

**ESTUDIO DEL USO DE GEOTEXILES NT EN EL TRATAMIENTO DEL  
EFLUENTE DE SEDIMENTADORES Y FILTROS RÁPIDOS EN LA PLANTA  
DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EL TABLAZO DE POPAYAN-  
CAUCA.**

**LEIDER JESUS GARCIA H  
JHOAN SEBASTIAN PINEDA MUÑOZ**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYAN – CAUCA  
2017**

**ESTUDIO DEL USO DE GEOTEXTILES NT EN EL TRATAMIENTO DEL  
EFLUENTE DE SEDIMENTADORES Y FILTROS RÁPIDOS EN LA PLANTA  
DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EL TABLAZO DE POPAYAN-  
CAUCA.**

**LEIDER JESUS GARCIA H  
JHOAN SEBASTIAN PINEDA MUÑOZ**

**INFORME FINAL DE GRADO EN LA MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN**

**DIRECTOR:**

**Javier Ernesto Fernández Mera**

**PhD Msc. Ing Sanitario**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYAN - CAUCA  
OCTUBRE 2017**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	7
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	8
2. JUSTIFICACION.....	10
3. REVISION BIBLIOGRAFICA.....	12
4. OBJETIVOS.....	15
5. MARCO TEORICO.....	16
6. METODOLOGIA.....	18
6.1. Objetivo 1.....	18
6.2. Objetivo 2.....	21
7. PRESENTACION DE RESULTADOS.....	22
7.1. Resultados con efluente de Lavado de Sedimentador.....	22
7.2. Resultado con Lavado de Filtros Rapidos.....	24
8. DISCUSION DE RESULTADOS .....	27
8.1. Calidad de Efluente Tratado.....	27
8.2. Remocion de Solidos Totales en Sistema Piloto.....	27
8.3. Remoción de Solidos Totales en Efluente de lavado de Sedimentador.....	27
8.4. Remocion de Solidos Totales en Efluente de Lavado de Filtros Rapidos.....	29
8.5. Remocion de Turbiedad en el Sistema Piloto.....	30
8.6. Desarrollo de la Perdida de Carga y su Impacto en la Duracion de Carrera .....	31
8.7. Efluente de Lavado de Sedimentador .....	33
8.8. Efluente de Lavado de Filtros Rapidos.....	33
8.9. Impacto de la Velocidad de Filtracion y la Duracion de Carrera en el Volumen Producido.....	34
9. CONCLUSIONES.....	36
BIBLIOGRAFIA.....	37
ANEXOS.....	40

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema general del sistema experimental. Fuente: García y Pineda (2017).....	18
Figura 2. Vista en planta y lateral del filtro.....	20
Figura 3. Comportamiento del desarrollo de la pérdida de carga tratando agua de lavado de sedimentador. Replica 1 y 2. ....	23
Figura 4. Comportamiento del desarrollo de la pérdida de carga tratando agua de lavado de filtros rápidos.....	26
Figura 5. Formación de torta de lodos en la superficie del medio filtrante.....	28
Figura 6. Comportamientos de la turbiedad efluente para las velocidades estudiadas, tratando agua efluente de lavado de sedimentador (a) y filtros rápidos (B). ....	30
Figura 7. Duración de carrera de filtración en función de la velocidad de filtración efluente de lavado de sedimentador (a) y filtros rápidos (b). ....	32

## LISTA DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 1. Características mecánicas e hidráulicas de los geotextiles, fuente: PAVCO 2010. ....	19
Tabla 2. Remoción de turbiedad del efluente de lavado de sedimentador mediante el uso del geotextil a diferentes velocidades. ....	22
Tabla 3. Solidos suspendidos totales en efluente de sedimentador, a la entrada y salida de cada filtro y su eficiencia de remoción. ....	23
Tabla 4. Resumen de valores de turbiedad afluente y efluente alcanzados.....	24
Tabla 5. Solidos totales a la entrada y salida de cada filtro y su eficiencia de remoción.....	25
Tabla 6. Volumen de agua producido.....	34

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados turbiedad en efluente de filtros rápidos del sistema piloto. .....	40
Anexo 2.	
A. Comparación de solidos totales a diferentes velocidades de filtración tratando agua de efluente de sedimentador.....	41
B. Comparación de solidos totales a diferentes velocidades de filtración tratando agua de efluente de filtros rápidos.....	41
C. Comparación de turbiedad efluente para diferentes velocidades de filtración que trata agua de efluente de lavado de sedimentador.....	41
D. Comparación de turbiedad afluyente para diferentes velocidades de filtración que trata agua de efluente de lavado de filtros rápidos.....	41
Anexo 3. Prueba de Kruskal-Wallis para Dur. de Car PC 20 cm (min) por Vel. de Filt. (m/h).....	42

## INTRODUCCION

La producción de agua potable es un proceso que combina mecanismos físico-químico que permiten tratar el agua cruda en una fuente de la que se conocen sus parámetros como pH o sólidos suspendidos totales entre otros, para eliminar microorganismos e impurezas haciéndola apta para el consumo humano. Durante dichos procesos de tratamiento se adicionan sustancias químicas que generan lodos residuales, usualmente se aplica sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) o cloruro férrico ( $FeCl_3$ ), estas generan entre un 0,3 hasta 1% en lodos del volumen de agua tratado, lo cual puede incrementar la polución del recurso hídrico, si dichos lodos son depositados directamente en las fuentes superficiales sin ningún control o tratamiento, lo cual genera graves impactos sobre la flora y fauna acuática ya que generan bancos de lodo en los tramos lentos aumentando así la turbiedad y color en la fuente receptora.

Los geotextiles han venido siendo estudiados para tratar efluentes con alto contenido de lodos o partículas en suspensión, arrojando buenos resultados en cuanto a las eficiencias en remoción de estas. Esto motivó el estudio del tratamiento de aguas del lavado de sedimentadores y filtros rápidos generadas durante la producción de agua potable en la planta de tratamiento El Tablazo de la ciudad de Popayán, ya que en estudios previos los geotextiles han alcanzado altas eficiencias tratando efluentes con concentración de lodos similares tratando efluentes de lavado de estanque de trucha así como también se postulan a ser una alternativa de bajo costo para dar solución a la contaminación por los vertimientos a fuentes superficiales ya que es una problemática que con el transcurso del tiempo se incrementa.

El presente documento contiene los resultado de la investigación realizada con el geotextiles NT 1600 como medio filtrante en la remoción de lodos en el agua de lavado de sedimentadores y filtros rápidos tratadas por separado, teniendo como objetivo evaluar el impacto de la tasas de flujo en aspectos como