el lavado .....</b>	<b>43</b>

## INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable se considera uno de los derechos fundamentales básicos y un componente de las políticas eficaces de protección de la salud (OMS, 2006). El agua es uno de los compuestos con mayor importancia para el ser humano, dado que esta se emplea para numerosos fines, uno de los más importantes para el hombre es el uso potable. Cabe resaltar que se debe realizar un proceso minucioso en el que se obtiene agua apta para el consumo humano, esto se lleva a cabo en plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) las cuales cuentan con un sistema convencional, en el que se realiza una serie de procesos como: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Durante el proceso se generan lodos como subproducto específicamente en las unidades de sedimentación y filtración.

El proceso de potabilización utiliza diferentes tipos de coagulantes y las dosis que se emplean dependen de la calidad de agua que ingresa a la PTAP. La consecuencia que deja la aplicación de estas dosis es la generación de residuos semisólidos conocidos como lodos ricos en aluminio o en hierro dependiendo del coagulante que se emplee (Panizza, 2008), estos lodos deberían ser recuperados para evitar el daño ambiental de su vertimiento directo y proporcionarles alguna utilidad. Para esto es necesario realizar una caracterización, conocer su cantidad, la composición microbiológica y física, dirigidos a un posible tratamiento y/o aprovechamiento.

El vertimiento de los lodos generados por la PTAP a las fuentes hídricas más cercanas sin ningún tratamiento, genera impactos ambientales que incluyen: el aislamiento de la fauna bentónica de los ríos, la disminución del oxígeno disuelto y la introducción de microorganismos patógenos concentrados, además de la presencia de sustancias como el aluminio que se encuentran en los lodos por la dosificación.

La adecuada caracterización de los lodos generados por la planta de tratamiento de agua potable El Arroyo, permitiría generar un cambio positivo, ya que a partir de esta investigación se podría establecer el tipo de control y aprovechamiento de los lodos y a su vez mitigar el impacto ambiental generado por estos residuos. Por esta razón es necesario realizar la caracterización de estos lodos con el fin de sugerir posibles usos.

El presente documento contiene los resultados del trabajo realizado en la caracterización de lodos en la PTAP El Arroyo de Santander de Quilichao, con parámetros que permitieron determinar los flujos de agua de lavado y la cantidad de lodos generados, al igual que su característica de sedimentación, contenido de agua y tamaño de partículas.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La potabilización del agua para el consumo humano es un proceso que inevitablemente generan lodos, las características de estos varían de una planta a otra, debido a que se ven influenciados en primera instancia por la calidad del agua superficial captada, y posteriormente por el tipo de coagulante que se utiliza, sea sales de hierro o de aluminio. Lo anterior convierte a los lodos en un residuo tóxico, con un gran contenido en agua lo cual ocasiona un difícil manejo.

Los lodos que se producen en los sedimentadores constituyen entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40% (Raigosa, 2012). Un estudio realizado en el departamento de Risaralda en la mayoría de los municipios estos lodos son reintegrados a las fuentes hídricas sin tratamiento alguno, lo cual contribuye a la contaminación del ambiente, el volumen de dichos lodos es variable, algunos autores citan que este valor representa un aproximado de 0.3 a 1% del agua tratada (Sandoval, SF), mientras otros afirman que este valor podría llegar hasta el 5% (Armenter y Cristia, 2002). El volumen de lodos que producen los sedimentadores es entre el 2 y el 4% del caudal que se procesa y los filtros entre el 1 y el 2% del mismo. (Valencia, 2000).

A medida que los recursos hídricos se vuelven más escasos y las normas ambientales se tornan más estrictas en cuanto a disposición de residuos, nace la necesidad de realizar investigaciones orientadas a tener un mayor conocimiento sobre las técnicas que puede utilizarse para aumentar la cantidad de agua producida, por metro cubico de agua cruda y para el tratamiento de los lodos generados en el proceso. (Martínez, 2012).

Las plantas de tratamiento de agua potable tienen como prioridad la producción de agua para el consumo humano, sin prestar atención a la producción de lodos que se generan en el proceso, al presentarse la descarga de estos residuos en las fuentes hídricas más cercana, esto genera un problema ambiental muy importante, ya que si 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).

Cabe agregar que estas prácticas no son permitidas de acuerdo al Decreto 3930 de 2010 expedido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 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.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La planta de tratamiento de agua potable El Arroyo, está ubicada en el municipio de Santander de Quilichao en el departamento del Cauca, esta planta potabiliza un promedio de 230 litros por segundo, es alimentada por dos afluentes, las captaciones se realizan en el río Quilichao y en el río Mondomo.

Esta planta de tratamiento tiene un sistema convencional compuesto por las unidades de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, los lodos se producen en todos los procesos, excepto en la coagulación; para llevar a cabo todas las fases de este proceso se utiliza como coagulante sulfato aluminio tipo B, cuyo objetivo es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración en forma de flóculos y así remover las partículas indeseadas, en consecuencia de este proceso se generan lodos con características desconocidas hasta el momento. Durante el lavado de las respectivas unidades de sedimentación y filtración el lodo es evacuado por medio de un sistema de gravedad mediante tuberías que tiene como destino final el río Quilichao.

La descarga de los lodos producidos por la PTAP El Arroyo al río Quilichao es un gran inconveniente para el cauce del río, ya que este no cuenta con el caudal suficiente (180 l/s) para diluir los volúmenes de lodos descargados al afluente, por lo cual, sería fundamental la caracterización de estos lodos generados por la planta de tratamiento, puesto que, es de vital importancia conocer la cantidad de lodos orgánicos e inorgánicos (compuesto principalmente de aluminio) y los efectos que estos pueden generar aguas abajo de la descarga, tanto el impacto de la calidad de agua de la fuente, como la fauna y flora que está dentro y fuera de la fuente de descarga.

En este sentido, existe un gran interés por parte de la empresa EMQUILICHAO encargada de la operación de la PTAP 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, con el fin de brindar herramientas que permitan establecer algún tipo de tratamiento para la mitigación del impacto de estos residuos en la fuente receptora.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Estudiar y caracterizar los lodos producidos por las unidades de sedimentación y filtración de la planta de tratamiento de agua potable El Arroyo, de Santander de Quilichao.

### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar los flujos de agua con lodo que se produce durante el lavado de sedimentadores y filtros.
- Determinar las características de los lodos en términos de humedad, concentración y materia orgánica.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. GENERALIDADES DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR LAS PTAP

En las plantas de tratamiento se realiza el proceso de separar los sólidos y contaminantes presentes en el agua natural, este proceso se realiza mediante un conjunto de sistemas y operaciones unitarias tipo fisicoquímicas con el propósito de que al pasar por este sistema se reduzca o se elimine en su totalidad la contaminación presente en el agua, este proceso inicia con la mezcla rápida, la cual puede ser realizada mediante canaleta Parshall donde se dosifica un coagulante predeterminado, que depende de las características con que el agua cruda llegue a la planta, seguido de esto el agua realiza un recorrido por una serie de recámaras, floculación, el cual es un proceso mediante el cual, por el efecto del coagulante adicionado las sustancias coloidales presentes en el agua se aglutinan, facilitando la decantación y posterior filtrado.

El proceso de floculación es precedido por la coagulación, por eso se suele hablar de los procesos de coagulación-floculación. Estos facilitan la retirada de las sustancias en suspensión y de las partículas coloidales, que son responsables de la turbidez del agua. La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante, el cual une las partículas entre sí.

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizantes en microfloculos y después en floculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los sedimentadores por efecto de la gravedad. Estos lodos son ricos en aluminio ya que el coagulante más común y el más utilizado es el sulfato de aluminio. Los lodos generados por las plantas de tratamiento generalmente van a parar a los afluentes hídricos más cercanos.

Los lodos procedentes de las PTAP están compuestos principalmente por las materias presentes en el agua cruda y que por oxidación, coagulación y precipitación han sido retenidos en los sedimentadores y filtros así como por sustancias (óxidos e hidróxidos) procedentes del coagulante y otros reactivos como cal, permanganato, carbón, que se han empleado en el tratamiento. Las características de los lodos en plantas de tratamiento varían en función de la calidad del agua, tipo de proceso, cantidad y clase de coagulante utilizado y de los compuestos adicionales para el tratamiento. Estos factores son los que condicionan la clase del lodo y los problemas de orden ambiental que estos generan. Por otra parte, los lodos son en últimas materia concentrada, en la cual podemos encontrar desde metales hasta bacterias de todas las clases, que se han aglomerado allí. (Fernández, 2003).

## 4.2. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DE LODOS EN LAS PTAP

Respecto a los lodos que se generan en las estaciones de tratamiento, estos se recogen a través de purgas de los decantadores, donde generalmente se precipitan por gravedad y/o en lavado de los filtros, dado que estos lodos se extraen de forma intermitente y las concentraciones son bastante discontinuas, es aconsejable enviarlos a un depósito de mezclas y de almacenamiento, donde se homogeneice la concentración y a la vez se disponga de un volumen tal que permita el funcionamiento continuado de la planta de fangos (Ramírez, 2008).

Pabón y Rodríguez (2015) en el estudio que realizaron en la PTAP El Tablazo en la ciudad de Popayán, la cual maneja un caudal de 800 l/s, obtuvieron las siguientes características: en promedio para las unidades de filtración se generan 8232 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 4.24% del agua tratada mensualmente en la planta. 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. Existe mayor cantidad de compuestos inorgánicos en el lodo, puesto que la cantidad de sólidos volátiles presentes bordea el 32.12% de los sólidos totales. Los lodos están compuestos por agua en un 99.9% para las unidades de filtración y un 99.1% para las de sedimentación.

Martínez (2012) realizó una investigación llamada, *Estudio para tratamiento, manejo y disposición final de los lodos generado por las plantas de tratamiento de agua potable*, indica que el lodo proveniente de potabilizadoras es un fluido no newtoniano, voluminoso de aspecto gelatinoso, compuesto principalmente por agua (más del 90%), hidróxido de aluminio, partículas inorgánicas (arcilla o arena), coloides, residuos de reactivos químicos añadidos durante el proceso de tratamiento, plancton y materia orgánica e inorgánica removida del agua.

Los lodos residuales de las plantas de tratamiento de agua potable están constituidos por sólidos suspendidos provenientes de los residuos de los procesos coagulación, floculación, sedimentación y retro lavado de los filtros. Generalmente tienen un contenido de sólido en el rango de 3000 a 15000 mg/l. (Ramírez, 2008).

Adicionalmente, estos lodos poseen una concentración de sólidos suspendidos correspondiente a valores de 75% al 90% de los sólidos totales (ST) y la concentración de sólidos volátiles del 20% al 35% de los ST. (Martínez, 2012).

En cuanto a la demanda bioquímica de oxígeno, generalmente es de 30 a 100 mg/l y el pH del lodo está en un rango de 5 a 7 (Ramírez, 2008).

Torres (2012), realizó una investigación en una PTAP convencional con coagulación con sulfato de aluminio, floculación, sedimentación, filtración, desinfección, con un caudal de 600 l/s. El análisis granulométrico mostró que las partículas sólidas que conforman los lodos son finas y de tamaño reducido, 55.5% con tamaño inferior a 0.025 mm y con predominancia de limos sobre arcillas.

Guimarães y Morita (2003) reportan que el 70% de las partículas del lodo presentan diámetros entre 0.002 y 0.020 mm y Mejía y Delvasto (1998) reportan tamaños entre 0.040 y 0.060 mm.

El Límite de Atterberg del lodo mostró un Límite líquido (L.L) de 78.2%, un Límite plástico (L.P) de 74% y un índice de plasticidad (Pi) de 4.2%; teniendo en cuenta que este último es inferior a 7, el lodo se clasifica como material poco plástico y parcialmente cohesivo, características que son típicas de la arena. El lavado y vaciado de los sedimentadores genera la mayor cantidad de lodos (90.1% del total) con 99.77% de humedad. (Torres, 2012).

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PTAP EL ARROYO

La planta de tratamiento de agua potable El Arroyo (Figura 1) se encuentra ubicada en la cabecera municipal de Santander de Quilichao, entre los barrios El Arroyo y Lourdes, tiene como fuente de abastecimiento los ríos Quilichao y Mondomo; cuenta con un caudal máximo de 250 l/s y un caudal medio de 230 l/s. La planta de tratamiento es de tipo convencional, en la cual se realizan los procesos de aireación, coagulación (Sulfato de Aluminio), floculación, sedimentación, filtración, estabilización del pH y desinfección.

La calidad del agua cruda, el factor climático y otros parámetros son importantes para determinar la dosis de coagulante, siendo nula cuando la turbiedad esté por debajo de 4 UNT.



Figura 1. Planta de Tratamiento de Agua Potable El Arroyo.

### 5.1.1. Características del agua cruda

En la tabla 1 se reporta los rangos de calidad de agua cruda presentadas durante el periodo de evaluación realizado (Agosto Octubre de 2019). Tal como se aprecia, las turbiedades estuvieron por encima de 2 unidades, por lo cual la mayor parte del tiempo fue necesario el uso de coagulantes químicos (Sulfato de aluminio, tipo B), con una dosis promedio de 11.3 ppm tal como se muestra en la tabla 2.

PARÁMETROS AGUA CRUDA	
Turbiedad	Variable 2-900 UNT
Color Aparente	15-800 UC
pH	6.5-7.5
Cloro Residual	N.A
Dureza Total	36-44 ppm
Dureza Cálcica	20-26 ppm
Contenido de Aluminio	0.03-0.06 ppm
Cloruros	7-9 ppm
Alcalinidad Total	20-28 ppm
Hierro	0.04-0.025 ppm
Conductividad	60-130 $\mu$ S/cm
Sulfatos	5-10 ppm
Cianuros	0.003-0.008 ppm
Nitratos	2.5-3 ppm
Nitritos	0.03-0.06 ppm
Coliformes Totales	POSITIVO (NO LO CUANTIFICAN)
Coliformes Fecales	POSITIVO (NO LO CUANTIFICAN)

Tabla 1. Calidad del agua cruda que ingresó al sistema de tratamiento durante el periodo de estudio (agosto-octubre de 2019).

DOSIS ÓPTIMA/DESCARGA DE DOSIFICACIONES (AGOSTO-OCTUBRE)					
ALUMBRE			CAL APAGADA		CLORO
ppm	gr/min	gal/h sin 10.5%	ppm	gr/min	ppm
11.30	78.53	8.32	0.00	0.00	1.14

Tabla 2. Dosis y cantidad de productos químicos utilizados durante el periodo de evaluación.

### 5.1.2. Estructuras de Sedimentación

La planta cuenta con dos (2) unidades de sedimentación acelerada (Figura 2), cada una constituida por dos (2) cámaras iguales de 2.7x16 m y una profundidad promedio útil de 3.15 m. El lavado de estas estructuras se realiza cada 8 días. Para realizar el lavado 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 limpia con agua a presión las placas de asbesto cemento y las paredes del sedimentador; 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 dependen del criterio y laboriosidad del operador.



Figura 2. Lavado de las unidades de sedimentación.

### 5.1.3. Estructuras de Filtración

Existen cuatro (4) filtros rápidos a gravedad de tasa declinante con lecho mixto de arena y antracita, con un área total de filtración de  $87.86 \text{ m}^2$  y una tasa de filtración de  $245.84 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$  (Figura 3). Para realizar el lavado, 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 inyecta agua desde un tanque alto y se realiza el retrolavado del lecho filtrante. El tanque tiene un volumen de almacenamiento de aproximadamente  $192.5 \text{ m}^3$ .



Figura 3. Filtro N°1.

## 5.2. METODOLOGÍA PARA EL PRIMER OBJETIVO

### 5.2.1. Determinación de caudales (Q)

En los sedimentadores se midió la geometría de esta unidad y se determinó la altura de agua en el tiempo dentro de la estructura (Figura 4<sup>a</sup>), con base en la geometría se midió el volumen evacuado en un delta de tiempo, con lo cual se determinó el caudal promedio; las alturas de evacuación del agua se midieron cada minuto durante el tiempo de vaciado que fue aproximadamente de 20 minutos, el tiempo de lavado fue de 60 minutos en condiciones normales y de 80 minutos en promedio en condiciones críticas, determinando así un caudal aproximado para cada sedimentador, teniendo en cuenta también el caudal del agua a presión utilizada para lavar estas unidades.

Para el caso de los filtros, se midió el caudal en la pared del canal de evacuación de agua de lavado, la cual funciona como un vertedero rectangular de cresta delgada (Figura 4<sup>b</sup>), midiéndose la altura en el tiempo durante el lavado y se empleó la ecuación para la medición de la descarga en vertedero rectangular (Ecuación 1). (Anexo 1).

$$Q = 1.84 * L * H^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$



Figura 4<sup>a</sup>.



Figura 4<sup>b</sup>.

Figura 4. Determinación de caudales.  
Unidades de sedimentación y filtración.

## 5.3. METODOLOGÍA PARA EL SEGUNDO OBJETIVO

### 5.3.1. Consideraciones iniciales

La PTAP de Santander de Quilichao opera con coagulante solo cuando el agua cruda ingresa con turbiedad mayor a 4 UNT, de lo contrario no se realiza dosificación alguna, dado que la planta siempre operó con el uso de coagulante los lodos evaluados contaron con la presencia de sulfato de aluminio.

Se considerarán los siguientes parámetros para realizar el objetivo de caracterización de lodos generados en la planta: sedimentabilidad de las partículas en el agua, producción de volumen de sedimentos, medidas indirectas del tamaño de partícula a través de filtraciones sucesivas, sólidos totales y contenido de humedad del lodo.

Para los ensayos se tendrá en cuenta dos tipos de muestra, las que se generan en las unidades de sedimentación y filtración, esto con el fin de poder realizar comparaciones. Para el sedimentador se hará una muestra compuesta, para la cual se tomaron 12 muestras puntuales de agua de lavado, una cada cinco minutos durante un lapso de tiempo aproximado de 60 a 80 minutos, que es en promedio el tiempo que dura el lavado de la estructura. En el caso del filtro, se tomaron muestras cada minuto por un lapso de tiempo estimado de 8 minutos, esperando obtener como mínimo 8 muestras, las cuales conforman la muestra compuesta generada por el agua de lavado de las unidades de filtración.

El volumen de las muestras puntuales para hacer la compuesta depende del caudal en cada tiempo, con el caudal calculado y tomando un volumen aproximado del lavado total de la unidad, se procedió a calcular el volumen de la muestra para así obtener la compuesta de 3 litros. (Ecuación 2) (Anexo 1).

$$\forall i = \left( \frac{\forall}{n * Qp} \right) * Qi \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

$\forall i$  : Volumen de cada alícuota

$\forall$  : Volumen total a componer (generalmente 2000 ml como mínimo)

$Qp$  : Caudal promedio durante la jornada de aforo

$Qi$  : Caudal instantáneo de cada muestra individual

$n$  : Número de muestras tomadas.

### 5.3.2. Puntos de muestreo

Las muestras de lodos fueron tomadas de forma independiente para los sedimentadores y filtros. Para los sedimentadores fue en un punto estratégico como lo es la cámara de recolección de agua de lavado ubicada a la salida del sistema de drenaje general de la planta. Las muestras se obtuvieron a través de la toma directa por medio de un recipiente. Para las muestras de lodos en los filtros fueron tomadas directamente en esta unidad (Figura 5). Previamente abierta la válvula de salida de cada unidad, contaron con un tiempo de purga de aproximadamente 20 minutos para el sedimentador y 9 minutos para el filtro, estos datos fueron suministrados por el operador de la planta de tratamiento de agua potable, tiempo en el cual se evacúan los lodos del fondo y comienzan a salir los lodos depositados recientemente. De esta forma, se obtuvieron muestras para determinar los flujos de agua de lavado, midiendo los caudales de desagüe en el tiempo de lavado y la concentración de sólidos. El principal factor aplicado es el tiempo de lavado en las dos unidades.



Figura 5. Toma de muestras Filtro N°1.  
PTAP El Arroyo - 21 de Junio de 2019.

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

Para determinar la cantidad de lodo evacuado se precisó la turbiedad, esta medida se hizo en cada punto donde se determinaron los datos de caudal, tanto para sedimentadores como para filtros, se construyó la curva de turbiedad en el tiempo, la cual sirvió de base para seleccionar los puntos más representativos para medir sólidos totales; generando una curva de STT vs Tiempo, con lo cual se estableció la cantidad de sólidos que se genera en promedio por el lavado de cada unidad.

La determinación de los sólidos totales se realizó con base en las *Guías de laboratorio de química sanitaria* de la Universidad del Cauca, en cada caso se utilizó 25 ml de muestra de agua perfectamente agitada en una cápsula de porcelana y se sometió a evaporación hasta sequedad, luego se dejó en el horno durante 20 minutos a  $103 \pm 5$  °C, se dejó enfriar la cápsula con la muestra en un desecador y se pesó con aproximación a 0.1 mg en la balanza de precisión. (Anexo 2).



Figura 6. Muestras Sedimentador N°1 y Filtro N°1.  
Laboratorio UDC - 16 de Octubre de 2019.

#### 5.3.4. Sedimentabilidad

Para conocer el comportamiento respecto a la sedimentabilidad de estos lodos se determinó la curva de sedimentación tanto para los sedimentadores y filtros; también se estableció la eficiencia teórica de remoción para algunas velocidades de sedimentación a la muestra compuesta, mediante el ensayo de la columna de sedimentación, la cual se realizó en una columna en PVC de 6" de diámetro y una altura de 1 m, con un grifo de muestreo a 0.54 m de altura (Figura 7), donde se tomaron muestras cada tres minutos para los sedimentadores y cada dos minutos para los filtros.

Para desarrollar la curva de sedimentabilidad, se realizó la gráfica de velocidad de sedimentación vs fracción remanente de turbiedad. En el Anexo 3 se presenta la metodología para desarrollar la curva y determinar la eficiencia del proceso.



Figura 7. Columna de sedimentación.  
PTAP El Arroyo - 12 de Agosto de 2019.

### 5.3.5. Producción de volumen de sedimento

La producción del volumen de sedimento se determinó con la prueba del cono Imhoff (Figura 8), para esta prueba se tomó 1 L de la muestra compuesta, luego se dejaron sedimentar los sólidos por 80 minutos, registrando el volumen de sólidos sedimentables cada 5 minutos y realizando la gráfica de Volumen de lodo sedimentado vs Tiempo.



Figura 8. Cono Imhoff.  
Laboratorio UDC - 16 de Octubre de 2019.

### 5.3.6. Determinación de tamaño de partícula

Este ensayo se realizó con la muestra compuesta de 1 L, con la ayuda de una batería de diferentes tamices previamente tarados, los cuales fueron N° 50, N° 100 y N° 200 para las partículas de mayor tamaño, también se requirió de filtros de papel de 12, 1.5 y 0.45 micras (Figura 9) para las partículas más finas, la muestra se depositó en el centro de los tamices, dejándola caer completamente; se hicieron los lavados que fueron necesarios con agua destilada, con tal de evitar la aglomeración de partículas por la grasa que pueda estar en el sedimento; el residuo de cada tamiz se lavó con agua destilada, retirando el primer tamiz y lavando la parte de abajo, permitiendo que cayera el agua en el segundo tamiz, este proceso se repitió con los demás tamices; después de esto, se dejó escurrir, se llevó el retenido de cada tamiz y el papel filtro a secado en estufa a  $100^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ , posteriormente se puso en un desecador y se pesaron obteniendo el peso retenido en cada tamiz.



Figura 9. Tamices y filtros de papel.  
Laboratorio UDC - 16 de Octubre de 2019.

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

La humedad de las unidades de estudio se determinó por pérdida de peso, secando las muestras en un horno a 105°C usando capsulas de porcelana, esta prueba se realizó a la muestra compuesta del lavado de las unidades y al lodo sedimentado (lodo espesado), este parámetro es de mucha importancia ya que la humedad aporta volumen al lodo y contribuye al dimensionamiento de estructuras que ayuden a su tratamiento.



Figura 10. Muestras compuestas sometidas a evaporación.  
Laboratorio UDC - 16 de Octubre de 2019.

## 6. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1. Caudales generados durante el lavado

En la Figura 11 se presentan las curvas de caudal generadas por los muestreos realizados en agosto a las unidades de sedimentación, las curvas muestran un comportamiento similar en las dos unidades evaluadas, en ambos casos el lavado presentó una duración aproximada de 60 minutos y generó caudales entre 70 y 500 l/s durante el tiempo de vaciado, el cual dura aproximadamente 20 minutos, para un promedio de 233.24 l/s. El volumen de agua de lavado generado por unidad de sedimentación se estimó en 1181.09 m<sup>3</sup>/mes, por lo tanto, para las dos unidades de la planta de tratamiento el gasto mensual de agua de lavado sería de 2362.17 m<sup>3</sup>/mes.

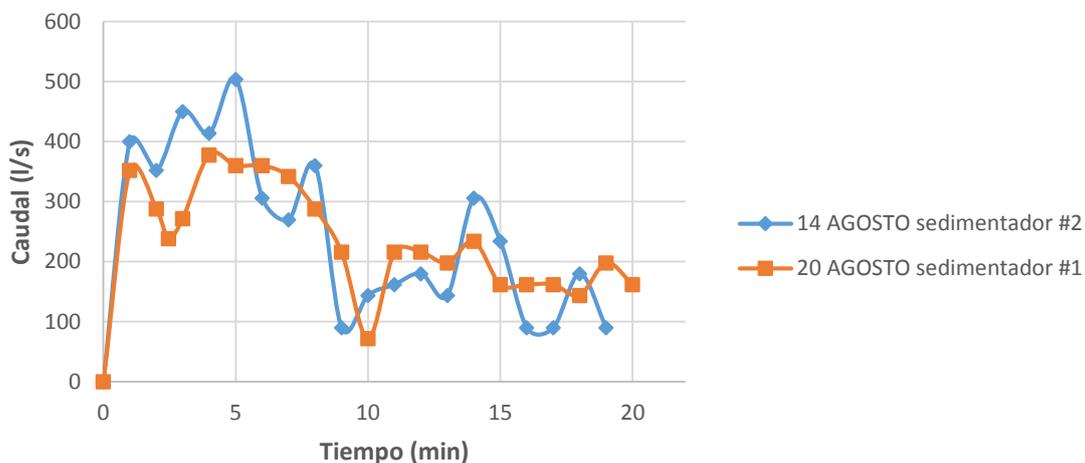


Figura 11. Curva de caudal para sedimentadores - agosto.

En la Figura 12 se presentan las curvas de caudal generadas por los muestreos realizados en octubre a las unidades de sedimentación, estas unidades estuvieron sin lavar aproximadamente un mes y medio debido a las condiciones climáticas. Las curvas muestran un comportamiento similar al encontrado anteriormente, en ambos casos el lavado presentó una duración promedio de 80 minutos, y generó caudales entre 50 y 600 l/s durante el tiempo de vaciado (20 minutos) para un promedio de 222.34 l/s. El volumen de agua de lavado generado por unidad de sedimentación se estimó en 1203.36 m<sup>3</sup>/mes, lo cual indica que para las 2 unidades de la PTAP sería 2406.72 m<sup>3</sup>/mes.

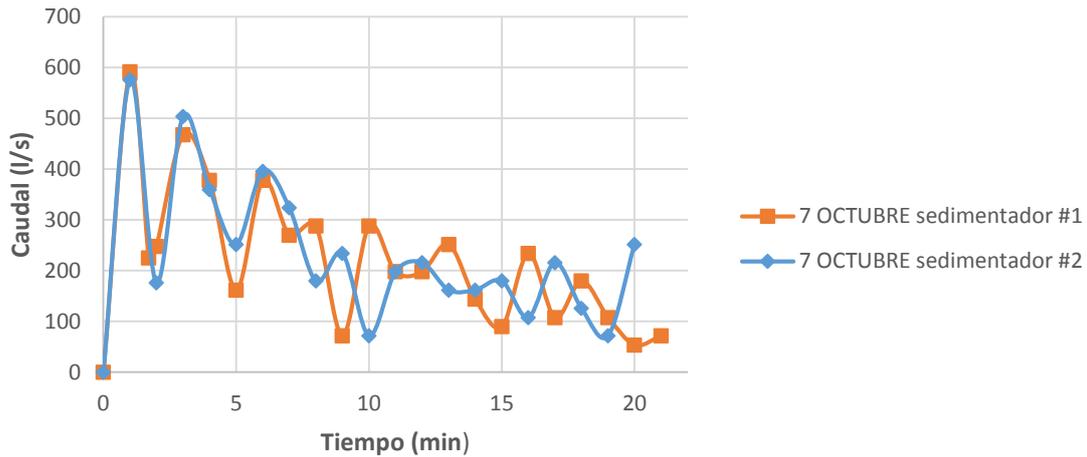


Figura 12. Curva de caudal para sedimentadores - octubre.

En las figuras 13, 14 y 15 se presentan los datos obtenidos por los caudales medidos durante el lavado de las unidades de filtración. En el mes de agosto las curvas desarrolladas muestran un comportamiento similar, con una duración promedio de 9 minutos por lavado en cada una de las unidades, teniendo en cuenta que en el mes de agosto el total de lavados fue de 45, lo que indica que el volumen total de agua de lavado fue de 8662.50 m<sup>3</sup>/mes.

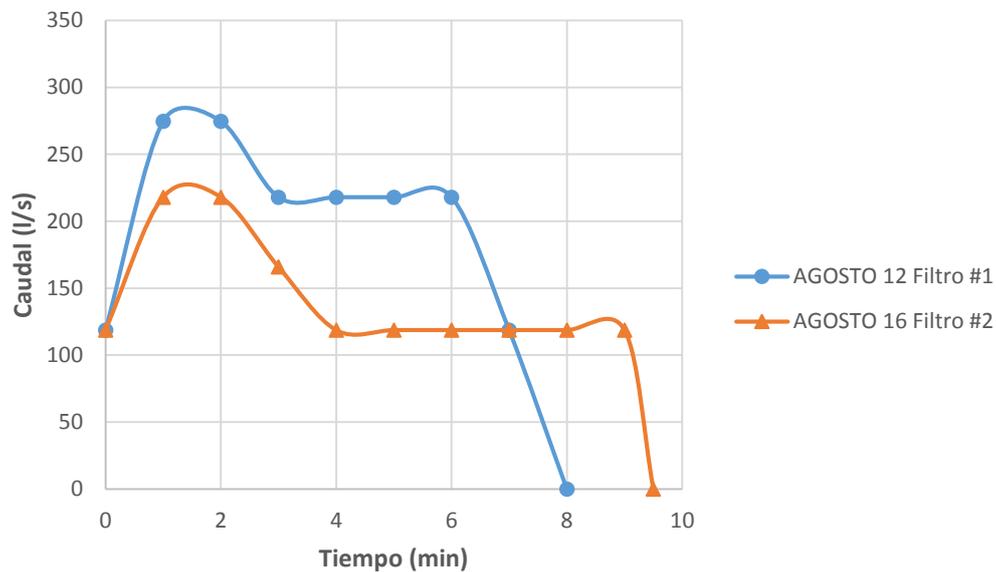


Figura 13. Curva de caudal para filtros - agosto.

Para el mes de septiembre se realizaron en total 33 lavados, lo cual indica que en este mes se gastó 6352.50 m<sup>3</sup> de agua de lavado.

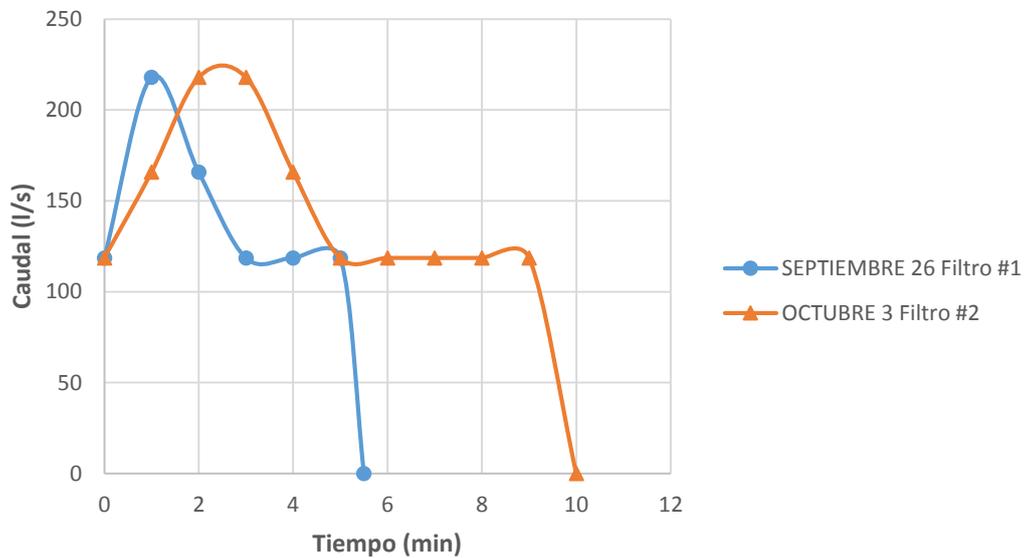


Figura 14. Curva de caudal para filtros - septiembre - octubre.

En el mes de octubre el total de lavados fue de 39, para los 4 filtros que operan en la plata se presentó un volumen de agua de lavado de 7507.50 m<sup>3</sup>/mes.

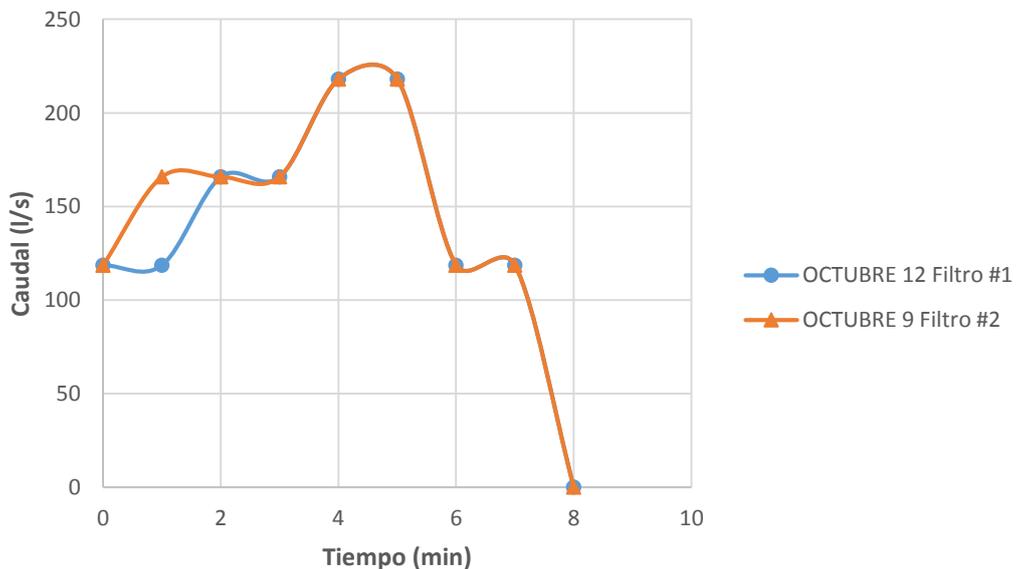


Figura 15. Curva de caudal para filtros - octubre.

Con los datos obtenidos y resumidos en la tabla 3, considerando que los sedimentadores se lavan con una frecuencia de una vez por semana y los filtros con una carrera de lavado de 36 horas en periodo de invierno y de 54 horas en periodo de verano, se estimó el volumen total de agua de lavado por mes generado por las unidades de filtración y sedimentación, el cual alcanza un volumen aproximado de 9869.67 m<sup>3</sup>/mes de agua de lavado.

Unidad \ Parámetro	Volumen De Agua De Lavado Generado Por Unidad (M <sup>3</sup> )	Volumen Total De Agua De Lavado Generado (M <sup>3</sup> /Mes)	Caudal Promedio (L/S)	Caudal Pico (L/S)	Tiempo De Lavado (Min)
SEDIMENTADORES	295.27	2362.17	233.24	441.00	60
FILTROS	192.50	7507.50	135.51	217.99	9

Tabla 3. Resumen de flujos generados por las unidades de estudio.

Con los resultados se calcularon los porcentajes generados con relación al caudal de entrada a la planta que en promedio es de 0.25 m<sup>3</sup>/s, se determinó que al mes este volumen de agua de lavado corresponde al 1.52% del agua tratada, del cual 2362.17 m<sup>3</sup>/mes es generado en las unidades de sedimentación y 7507.50 m<sup>3</sup>/mes restante en las unidades de filtración, que equivalen al 0.36% y 1.16% respectivamente. (Figura 16).

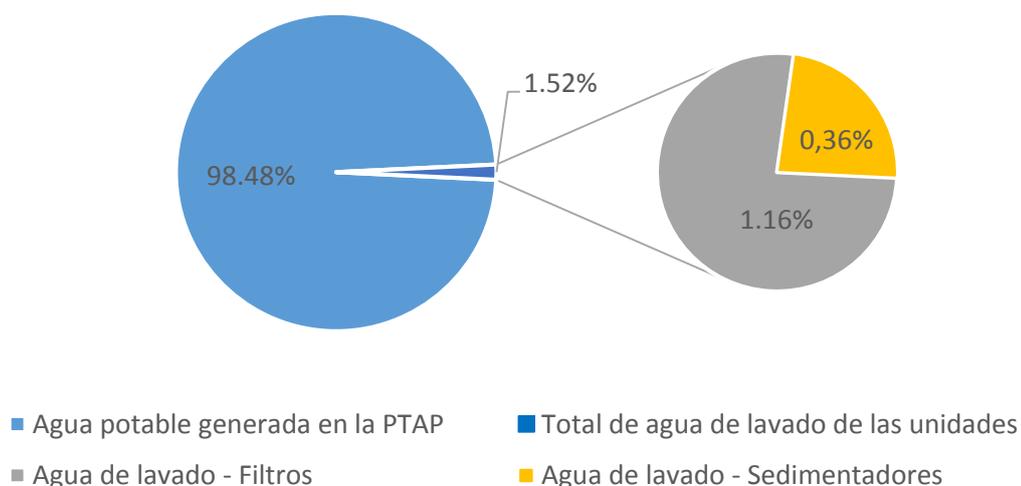


Figura 16. Relación de agua tratada en la planta con el efluente de lavado de sedimentadores y filtros rápidos.

## 6.2. Cantidad de lodo generado durante el lavado

### 6.2.1. Sedimentadores

La cantidad de lodo evacuado durante el lavado fue medido con base en sólidos totales. En la Figura 17 se presenta la curva de evacuación de lodos para los sedimentadores. El muestreo de los lodos generados se realizó en las dos unidades de sedimentación el 7 de octubre, con métodos de lavado diferentes ya que cada lavado se hace a criterio del operador, los operadores comenzaron a realizar el lavado de las placas con agua a presión en el sedimentador N°1 al minuto 10, mientras que en el sedimentador N°2 fue en el minuto 8, lo cual explica la similitud en la salida del lodo; por otro lado la diferencia en los picos de lodo se debe a la manera en que los operadores lavaron las unidades, el tiempo de vaciado para los sedimentadores fue de aproximadamente 20 minutos, en el cual, se generan caudales variables como está representado en las gráficas anteriores, después del tiempo de vaciado hasta terminar el lavado, se presenta un caudal constante de 3.2 l/s proveniente de las mangueras, en esta fecha primero lavaron el sedimentador N°2 cuyo lavado duro 94 minutos, en el caso del sedimentador N°1 el lavado fue en menos tiempo (70 minutos) 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 promedio de lavado de 80 minutos<sup>1</sup> se podría reducir a  $50 \pm 5$  minutos donde ya se habría evacuado un 98.5% de la totalidad del lodo generado, para el caso del sedimentador N°1 se ha evacuado el 98% del lodo en 50 minutos y para el sedimentador N°2 este mismo porcentaje en 60 minutos (Figura 18).

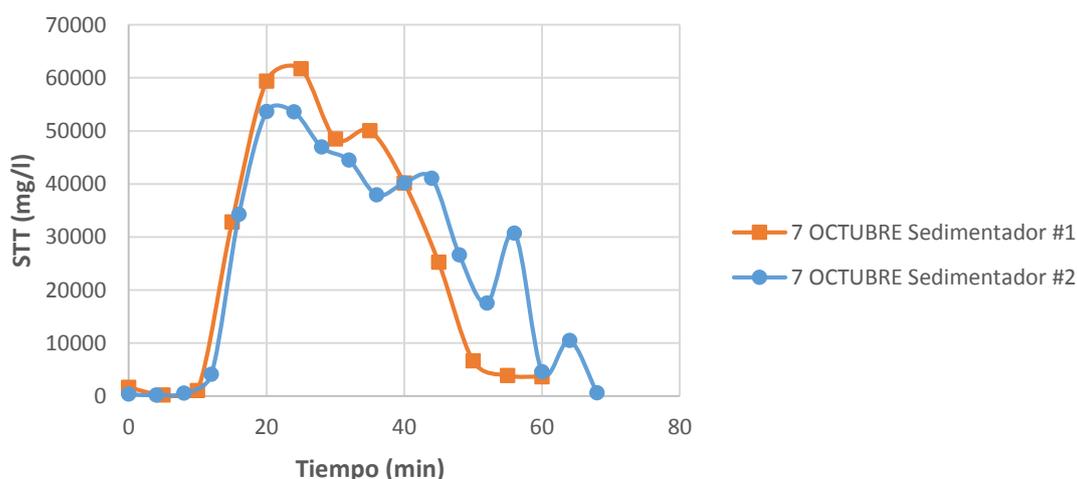


Figura 17. Sólidos Totales Vs Tiempo - Sedimentadores.

1. Los tiempos de lavado para los sedimentadores N°1 y N°2 fueron de 70 y 94 minutos respectivamente, esto debido al tiempo que llevaban sin lavar (casi un mes y medio).

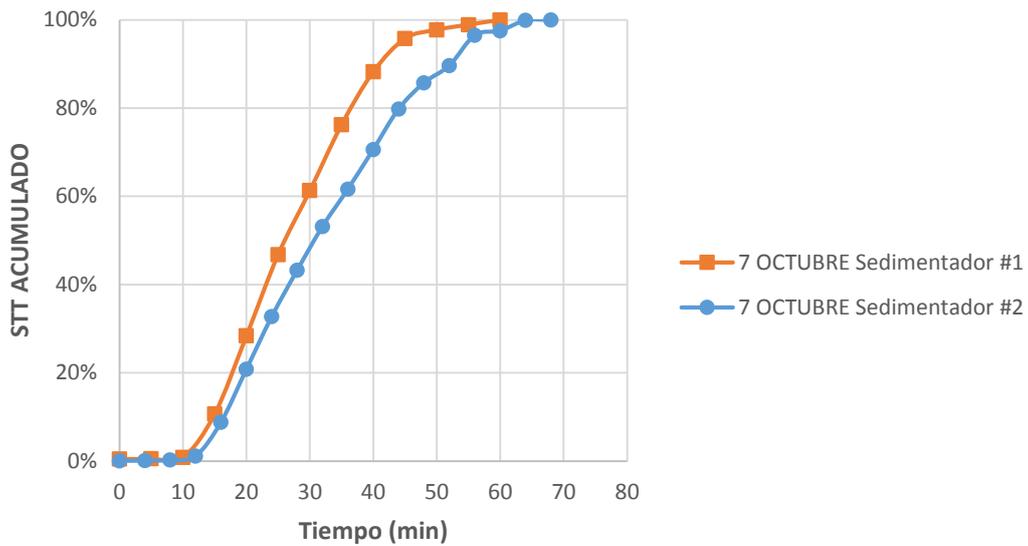


Figura 18. Distribución acumulada de STT evacuados Vs Tiempo para unidades de sedimentación.

### 6.2.2. Filtros

En la Figura 19 se presenta la curva de evacuación de lodos para los filtros, se muestran dos caracterizaciones realizadas en días diferentes. Las curvas presentaron un comportamiento similar. La mayor evacuación de lodos se presentó durante los primeros 3 minutos donde se alcanzaron concentraciones de sólidos totales entre 350 y 100 mg/l.

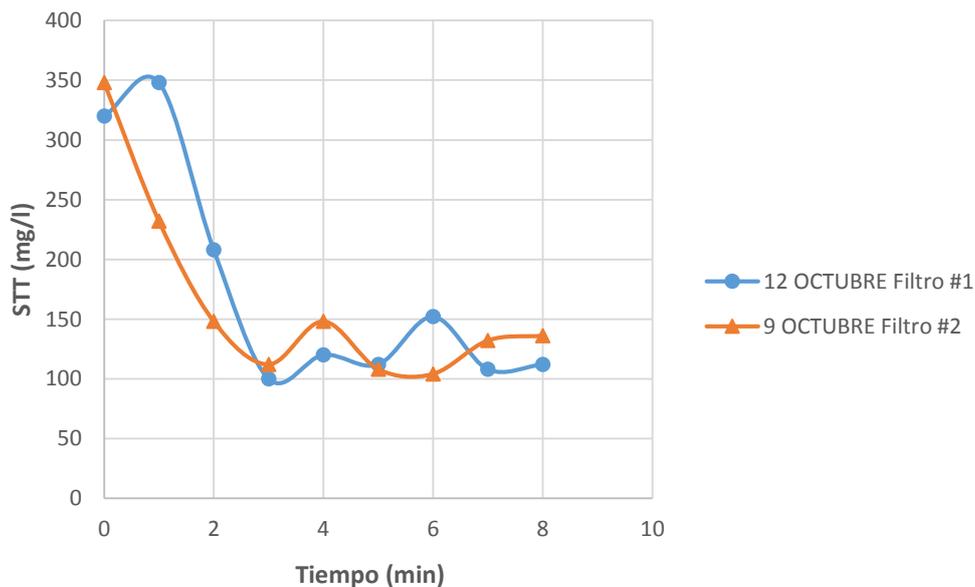


Figura 19. Sólidos Totales Totales Vs Tiempo - Filtros.

En la figura 20 se presenta el porcentaje de sólido evacuado en el tiempo. Estas curvas indican que alrededor del 90% de los sólidos salen hasta el minuto 8 y que para su evacuación se usa aproximadamente 40% del agua de lavado.

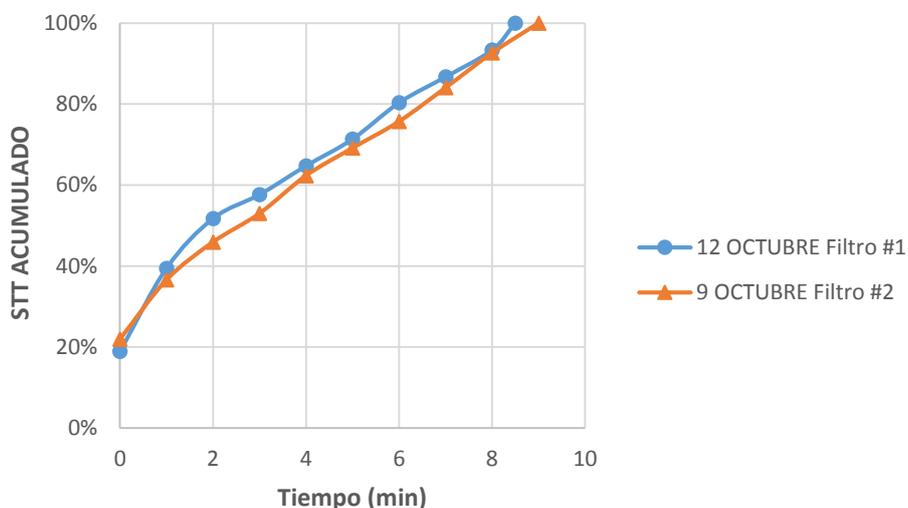


Figura 20. Distribución acumulada de STT evacuados Vs Tiempo para unidades de filtración.

Con base en los datos encontrados de cantidad de agua evacuada en el tiempo y la concentración de sólidos totales, se determinó la cantidad de sólido evacuado tanto para los sedimentadores como para los filtros; en la tabla 4 se resume esta información, mientras que en el Anexo 2 se presentan los datos en detalle.

Cantidad de sólidos generados en un lavado (Kg)		
<b>STT generados en un lavado - sedimentadores</b>		
Sedimentador N°1	Sedimentador N°2	Promedio
07-oct	07-oct	
1607.76	3652.14	2629.95
<b>STT generados en un lavado - filtros</b>		
Filtro N°1	Filtro N°2	Promedio
12-oct	09-oct	
12.64	12.28	12.46

Tabla 4. Cantidad de STT generados en un lavado de sedimentador y filtro.

Teniendo en cuenta el número de lavados que se hace al mes (8 lavados para los sedimentadores y 39 en promedio para los filtros) se puede estimar 21.51 ton/mes en la planta de tratamiento (Tabla 5).

Cantidad de STT por mes		
ton/mes generados en los sedimentadores	ton/mes generados en los filtros	ton/mes generados en la planta
21.03	0.48	21.51

Tabla 5. Generación de Sólidos Totales Totales (STT) por mes.

En la Figura 21 se detalla la distribución de las 21.51 ton/mes de STT que son generadas en la planta, se observa que la mayor producción es originada por los sedimentadores con un 97.77% aportando 21.03 ton/mes, mientras en los filtros se genera solo el 2.23% de estos con 0.48 ton/mes.

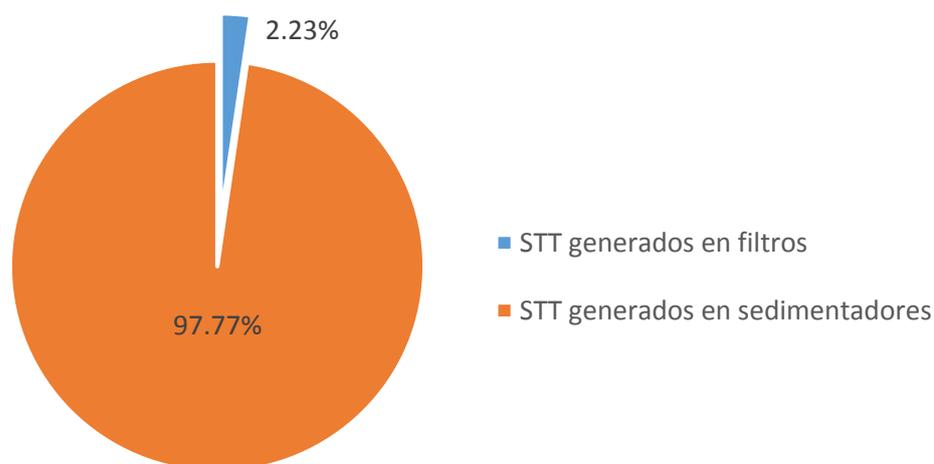


Figura 21. Relación de sólidos totales generados en la planta.

## 6.3. Caracterización del lodo

### 6.3.1. Sedimentabilidad

La información sobre el comportamiento de la turbiedad con base en la sedimentación en columna del efluente de lavado de los sedimentadores y filtros se presenta en el anexo 3. Una vez procesada esta información en términos de velocidad de sedimentación y fracción remanente de turbiedad (figuras 22 y 23), se determinaron las velocidades de sedimentación que generarán una eficiencia teórica de sedimentación del 80 y 90%.

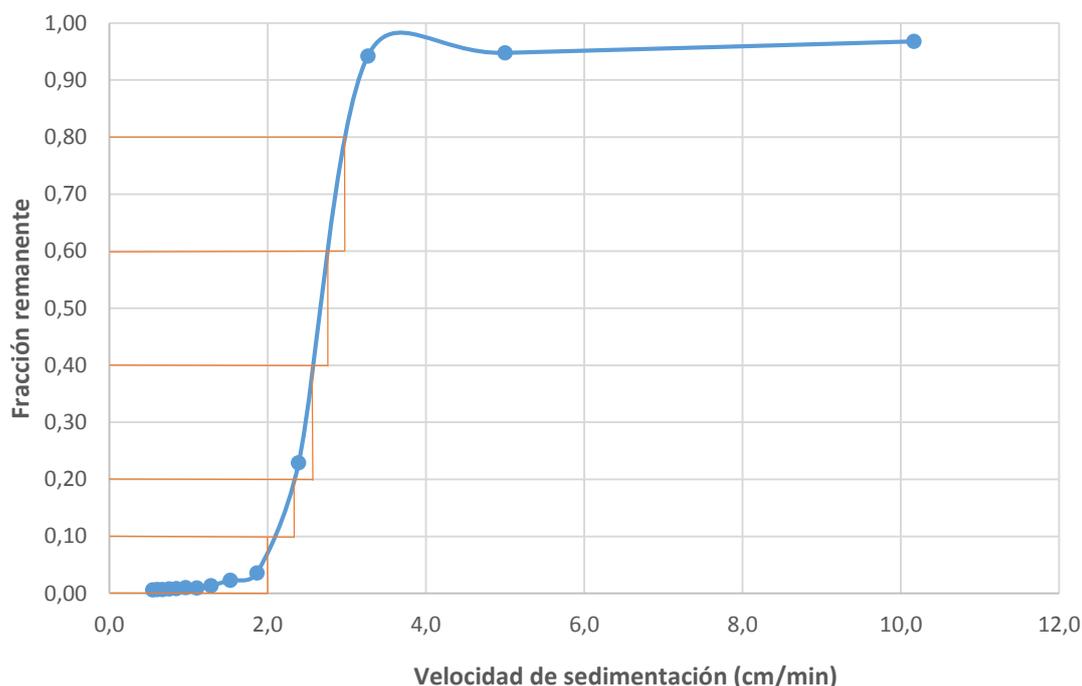


Figura 22. Velocidad de sedimentación vs Fracción remanente sedimentadores.

Nota: Esta gráfica corresponde al Sedimentador N°1 lavado el 13 de agosto de 2019.

Para la determinar la velocidad de sedimentación que genera una eficiencia teórica de remoción del 80 y 90%, se utilizó la ecuación 3 y la curva de sedimentabilidad de la Figura 22.

La remoción total  $R_T$  será:  $R_T = (1 - C) + \frac{1}{v_s} \int_0^{C_0} V \cdot dc$  (Ecuación 3)

Para una  $V_s = 3$  cm/min  $C = 0.8$

$$R_T = (1 - 0.8) + \frac{1}{3} * ((2 * 0.1) + (2.3 * 0.1) + (2.5 * 0.2) + (2.8 * 0.2) + (3 * 0.2))$$

$$R_T = 0.9$$

Para una  $V_s = 3.5 \text{ cm/min}$   $C = 0.98$

$$R_T = (1 - 0.98) + \frac{1}{3.5} * (2.09 + (3.5 * 0.18))$$

$$R_T = 0.8$$

Según los resultados, para alcanzar una eficiencia de remoción del 90% se requiere de una velocidad de sedimentación (carga superficial) de 3 cm/min, equivalente a 43.2 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-dia) y para alcanzar el 80% se requiere de una carga superficial de 3.5 cm/min el equivalente a 50.4 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-dia).

La Figura 23 describe el comportamiento de velocidad de sedimentación vs fracción remanente para la unidad de filtración. Es claro que las velocidades de sedimentación de las partículas presentes en el agua de lavado de los filtros presentan menores velocidades de las encontradas en el efluente del sedimentador.

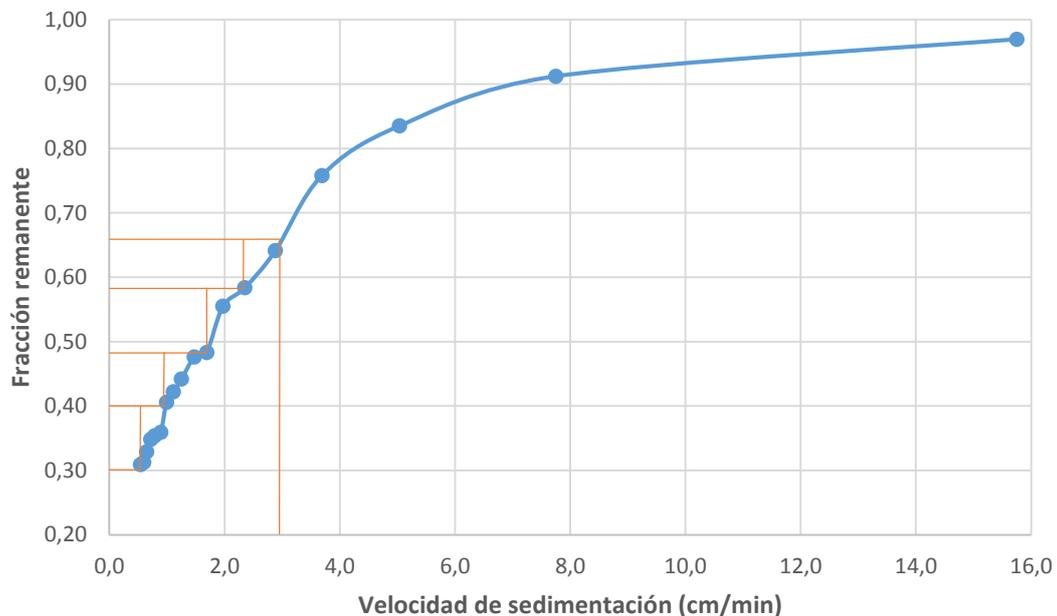


Figura 23. Velocidad de sedimentación vs Fracción remanente filtros.

Nota: Esta gráfica corresponde al Filtro N°2 lavado el 24 de septiembre de 2019.

En este sentido, para una velocidad de sedimentación (carga superficial) de 3 cm/min el equivalente a 43.2 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-dia), solo se alcanza una remoción total teórica del 49%.

$$R_T = (1 - C) + \frac{1}{V_s} \int_0^{C_0} V \cdot dc$$

Para una  $V_s = 3.0 \text{ cm/min}$   $C = 0.66$

$$R_T = (1 - 0.66) + \frac{1}{3} * ((0.54 * 0.1) + (1.0 * 0.08) + (1.69 * 0.08) + (2.35 * 0.08))$$

$$R_T = 0.49$$

### 6.3.2. Producción de volumen de sedimento

Las gráficas de la prueba de volumen de sedimento por lavado de las unidades realizadas con el cono Imhoff, muestran que en promedio a los 70 minutos el lodo ya ha decantado para la unidades de sedimentación y a los 40 minutos en las unidades de filtración (Figura 25 y 26), con un volumen de 620 ml y 1.85 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 cada 8 días y son 2 unidades, y en las unidades de filtración el promedio de lavado es 39 al mes; se tendría una producción de lodo espesado de 1464 m<sup>3</sup>/mes para los sedimentadores y de 13.9 m<sup>3</sup>/mes para los filtros.



Figura 24. Cono Imhoff – Sedimentadores.  
Laboratorio UDC - 16 de Octubre de 2019.

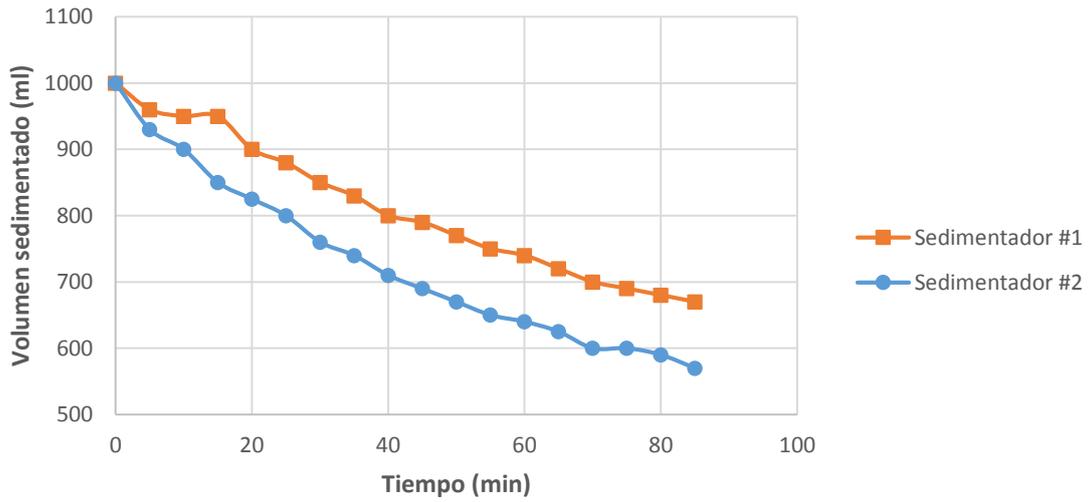


Figura 25. Volumen sedimentado en cono Imhoff para Sedimentadores.

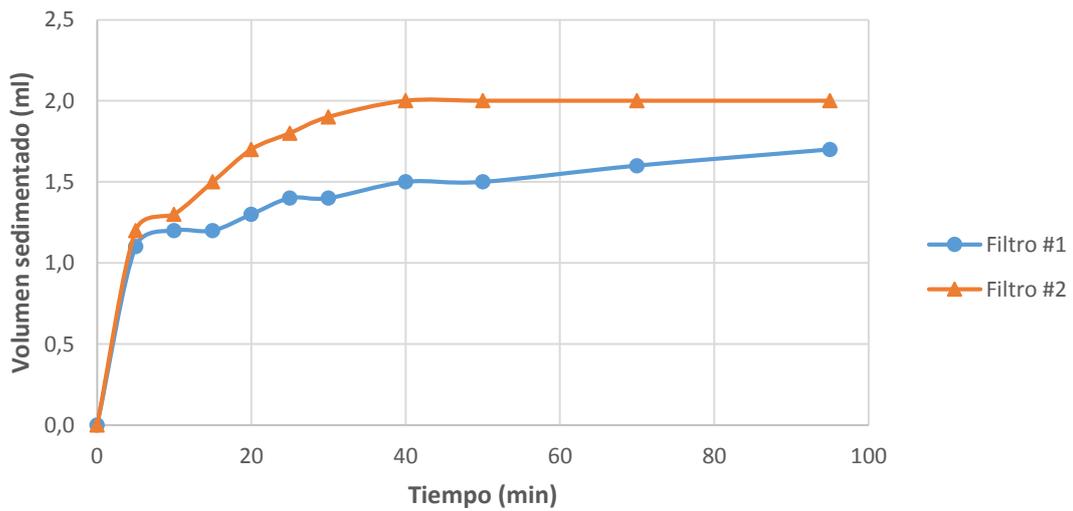


Figura 26. Volumen sedimentado en cono Imhoff para Filtros.

### 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, tal como se planteó en la metodología. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos de los dos muestreos realizados en cada una de las unidades estudiadas y en la figura 27 y 28 se observa el porcentaje promedio de sólidos retenidos para cada tamaño de poro. (Anexo 4).

SEDIMENTADORES			
Tamaño de poro (mm)	Peso retenido (mg) Sedimentador N°1	Peso retenido (mg) Sedimentador N°2	Promedio (mg)
0.297	42.7	20.9	31.8
0.149	89.7	97.5	93.6
0.074	238	191.6	214.8
0.012	2625.4	2707.9	2666.65
0.0015	91.7	13.4	52.55
0.00045	0.2	4.9	2.55
FILTROS			
Tamaño de poro (mm)	Peso retenido (mg) Filtro N°1	Peso retenido (mg) Filtro N°2	Promedio (mg)
0.297	2.1	0.9	1.5
0.149	1.6	0.6	1.1
0.074	2.9	2	2.45
0.012	14.1	5.1	9.6
0.0015	6.5	7.5	7
0.00045	0.3	0.1	0.2

Tabla 6. Cantidad de lodo retenido para diferentes tamaños de poro.

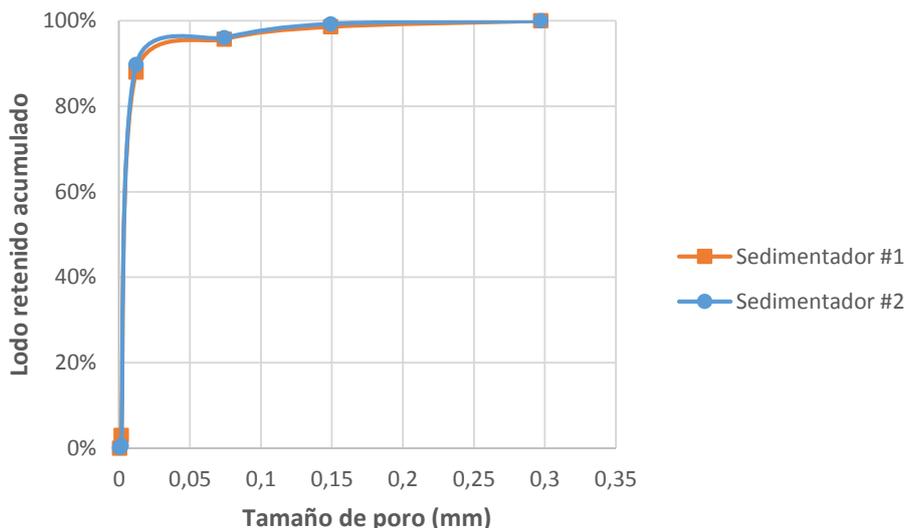


Figura 27. Distribución acumulada de sólidos retenidos a diferentes tamaños de poro - Sedimentadores

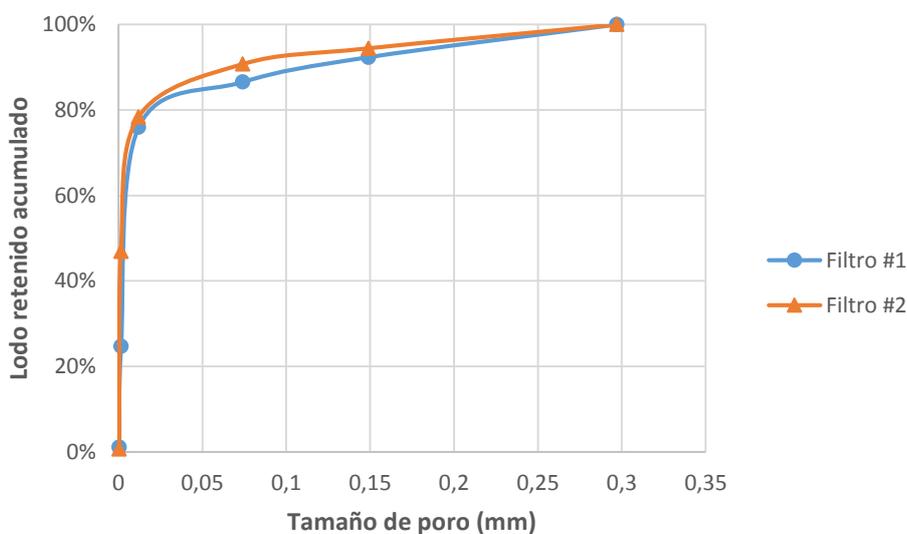


Figura 28. Distribución acumulada de sólidos retenidos a diferentes tamaños de poro - Filtros

El lodo en las unidades de sedimentación se caracteriza por tener un alto porcentaje de partículas retenidas en un poro de 0.012 mm, en el caso de la unidad de filtración N°1 este valor es de 51% en el mismo poro, sin embargo, el porcentaje más alto de lodo retenido en el filtro N°2 fue de 46% el cual se obtuvo en un poro de 0.0015 mm, esto nos indica que en su mayoría los lodos están conformados por partículas finas como limo y arcilla.

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

En la tabla 7 se observa la concentración de humedad promedio de los lodos en cada una de las unidades estudiadas, tanto para el agua de lavado como para el lodo espesado de cada unidad. (Anexo 5).

SEDIMENTADORES		FILTROS	
Lodo espesado	Agua de lavado	Lodo espesado	Agua de lavado
95.0%	99.9%	99.8%	100%
REDUCCION DE LA HUMEDAD AL ESPESARLOS			
4.95%		0.21%	

Tabla 7. Contenido de humedad de lodos en las unidades.

### 6.3.5. Determinación del contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica se determinó con base en los sólidos volátiles. En la tabla 8 y 9 se presentan los valores alcanzados para el efluente de los sedimentadores y filtros respectivamente.

Muestra compuestas	peso capsula vacía (gr)	peso capsula + muestra 105°C (gr)	peso capsula + muestra 550°C (gr)	Porcentaje materia orgánica
Sedimentador N°1	81.0839	83.9596	83.6081	12.22%
Sedimentador N°2	82.0799	85.0475	84.6719	12.66%
			Promedio	12.44%

Tabla 8. Contenido de materia orgánica para sedimentadores.

Muestra compuestas	peso capsula vacía (gr)	peso capsula + muestra 105°C (gr)	peso capsula + muestra 550°C (gr)	Porcentaje materia orgánica
Filtro N°1	86.3835	86.3865	86.386	16.67%
Filtro N°2	87.8510	87.8518	87.8515	37.50%
			Promedio	27%

Tabla 9. Contenido de materia orgánica para filtros.

Estos resultados muestran que el contenido de los lodos es mayormente inorgánico, lo cual es coherente con la calidad del agua que ingresa al sistema de tratamiento, ésta posee bajas concentraciones de color, parámetro que indica la baja cantidad de materia orgánica presente, tal como lo muestra Amirtharajah y Edwards (1985), quienes indican que el color en las aguas superficiales es un indicador de materia orgánica, principalmente de la presencia de sustancias húmicas.

## 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Un estudio realizado por Ramírez (2008), llamado, *Lodos producidos en el tratamiento de agua potable*, expone el caso de la Estación de Tratamiento de Agua Potable del Canal de Isabel II (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 8280 m<sup>3</sup>/mes (0.32%) a los sedimentadores. Comparando estos datos con los obtenidos en la PTAP El Arroyo tenemos:

ETAP CYII	PTAP El Tablazo	PTAP El Arroyo
<b>Caudal de entrada</b>	<b>Caudal de entrada</b>	<b>Caudal de entrada</b>
1 m <sup>3</sup> /s	0.80 m <sup>3</sup> /s	0.25 m <sup>3</sup> /s
<b>Volumen de agua de lavado</b>	<b>Volumen de agua de lavado</b>	<b>Volumen de agua de lavado</b>
58680 m <sup>3</sup> /mes (2.26%)	87756 m <sup>3</sup> /mes (4.24%)	9869.67 m <sup>3</sup> /mes (1.52%)
<b>Sedimentadores</b>	<b>Sedimentadores</b>	<b>Sedimentadores</b>
8280 m <sup>3</sup> /mes (0.32%)	5524 m <sup>3</sup> /mes (0.27%)	2362.17 m <sup>3</sup> /mes (0.36%)
<b>Filtros</b>	<b>Filtros</b>	<b>Filtros</b>
50400 m <sup>3</sup> /mes (1.94%)	82232 m <sup>3</sup> /mes (3.97%)	7507.50 m <sup>3</sup> /mes (1.16%)

Tabla 10. Comparación volúmenes de agua usados en el lavado con otras PTAP

Se puede evidenciar en ambos casos, que la mayor cantidad de agua de lavado es generada por las unidades de filtración.

Algunos autores como Armenter y Cristiá (2003) reportaron valores aproximados al 5% del volumen generado de agua de lavado con respecto al caudal de entrada. La PTAP El Arroyo generó 9869.67 m<sup>3</sup>/mes de agua de lavado, correspondiente al 1.52% del caudal de entrada, lo que indica que está dentro de los rangos propuestos anteriormente.

Respecto a la producción de lodos, 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 los que generan el mayor volumen de agua de lavado, son los sedimentadores los que aportan la mayor cantidad de sólidos, esto debido a que el efluente de lavado de estas unidades contiene mayor concentración de sólidos en comparación con las unidades de filtración (Tabla 4).

La diferencia de la cantidad de lodo generado en un lavado para las unidades de sedimentación, se debe al período de tiempo en que estos fueron lavados, ya que normalmente se lava en un día un sedimentador y al otro día el siguiente. Las fechas anteriores al lavado realizado en octubre fueron, el 20 de agosto para el sedimentador N°1, y el 14 de agosto para el sedimentador N°2, por lo tanto un sedimentador venia más cargado que el otro, esto ocurrió debido al periodo de verano que se presentó. Otro factor que influye en estos resultados, es el tiempo de lavado de las unidades, debido a que el lavado de un sedimentador duró más que el otro. Pero lo más importante se debe a las dosificaciones de coagulante aplicadas, ya que dependiendo de las características del agua cruda que ingresa a la Planta, se aplica la cantidad de coagulante y los demás elementos químicos necesarios.

## 8. CONCLUSIONES

Inicialmente, se observó que la producción de agua potable de la planta es de 648000 m<sup>3</sup>/mes, de acuerdo al trabajo realizado se puede establecer que las unidades de filtración de la PTAP gastan en el retro lavado un caudal promedio 7571 m<sup>3</sup>/mes representando un 1.16% de la producción mensual de la planta, mientras en las unidades de sedimentación gastan en promedio en lavado 2362 m<sup>3</sup>/mes, lo cual representa el 0.36% del agua tratada mensualmente en la planta.

Se encontró que la planta genera en promedio una carga en sólidos totales (STT) de 21.52 ton/mes, de los cuales el 97.7% es generado por los sedimentadores con una producción de 21.04 ton/mes; mientras en los filtros se genera solo el 2.3% con 0.48 ton/mes.

La determinación de tamaño de partículas de los lodos generados en las unidades de sedimentación, arrojó que más del 90% de las partículas tienen un tamaño mayor a 0.012 mm. Respecto a las unidades de filtración, se determinó que en promedio más del 80% de las partículas son mayores de 0.012 mm. Para ambos casos, el lodo generado por estas dos unidades se clasifica como limo según la norma técnica colombiana (NTC 123-13) donde se especifica que se denominan limos a partículas entre (0.005 mm-0.075 mm).

Con base a los ensayos realizados de las respectivas muestras del lodo generado en la planta de tratamiento de Santander de Quilichao, se puede concluir que este lodo está compuesto por agua en promedio por un 95% para los sedimentadores y en cuanto a los filtros, están constituidos por agua en un 99.8%, lo que indica que se requiere un sistema de separación de lodo y secado de los mismos.

Los ensayos realizados muestran que existe mayor cantidad de compuestos inorgánicos en el lodo, en el caso de los sedimentadores el 12.4% es material orgánico, el porcentaje restante se compone de material inorgánico. En cuanto a las unidades de filtración, estas presentan mayor cantidad de material orgánico, en promedio un 27%. En este caso se concluye que el lodo al tener un alto compuesto de material inorgánico es apto para su posterior aprovechamiento, uno de sus posibles usos que se propone es la fabricación de ladrillos o macetas; sin embargo, cabe aclarar que para poder llevar a cabo esta finalidad, se debe realizar estudios más minuciosos para determinar los componentes del lodo.

Es importante recalcar que, el comportamiento de la velocidad de sedimentación del lodo extraído de los sedimentadores indica que para alcanzar una eficiencia de remoción del 90%, con base en el proceso de sedimentación, se requiere de cargas superficiales de 43 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>-día), lo cual muestra que este lodo es altamente sedimentable; sin embargo, para el lodo extraído de los filtros, esta carga superficial alcanza una eficiencia menor a 50%.

## 9. REFERENCIAS

AMIRTHARAJAH A., EDWARDS G. (1985). Removing color caused by humic acids. American Water Works Association, pp. 50-57.

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.

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

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.

PABON Edson, RODRIGUEZ Jessica. 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. Trabajo de grado Ingeniería Ambiental. Popayán-Colombia.: Universidad del Cauca. 2015

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.

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

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.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Determinación de caudal y volumen de muestra

**Tabla 1. Cálculo de caudal - unidades de sedimentación  
(Tiempo de vaciado)**

<b>CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°2</b>						
<b>FECHA: 14/08/19</b>						
Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (m)	Delta h (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/s)
0	45	0.45	0	0	0	0
1	70	0.70	0.25	24.00	24.00	400
2	92	0.92	0.22	21.12	21.12	352
3	117	1.17	0.25	27.00	27.00	450
4	140	1.40	0.23	24.84	24.84	414
5	168	1.68	0.28	30.24	30.24	504
6	185	1.85	0.17	18.36	18.36	306
7	200	2.00	0.15	16.20	16.20	270
8	220	2.20	0.20	21.60	21.60	360
9	225	2.25	0.05	5.40	5.40	90
10	233	2.33	0.08	8.64	8.64	144
11	242	2.42	0.09	9.72	9.72	162
12	252	2.52	0.10	10.80	10.80	180
13	260	2.60	0.08	8.64	8.64	144
14	277	2.77	0.17	18.36	18.36	306
15	290	2.90	0.13	14.04	14.04	234
16	295	2.95	0.05	5.40	5.40	90
17	300	3.00	0.05	5.40	5.40	90
18	310	3.10	0.10	10.80	10.80	180
19	315	3.15	0.05	5.40	5.40	90
Total			2.7	285.96	285.96	4766
					caudal min	90.0
					caudal max	504
					caudal prom	238.30

<b>CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°1</b>						
<b>FECHA: 20/08/19</b>						
Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (m)	Delta h (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/s)
0	45	0.45	0	0	0	0
1	67	0.67	0.22	21.12	21.12	352
2	85	0.85	0.18	17.28	17.28	288
2.47	92	0.92	0.07	6.72	14.30	238
3	100	1	0.08	8.64	16.30	272
4	121	1.21	0.21	22.68	22.68	378
5	141	1.41	0.20	21.60	21.60	360
6	161	1.61	0.20	21.60	21.60	360
7	180	1.8	0.19	20.52	20.52	342
8	196	1.96	0.16	17.28	17.28	288
9	208	2.08	0.12	12.96	12.96	216
10	212	2.12	0.04	4.32	4.32	72
11	224	2.24	0.12	12.96	12.96	216
12	236	2.36	0.12	12.96	12.96	216
13	247	2.47	0.11	11.88	11.88	198
14	260	2.6	0.13	14.04	14.04	234
15	269	2.69	0.09	9.72	9.72	162
16	278	2.78	0.09	9.72	9.72	162
17	287	2.87	0.09	9.72	9.72	162
18	295	2.95	0.08	8.64	8.64	144
19	306	3.06	0.11	11.88	11.88	198
20	315	3.15	0.09	9.72	9.72	162
Total			2.7	285.96	301.20	5020
					caudal min	72.0
					caudal max	378
					caudal prom	228.18

<b>CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°2</b>						
<b>FECHA: 07/10/19</b>						
Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (m)	Delta h (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/s)
0	45	0.45	0	0	0	0
1	81	0.81	0.36	34.56	34.56	576
2	92	0.92	0.11	10.56	10.56	176
3	120	1.2	0.28	30.24	30.24	504
4	140	1.4	0.2	21.60	21.60	360
5	154	1.54	0.14	15.12	15.12	252
6	176	1.76	0.22	23.76	23.76	396
7	194	1.94	0.18	19.44	19.44	324
8	204	2.04	0.1	10.80	10.80	180
9	217	2.17	0.13	14.04	14.04	234
10	221	2.21	0.04	4.32	4.32	72
11	232	2.32	0.11	11.88	11.88	198
12	244	2.44	0.12	12.96	12.96	216
13	253	2.53	0.09	9.72	9.72	162
14	262	2.62	0.09	9.72	9.72	162
15	272	2.72	0.1	10.80	10.80	180
16	278	2.78	0.06	6.48	6.48	108
17	290	2.9	0.12	12.96	12.96	216
18	297	2.97	0.07	7.56	7.56	126
19	301	3.01	0.04	4.32	4.32	72
20	315	3.15	0.14	15.12	15.12	252
Total			2.7	285.96	285.96	4766
					caudal min	72.0
					caudal max	576
					caudal prom	226.95

<b>CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°1</b>						
<b>FECHA: 07/10/19</b>						
Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (m)	Delta h (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/s)
0	45	0.45	0	0	0	0
1	82	0.82	0.37	35.52	35.52	592
1.71	92	0.92	0.1	9.60	13.52	225
2	96	0.96	0.04	4.32	14.90	248
3	122	1.22	0.26	28.08	28.08	468
4	143	1.43	0.21	22.68	22.68	378
5	152	1.52	0.09	9.72	9.72	162
6	173	1.73	0.21	22.68	22.68	378
7	188	1.88	0.15	16.20	16.20	270
8	204	2.04	0.16	17.28	17.28	288
9	208	2.08	0.04	4.32	4.32	72
10	224	2.24	0.16	17.28	17.28	288
11	235	2.35	0.11	11.88	11.88	198
12	246	2.46	0.11	11.88	11.88	198
13	260	2.6	0.14	15.12	15.12	252
14	268	2.68	0.08	8.64	8.64	144
15	273	2.73	0.05	5.40	5.40	90
16	286	2.86	0.13	14.04	14.04	234
17	292	2.92	0.06	6.48	6.48	108
18	302	3.02	0.1	10.80	10.80	180
19	308	3.08	0.06	6.48	6.48	108
20	311	3.11	0.03	3.24	3.24	54
21	315	3.15	0.04	4.32	4.32	72
Total			2.7	285.96	300.46	5007.63
					caudal min	54.0
					caudal max	592
					caudal prom	217.722955

**Tabla 2. Caudal y volumen de muestra - unidades de sedimentación  
(Tiempo de lavado)**

<b>CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°2 Y VOLUMEN DE MUESTRA</b>								
FECHA: 14/08/19								
Tiempo de lavado :			56 min					
Tiempo de muestreo:			56 min					
Tiempo aproximado manguera:			52 min					
Muestra	Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (m)	Delta h (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/s)	Vol muestra (L)
1	0	45	0.45	0	0	0	0	
	1	70	0.7	0.25	24	24	400	
2	2	92	0.92	0.22	21.12	21.12	352	0.441323972
	3	117	1.17	0.25	27	27	450	
3	4	140	1.4	0.23	24.84	24.84	414	0.519057172
	5	168	1.68	0.28	30.24	30.24	504	
4	6	185	1.85	0.17	18.36	18.36	306	0.383650953
	7	200	2	0.15	16.2	16.2	270	
5	8	220	2.2	0.2	21.6	21.6	360	0.451354062
	9	225	2.25	0.05	5.4	5.4	90	
6	10	233	2.33	0.08	8.64	8.64	144	0.180541625
	11	242	2.42	0.09	9.72	9.72	162	
7	12	252	2.52	0.1	10.8	10.8	180	0.225677031
	13	260	2.6	0.08	8.64	8.64	144	
8	14	277	2.77	0.17	18.36	18.36	306	0.383650953
	15	290	2.9	0.13	14.04	14.04	234	
9	16	295	2.95	0.05	5.4	5.4	90	0.112838516
	17	300	3	0.05	5.4	5.4	90	
10	18	310	3.1	0.1	10.8	10.8	180	0.225677031
	19	315	3.15	0.05	5.4	5.4	90	
11	20	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
12	22	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
13	24	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
14	26	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
15	28	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
16	30	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
17	32	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		

18	34	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
19	36	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
20	38	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
21	40	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
22	42	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
23	44	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
24	46	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
25	48	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
26	50	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
27	52	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
28	54	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
		--	--	--	--	--		
29	56	--	--	--	--	--	3.2	0.004012036
Volumen de agua de lavado sin contar el agua a presión :							285.96 m3 (19 min)	
Volumen de agua a presión (manguera) :							2.880 m3 (15 min)	
Total volumen de agua de lavado en el tiempo de vaciado:							288.840 m3 (19 min)	
Volumen de agua de lavado hasta el final (manguera):							7.104 m3 (37 min)	
Total volumen de agua de lavado por unidad							295.944 m3 (56 min)	
Las demás muestras (29) se utilizaron para realizar la prueba de sedimentabilidad (columna). Por cada muestra, 2L.								

## CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°2 Y VOLUMEN DE MUESTRA

FECHA: 20/08/19

Tiempo de lavado :		50 min						
Tiempo de muestreo:		48 min						
Tiempo aproximado manguera:		45 min						
Muestra	Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (m)	Delta h (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/s)	Vol muestra (L)
1	0	45	0.45	0	0	0	0	
	1	67	0.67	0.22	21.12	21.12	352	
2	2	85	0.85	0.18	17.28	17.28	288	0.367847411
	2.47	92	0.92	0.07	6.72	14.30	238	
	3	100	1	0.08	8.64	16.30	272	
3	4	121	1.21	0.21	22.68	22.68	378	0.482799728
	5	141	1.41	0.2	21.6	21.6	360	
4	6	161	1.61	0.2	21.6	21.6	360	0.459809264
	7	180	1.8	0.19	20.52	20.52	342	
5	8	196	1.96	0.16	17.28	17.28	288	0.367847411
	9	208	2.08	0.12	12.96	12.96	216	
6	10	212	2.12	0.04	4.32	4.32	72	0.091961853
	11	224	2.24	0.12	12.96	12.96	216	
7	12	236	2.36	0.12	12.96	12.96	216	0.275885559
	13	247	2.47	0.11	11.88	11.88	198	
8	14	260	2.6	0.13	14.04	14.04	234	0.298876022
	15	269	2.69	0.09	9.72	9.72	162	
9	16	278	2.78	0.09	9.72	9.72	162	0.206914169
	17	287	2.87	0.09	9.72	9.72	162	
10	18	295	2.95	0.08	8.64	8.64	144	0.183923706
	19	306	3.06	0.11	11.88	11.88	198	
11	20	315	3.15	0.09	9.72	9.72	162	0.206914169
		--	--	--	--	--		
12	22	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
13	24	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
14	26	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
15	28	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
16	30	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
17	32	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
18	34	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		

19	36	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
20	38	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
21	40	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
22	42	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
23	44	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
24	46	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
		--	--	--	--	--		
25	48	--	--	--	--	--	3.2	0.004087193
Volumen de agua de lavado sin contar el agua a presión :							285.96 m3 (20 min)	
Volumen de agua a presión (manguera) :							2.880 m3 (15 min)	
Total volumen de agua de lavado en el tiempo de vaciado:							288.840 m3 (20 min)	
Volumen de agua de lavado hasta el final (manguera):							5.760 m3 (30 min)	
Total volumen de agua de lavado por unidad							294.600 m3 (48 min)	
Las demás muestras (25) se utilizaron para realizar la prueba de sedimentabilidad (columna). Por cada muestra, 2L.								

## CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°2 Y VOLUMEN DE MUESTRA

FECHA: 07/10/19

Tiempo de lavado :		1 hr : 34 min						
Tiempo de muestreo:		1 hr : 8 min						
Tiempo aproximado manguera:		1 hr : 30 min						
Muestra	Tiempo (min)	Altura	Altura	Delta h	Volumen	Caudal	Caudal	Vol muestra
		(cm)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /min)	(l/s)	(L)
1	<u>0*</u>	45	0.45	0	0	0	0	
	1	81	0.81	0.36	34.56	34.56	576	
2	2	92	0.92	0.11	10.56	10.56	176	0.25191
	3	120	1.2	0.28	30.24	30.24	504	
3	<u>4*</u>	140	1.4	0.2	21.6	21.6	360	0.51527
	5	154	1.54	0.14	15.12	15.12	252	
4	6	176	1.76	0.22	23.76	23.76	396	0.56679
	7	194	1.94	0.18	19.44	19.44	324	
5	<u>8*</u>	204	2.04	0.1	10.8	10.8	180	0.25763
	9	217	2.17	0.13	14.04	14.04	234	
6	10	221	2.21	0.04	4.32	4.32	72	0.10305
	11	232	2.32	0.11	11.88	11.88	198	
7	<u>12*</u>	244	2.44	0.12	12.96	12.96	216	0.30916
	13	253	2.53	0.09	9.72	9.72	162	
8	14	262	2.62	0.09	9.72	9.72	162	0.23187
	15	272	2.72	0.1	10.8	10.8	180	
9	<u>16*</u>	278	2.78	0.06	6.48	6.48	108	0.15458
	17	290	2.9	0.12	12.96	12.96	216	
10	18	297	2.97	0.07	7.56	7.56	126	0.18034
	19	301	3.01	0.04	4.32	4.32	72	
11	<u>20*</u>	315	3.15	0.14	15.12	15.12	252	0.36069
		--	--	--	--	--		
12	22	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
13	<u>24*</u>	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
14	26	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
15	<u>28*</u>	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
16	30	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
17	<u>32*</u>	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
18	<u>36*</u>	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
19	<u>40*</u>	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		

		--	--	--	--	--		
20	<b>44*</b>	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
21	48	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
22	52	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
23	56	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
24	60	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
25	64	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
		--	--	--	--	--		
26	68	--	--	--	--	--	3.2	0.00458
Volumen de agua de lavado sin contar el agua a presión :						285.96 m3 (20 min)		
Volumen de agua a presión (manguera) :						3.072 m3 (16 min)		
Total volumen de agua de lavado en el tiempo de vaciado:						289.032 m3 (20 min)		
Volumen de agua de lavado hasta el final (manguera):						14.208 m3 (74 min)		
Total volumen de agua de lavado por unidad						303.24 m3 (94 min)		
* Las muestras (12) que se tomaron en estos tiempos son las que se utilizaron para el cálculo de los sólidos. Las demás muestras (26) se utilizaron para realizar la prueba de sedimentabilidad (columna). Por cada muestra, 2L.								

## CÁLCULO CAUDAL SEDIMENTADOR N°1 Y VOLUMEN DE MUESTRA

FECHA: 07/10/19

Tiempo de lavado :		1 hr : 10 min						
Tiempo de muestreo:		1 hr						
Tiempo aproximado manguera:		1 hr : 5 min						
Muestra	Tiempo (min)	Altura (cm)	Altura (m)	Delta h (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Caudal (l/s)	Vol muestra (L)
1	<u>0*</u>	45	0.45	0	0	0	0	
	1	82	0.82	0.37	35.52	35.52	592.0	
	1.71	92	0.92	0.1	9.6	13.52	225.4	
2	2	96	0.96	0.04	4.32	14.90	248.3	0.30587
	3	122	1.22	0.26	28.08	28.08	468	
3	4	143	1.43	0.21	22.68	22.68	378	0.46569
	<u>5*</u>	152	1.52	0.09	9.72	9.72	162	
4	6	173	1.73	0.21	22.68	22.68	378	0.46569
	7	188	1.88	0.15	16.2	16.2	270	
5	8	204	2.04	0.16	17.28	17.28	288	0.35481
	9	208	2.08	0.04	4.32	4.32	72	
6	<u>10*</u>	224	2.24	0.16	17.28	17.28	288	0.35481
	11	235	2.35	0.11	11.88	11.88	198	
7	12	246	2.46	0.11	11.88	11.88	198	0.24393
	13	260	2.6	0.14	15.12	15.12	252	
8	14	268	2.68	0.08	8.64	8.64	144	0.17741
	<u>15*</u>	273	2.73	0.05	5.4	5.4	90	
9	16	286	2.86	0.13	14.04	14.04	234	0.28829
	17	292	2.92	0.06	6.48	6.48	108	
10	18	302	3.02	0.1	10.8	10.8	180	0.22176
	19	308	3.08	0.06	6.48	6.48	108	
11	<u>20*</u>	311	3.11	0.03	3.24	3.24	54	0.06653
	21	315	3.15	0.04	4.32	4.32	72	
12	22	--	--	--	--	--	3.2	0.00394
		--	--	--	--	--		
13	24	--	--	--	--	--	3.2	0.00394
	<u>25*</u>	--	--	--	--	--		
14	26	--	--	--	--	--	3.2	0.00394
		--	--	--	--	--		
15	28	--	--	--	--	--	3.2	0.00394
		--	--	--	--	--		
16	<u>30*</u>	--	--	--	--	--	3.2	0.00394
		--	--	--	--	--		
17	32	--	--	--	--	--	3.2	0.00394
		--	--	--	--	--		
18	34	--	--	--	--	--	3.2	0.00394
	<u>35*</u>	--	--	--	--	--		

19	36	--	--	--	--	--	3.2	0.00394	
		--	--	--	--	--			
20	<u>40*</u>	--	--	--	--	--	3.2	0.00394	
		--	--	--	--	--			
21	44	--	--	--	--	--	3.2	0.00394	
	<u>45*</u>	--	--	--	--	--			
22	48	--	--	--	--	--	3.2	0.00394	
	<u>50*</u>	--	--	--	--	--			
23	52	--	--	--	--	--	3.2	0.00394	
		--	--	--	--	--			
24	56	--	--	--	--	--	3.2	0.00394	
	<u>55*</u>	--	--	--	--	--			
25	60	--	--	--	--	--	3.2	0.00394	
Volumen de agua de lavado sin contar el agua a presión :							285.96 m3 (21 min)		
Volumen de agua a presión (manguera) :							3.072 m3 (16 min)		
Total volumen de agua de lavado en el tiempo de vaciado:							289.032 m3 (21 min)		
Volumen de agua de lavado hasta el final (manguera):							9.408 m3 (49 min)		
Total volumen de agua de lavado por unidad							298.440 m3 (94 min)		

\* Las muestras (12) que se tomaron en estos tiempos son las que se utilizaron para el cálculo de los sólidos. Las demás muestras (25) se utilizaron para realizar la prueba de sedimentabilidad (columna). Por cada muestra, 2L.

**Tabla 3. Caudal y volumen de muestra - unidades de filtración  
(Tiempo de lavado)**

<b>CÁLCULO FILTRO N°2</b>							
Fecha: 12/08/19							
Longitud canal (m)		3.8	$Q = 1.84 * L * H^2$				
Muestra	Tiempo (min)	Altura	Caudal	Caudal	Vol	Vol muestra	Vol muestra
		(cm)	(m³/s)	(l/s)	(m³)	(L)	(ml)
1	0	2	0.1187	118.66	--	0.188	187.752
2	0.33	2	0.1187	118.66	2.373	0.188	187.752
3	0.67	2	0.1187	118.66	2.373	0.188	187.752
4	1	3.5	0.2747	274.70	3.934	0.435	434.652
5	2	3.5	0.2747	274.70	16.482	0.435	434.652
6	3	3	0.2180	217.99	14.781	0.345	344.922
7	4	3	0.2180	217.99	13.079	0.345	344.922
8	5	3	0.2180	217.99	13.079	0.345	344.922
9	6	3	0.2180	217.99	13.079	0.345	344.922
10	7	2	0.1187	118.66	10.099	0.188	187.752
11	8	--	--	--	3.560	--	--
12	9	--	--	--	--	--	--
Total				1895.98	92.840	3	3000
Total volumen agua de lavado					93.22		

<b>CÁLCULO FILTRO N°1</b>							
Fecha: 16/08/19							
Longitud canal (m)		3.8	$Q = 1.84 * L * H^2$				
Muestra	Tiempo (min)	Altura	Caudal	Caudal	Vol	Vol muestra	Vol muestra
		(cm)	(m³/s)	(l/s)	(m³)	(L)	(ml)
1	0	2	0.1187	118.66	--	0.130	129.626
2	0.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
3	1	3	0.2180	217.99	5.050	0.238	238.138
4	1.5	3	0.2180	217.99	6.540	0.238	238.138
5	2	3	0.2180	217.99	6.540	0.238	238.138
6	2.5	3	0.2180	217.99	6.540	0.238	238.138
7	3	2.5	0.1658	165.83	5.757	0.181	181.157
8	3.5	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.181	181.157
9	4	2	0.1187	118.66	4.267	0.130	129.626
10	4.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
11	5	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
12	5.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
13	6	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
14	6.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626

15	7	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
16	7.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
17	8	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
18	8.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
19	9	2	0.1187	118.66	3.560	0.130	129.626
--	9.5	--	--	--	1.780	--	--
Total				2746.17	80.605	3	3000
Total volumen agua de lavado					80.99		

<b>CÁLCULO FILTRO N°1</b>							
Fecha: 26/09/19							
Longitud canal (m)		3.8	$Q = 1.84 * L * H^2$				
Muestra	Tiempo (min)	Altura (cm)	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)	Vol (m³)	Vol muestra (L)	Vol muestra (ml)
1	0	2	0.1187	118.66	--	0.230	230.242
2	0.5	2.5	0.1658	165.83	4.267	0.322	321.774
3	1	3	0.2180	217.99	5.757	0.423	422.982
4	1.5	2.5	0.1658	165.83	5.757	0.322	321.774
5	2	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.322	321.774
6	2.5	2	0.1187	118.66	4.267	0.230	230.242
7	3	2	0.1187	118.66	3.560	0.230	230.242
8	3.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.230	230.242
9	4	2	0.1187	118.66	3.560	0.230	230.242
10	4.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.230	230.242
11	5	2	0.1187	118.66	3.560	0.230	230.242
12	5.5	--	--	--	1.780	--	--
Total				1546.09	44.603	3	3000
Total volumen agua de lavado					44.99		

<b>CÁLCULO FILTRO N°2</b>							
Fecha: 03/10/19							
Longitud canal (m)		3.8	$Q = 1.84 * L * H^2$				
Muestra	Tiempo (min)	Altura (cm)	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)	Vol (m³)	Vol muestra (L)	Vol muestra (ml)
1	0	2	0.1187	118.66	--	0.142	142.170
2	0.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
3	1	2.5	0.1658	165.83	4.267	0.199	198.688
4	1.5	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.199	198.688
5	2	3	0.2180	217.99	5.757	0.261	261.183
6	2.5	3	0.2180	217.99	6.540	0.261	261.183
7	3	3	0.2180	217.99	6.540	0.261	261.183

8	3.5	2.5	0.1658	165.83	5.757	0.199	198.688
9	4	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.199	198.688
10	4.5	2	0.1187	118.66	4.267	0.142	142.170
11	5	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
12	5.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
13	6	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
14	6.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
15	7	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
16	7.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
17	8	2	0.1187	118.66	3.560	0.142	142.170
--	8.5	2	0.1187	118.66	3.560	--	--
--	9	2	0.1187	118.66	3.560	--	--
--	9.5	1.5	0.0771	77.07	2.936	--	--
--	10	0	0	0	1.156	--	--
Total				2818.26	82.768	3	3000
Total volumen agua de lavado					83.15		

<b>CÁLCULO FILTRO N°2</b>							
Fecha: 09/10/19							
Longitud canal (m)		3.8	$Q = 1.84 * L * H^{\frac{3}{2}}$				
Muestra	Tiempo (min)	Altura (cm)	Caudal (m³/s)	Caudal (l/s)	Vol (m³)	Vol muestra (L)	Vol muestra (ml)
1	0	2	0.1187	118.66	--	0.141	140.884
2	0.5	2.5	0.1658	165.83	4.267	0.197	196.891
3	1	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.197	196.891
4	1.5	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.197	196.891
5	2	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.197	196.891
6	2.5	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.197	196.891
7	3	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.197	196.891
8	3.5	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.197	196.891
9	4	3	0.2180	217.99	5.757	0.259	258.820
10	4.5	3	0.2180	217.99	6.540	0.259	258.820
11	5	3	0.2180	217.99	6.540	0.259	258.820
12	5.5	2	0.1187	118.66	5.050	0.141	140.884
13	6	2	0.1187	118.66	3.560	0.141	140.884
14	6.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.141	140.884
15	7	2	0.1187	118.66	3.560	0.141	140.884
16	7.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.141	140.884
17	8	--	--	--	1.780	--	--
18	8.5	--	--	--	--	--	--
19	9	--	--	--	--	--	--
Total				2526.72	74.022	3	3000
Total volumen agua de lavado					74.41		

## CÁLCULO FILTRO N°1

Fecha: 12/10/19

Longitud canal (m)		3.8	$Q = 1.84 * L * H^3$				
Muestra	Tiempo (min)	Altura (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (l/s)	Vol (m <sup>3</sup> )	Vol muestra (L)	Vol muestra (ml)
1	0	2	0.1187	118.66	--	0.143	143.276
2	0.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.143	143.276
3	1	2	0.1187	118.66	3.560	0.143	143.276
4	1.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.143	143.276
5	2	2.5	0.1658	165.83	4.267	0.200	200.234
6	2.5	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.200	200.234
7	3	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.200	200.234
8	3.5	2.5	0.1658	165.83	4.975	0.200	200.234
9	4	3	0.2180	217.99	5.757	0.263	263.214
10	4.5	3	0.2180	217.99	6.540	0.263	263.214
11	5	3	0.2180	217.99	6.540	0.263	263.214
12	5.5	3	0.2180	217.99	6.540	0.263	263.214
13	6	2	0.1187	118.66	5.050	0.143	143.276
14	6.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.143	143.276
15	7	2	0.1187	118.66	3.560	0.143	143.276
16	7.5	2	0.1187	118.66	3.560	0.143	143.276
17	8	--	--	--	1.780	--	--
18	8.5	--	--	--	--	--	--
Total				2484.54	72.756	3	3000
Total volumen agua de lavado					73.14		

## ANEXO 2. Cálculo de sólidos totales

### SEDIMENTADORES

<b>SEDIMENTADOR N°1 07/10/19</b>				
Muestra	Tiempo	Peso capsula	Peso Capsula	Peso Capsula
N°	(min)	vacía (g)	muestra (105°C)	muestra (550°C)
1	0	69.7097	69.75	69.7105
2	5	87.8573	87.8621	87.8618
3	10	86.1398	86.1665	86.1653
4	15	86.6826	87.5031	87.3527
5	20	87.3931	88.8766	88.6889
6	25	86.3854	87.9280	87.6563
7	30	82.0924	83.3049	83.0775
8	35	81.0777	82.3281	82.1219
9	40	55.0098	56.0144	55.8508
10	45	54.7658	55.3962	55.2578
11	50	50.2058	50.3718	50.3361
12	55	51.4271	51.5240	51.5052

Muestra	Tiempo	STT		STF		STV	
N°	(min)	(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)
1	0	0.001612	<b>1612</b>	0.000032	<b>32</b>	0.001580	<b>1580</b>
2	5	0.000192	<b>192</b>	0.000180	<b>180</b>	0.000012	<b>12</b>
3	10	0.001068	<b>1068</b>	0.001020	<b>1020</b>	0.000048	<b>48</b>
4	15	0.032820	<b>32820</b>	0.026804	<b>26804</b>	0.006016	<b>6016</b>
5	20	0.059340	<b>59340</b>	0.051832	<b>51832</b>	0.007508	<b>7508</b>
6	25	0.061704	61704	0.050836	50836	0.010868	10868
7	30	0.048500	48500	0.039404	39404	0.009096	9096
8	35	0.050016	50016	0.041768	41768	0.008248	8248
9	40	0.040184	40184	0.033640	33640	0.006544	6544
10	45	0.025216	25216	0.019680	19680	0.005536	5536
11	50	0.006640	6640	0.005212	5212	0.001428	1428
12	55	0.003876	3876	0.003124	3124	0.000752	752

SEDIMENTADOR N°2 07/10/19				
Muestra	Tiempo	Peso capsula	Peso Capsula	Peso Capsula
N°	(min)	vacía (g)	muestra (105°C)	muestra (550°C)
1	0	53.0787	53.0876	53.0866
2	4	54.4965	54.5015	54.4987
3	8	46.6345	46.6480	46.6425
4	12	56.638	56.7411	56.7197
5	16	48.9379	49.7938	49.6319
6	20	54.1497	55.4908	55.2494
7	24	50.463	51.8021	51.6645
8	28	49.5762	50.7498	50.6313
9	32	52.6543	53.7662	53.6345
10	36	46.4052	47.3535	47.2733
11	40	51.429	52.4338	52.2758
12	44	51.8046	52.8320	52.649

Muestra	Tiempo	STT		STF		STV	
N°	(min)	(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)
1	0	0.000356	<b>356</b>	0.000316	<b>316</b>	0.000040	<b>40</b>
2	4	0.000200	<b>200</b>	0.000088	<b>88</b>	0.000112	<b>112</b>
3	8	0.000540	<b>540</b>	0.000320	<b>320</b>	0.000220	<b>220</b>
4	12	0.004124	<b>4124</b>	0.003268	<b>3268</b>	0.000856	<b>856</b>
5	16	0.034236	<b>34236</b>	0.027760	<b>27760</b>	0.006476	<b>6476</b>
6	20	0.053644	<b>53644</b>	0.043988	<b>43988</b>	0.009656	<b>9656</b>
7	24	0.053564	53564	0.048060	48060	0.005504	5504
8	28	0.046944	46944	0.042204	42204	0.004740	4740
9	32	0.044476	44476	0.039208	39208	0.005268	5268
10	36	0.037932	37932	0.034724	34724	0.003208	3208
11	40	0.040192	40192	0.033872	33872	0.006320	6320
12	44	0.041096	41096	0.033776	33776	0.007320	7320

## FILTROS

<b>FILTRO N°1 12/10/19</b>				
Muestra	Tiempo	Peso capsula	Peso Capsula	Peso Capsula
N°	(min)	vacía (g)	muestra (105°C)	muestra (550°C)
1	0	54.1476	54.1556	54.1541
2	1	55.7772	55.7859	55.7844
3	2	51.8068	51.8120	51.8097
4	3	53.0784	53.0809	53.0806
5	4	54.4959	54.4989	54.4989
6	5	56.6367	56.6395	56.6393
7	6	46.6340	46.6378	46.6361
8	7	48.9368	48.9395	48.9393
9	8	50.4612	50.4640	50.4635

Muestra	Tiempo	STT		STF		STV	
		(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)
1	0	0.000320	320	0.000260	260	0.000060	60
2	1	0.000348	348	0.000288	288	0.000060	60
3	2	0.000208	208	0.000116	116	0.000092	92
4	3	0.000100	100	0.000088	88	0.000012	12
5	4	0.000120	120	0.000120	120	0.000000	0
6	5	0.000112	112	0.000104	104	0.000008	8
7	6	0.000152	152	0.000084	84	0.000068	68
8	7	0.000108	108	0.000100	100	0.000008	8
9	8	0.000112	112	0.000092	92	0.000020	20

<b>FILTRO N°2 09/10/19</b>				
Muestra	Tiempo	Peso capsula	Peso Capsula	Peso Capsula
N°	(min)	vacía (g)	muestra (105°C)	muestra (550°C)
1	0	50.8119	50.8206	50.8197
2	1	48.1613	48.1671	48.1658
3	2	54.6084	54.6121	54.6112
4	3	53.8538	53.8566	53.8564
5	4	52.6520	52.6557	52.6531
6	5	54.1478	54.1505	54.1497
7	6	51.4271	51.4297	51.4289
8	7	51.8037	51.8070	51.8052
9	8	86.3846	86.3880	86.3856

Muestra	Tiempo	STT		STF		STV	
		(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)	(g/ml)	(mg/l)
1	0	0.000348	348	0.000312	312	0.000036	36
2	1	0.000232	232	0.000180	180	0.000052	52
3	2	0.000148	148	0.000112	112	0.000036	36
4	3	0.000112	112	0.000104	104	0.000008	8
5	4	0.000148	148	0.000044	44	0.000104	104
6	5	0.000108	108	0.000076	76	0.000032	32
7	6	0.000104	104	0.000072	72	0.000032	32
8	7	0.000132	132	0.000060	60	0.000072	72
9	8	0.000136	136	0.000040	40	0.000096	96

## ANEXO 3. Curva de sedimentabilidad

### SEDIMENTADORES

SEDIMENTADOR N°1 13/08/2019						
Muestra	Tiempo	Turbiedad	Altura h	Altura Total	Fracción	Vs
	(min)	(UNT)	(cm)	(cm)	remanente	(cm/min)
1	0	747	31	85	1.0000	
2	3	723	30.5	84.5	0.9679	10.167
3	6	708	30	84	0.9478	5.000
4	9	704	29.4	83.4	0.9424	3.267
5	12	171	28.7	82.7	0.2289	2.392
6	15	27.1	28	82	0.0363	1.867
7	18	17.5	27.5	81.5	0.0234	1.528
8	21	10.3	27	81	0.0138	1.286
9	24	7.38	26.5	80.5	0.0099	1.104
10	27	7.61	26	80	0.0102	0.963
11	30	6.39	25.4	79.4	0.0086	0.847
12	33	5.83	24.9	78.9	0.0078	0.755
13	36	5.16	24.2	78.2	0.0069	0.672
14	39	5.12	23.7	77.7	0.0069	0.608
15	42	4.56	23	77	0.0061	0.548

SEDIMENTADOR N°2 14/08/2019						
Muestra	Tiempo	Turbiedad	Altura h	Altura Total	Fracción	Vs
	(min)	(UNT)	(cm)	(cm)	remanente	(cm/min)
1	0	2682	85	85	1.0000	
2	3	2640	30.2	84.2	0.9843	10.067
3	6	2482	29.5	83.5	0.9254	4.917
4	9	2613	28.6	82.6	0.9743	3.178
5	12	2462	28	82	0.9180	2.333
6	15	2415	27.4	81.4	0.9004	1.827
7	18	2422	26.5	80.5	0.9031	1.472
8	21	2389	25.8	79.8	0.8908	1.229
9	24	2338	25	79	0.8717	1.042
10	27	2405	24.3	78.3	0.8967	0.900
11	30	2417	23.6	77.6	0.9012	0.787
12	33	2384	23	77	0.8889	0.697
13	36	1349	22.1	76.1	0.5030	0.614
14	39	2336	21.5	75.5	0.8710	0.551
15	42	2304	20.7	74.7	0.8591	0.493
16	45	2293	19.9	73.9	0.8550	0.442
17	48	2248	19	73	0.8382	0.396

18	51	1777	18.4	72.4	0.6626	0.361
19	54	867	17.8	71.8	0.3233	0.330
20	57	296	17	71	0.1104	0.298
21	60	14.1	16.7	70.7	0.0053	0.278
22	63	3.62	15.5	69.5	0.0013	0.246
23	66	3.67	15	69	0.0014	0.227
24	69	3.04	14.3	68.3	0.0011	0.207
25	72	1.12	13.3	67.3	0.0004	0.185

## FILTROS

FILTRO N°2 24/09/2019						
Muestra	Tiempo	Turbiedad	Altura h	Altura Total	Fracción	Vs
	(min)	(UNT)	(cm)	(cm)	remanente	(cm/min)
1	0	55.7	32	86	1.0000	
2	2	54	31.5	85.5	0.9695	15.750
3	4	50.8	31	85	0.9120	7.750
4	6	46.5	30.2	84.2	0.8348	5.033
5	8	42.2	29.5	83.5	0.7576	3.688
6	10	35.7	28.8	82.8	0.6409	2.880
7	12	32.5	28.2	82.2	0.5835	2.350
8	14	30.9	27.6	81.6	0.5548	1.971
9	16	26.9	27	81	0.4829	1.688
10	18	26.5	26.5	80.5	0.4758	1.472
11	20	24.6	25	79	0.4417	1.250
12	22	23.5	24.4	78.4	0.4219	1.109
13	24	22.6	23.8	77.8	0.4057	0.992
14	26	20	23.2	77.2	0.3591	0.892
15	28	19.7	22	76	0.3537	0.786
16	30	19.4	21.5	75.5	0.3483	0.717
17	32	18.3	20.7	74.7	0.3285	0.647
18	34	17.4	20.2	74.2	0.3124	0.594
19	36	17.2	19.5	73.5	0.3088	0.542

FILTRO N°1 26/09/2019						
Muestra	Tiempo	Turbiedad	Altura h	Altura Total	Fracción	Vs
	(min)	(UNT)	(cm)	(cm)	remanente	(cm/min)
1	0	65.4	32	86	1.0000	
2	2	60.6	31	85	0.9266	15.500
3	4	59.9	30.5	84.5	0.9159	7.625
4	6	59.4	30	84	0.9083	5.000
5	8	54	29.4	83.4	0.8257	3.675
6	10	49.1	29	83	0.7508	2.900
7	12	44.2	28.3	82.3	0.6758	2.358
8	14	41.7	27.6	81.6	0.6376	1.971
9	16	38	27	81	0.5810	1.688
10	18	36.6	26.5	80.5	0.5596	1.472
11	20	34.4	26	80	0.5260	1.300
12	22	32.3	25.4	79.4	0.4939	1.155
13	24	28.8	24.8	78.8	0.4404	1.033
14	26	28.1	24.2	78.2	0.4297	0.931
15	28	26.3	23.7	77.7	0.4021	0.846
16	30	25.2	23	77	0.3853	0.767
17	32	25.4	22.5	76.5	0.3884	0.703
18	34	23.7	22	76	0.3624	0.647

### ANEXO 4. Estimación de tamaño de partícula

SEDIMENTADOR N°1			SEDIMENTADOR N°2		
Pesos secos			Pesos secos		
Peso filtro grande 12 - 15 micras (g)	Peso filtro mediano 1.5 micras (g)	Peso filtro pequeño 0.45 micras (g)	Peso filtro grande 12 - 15 micras (g)	Peso filtro mediano 1.5 micras (g)	Peso filtro pequeño 0.45 micras (g)
Filtro A	1.3319	0.2723	Filtro A	1.3204	0.2767
Filtro B	1.3053		Filtro B	1.3044	
Peso + muestra 105°C			Peso + muestra 105°C		
Peso filtro grande	Peso filtro mediano	Peso filtro pequeño	Peso filtro grande	Peso filtro mediano	Peso filtro pequeño
Filtro A	2.4303	0.364	Filtro A + B	5.3327	0.2901
Filtro B	2.8323				
Peso muestra			Peso muestra		
2.6254	0.0917	0.0002	2.7079	0.0134	0.0049
Tamiz	peso capsula vacía (g)	peso capsula + muestra 105°C (g)	Tamiz	Peso capsula vacía (g)	Peso capsula + muestra 105°C (g)
# 50	69.6953	69.7380	# 50	133.0256	133.0465
# 100	86.3826	86.4723	# 100	82.0775	82.1750
# 200	87.8474	88.0854	# 200	135.4659	135.6575
	peso retenido	porcentaje retenido		Peso retenido	Porcentaje retenido
# 50	0.0427	1.383%	# 50	0.0209	0.688%
# 100	0.0897	2.905%	# 100	0.0975	3.211%
# 200	0.238	7.708%	# 200	0.1916	6.311%
12 - 15 micras	2.6254	85.028%	12 - 15 micras	2.7079	89.187%
1.5 micras	0.0917	2.970%	1.5 micras	0.0134	0.441%
0.45 micras	0.0002	0.006%	0.45 micras	0.0049	0.161%
<b>Total muestra</b>	3.0877	100%	<b>Total muestra</b>	3.0362	100%

FILTRO N°1			FILTRO N°2		
Peso seco			Peso seco		
Peso filtro grande 12 - 15 micras (g)	Peso filtro mediano 1.5 micras (g)	Peso filtro pequeño 0.45 micras (g)	Peso filtro grande 12 - 15 micras (g)	Peso filtro mediano 1.5 micras (g)	Peso filtro pequeño 0.45 micras (g)
1.2732	0.2601	0.1077	1.2694	0.2636	0.1071
Peso + muestra 105°C			Peso + muestra 105°C		
Peso filtro grande	Peso filtro mediano	Peso filtro pequeño	Peso filtro grande	Peso filtro mediano	Peso filtro pequeño
1.2873	0.2666	0.1080	1.2745	0.2711	0.1072
Peso muestra			Peso muestra		
0.0141	0.0065	0.0003	0.0051	0.0075	0.0001
Tamiz	Peso capsula vacía (g)	Peso capsula + muestra 105°C (g)	Tamiz	Peso capsula vacía (g)	Peso capsula + muestra 105°C (g)
# 50	53.8534	53.8555	# 50	50.8143	50.8152
# 100	52.6518	52.6534	# 100	51.4280	51.4286
# 200	48.1618	48.1647	# 200	54.6082	54.6102
	Peso retenido	Porcentaje retenido		Peso retenido	Porcentaje retenido
# 50	0.0021	7.636%	# 50	0.0009	5.56%
# 100	0.0016	5.818%	# 100	0.0006	3.70%
# 200	0.0029	10.545%	# 200	0.0020	12.35%
12 - 15 micras	0.0141	51.273%	12 - 15 micras	0.0051	31.48%
1.5 micras	0.0065	23.636%	1.5 micras	0.0075	46.30%
0.45 micras	0.0003	1.091%	0.45 micras	0.0001	0.62%
<b>Total muestra</b>	0.0275	100%	<b>Total muestra</b>	0.0162	100%

## ANEXO 5. Determinación del contenido de humedad

Peso (g)	Sedimentador N°1, 31 Oct		Sedimentador N°2, 31 Oct	
	Lodo espesado	Agua de lavado	Lodo espesado	Agua de lavado
Capsula	85.7157	70.8352	83.7166	83.0700
Capsula + muestra	136.1438	119.6076	143.7689	131.5417
Muestra húmeda	50.4281	48.7724	60.0523	48.4717
Capsula + muestra seca	88.0288	70.8628	86.9675	83.0912
Muestra seca	2.3131	0.0276	3.2509	0.0212
<b>% Humedad</b>	95.4	99.9	94.6	100.0
Peso (g)	Filtro N°1, 14 Nov		Filtro N°2, 13 Nov	
	Lodo espesado	Agua de lavado	Lodo espesado	Agua de lavado
Capsula	83.7192	83.0735	85.7189	70.8398
Capsula + muestra	133.0238	132.0353	135.4669	120.4622
Muestra húmeda	49.3046	48.9618	49.748	49.6224
Capsula + muestra seca	83.8800	83.0778	85.7822	70.8476
Muestra seca	0.1608	0.0043	0.0633	0.0078
<b>% Humedad</b>	99.7	100.0	99.9	100.0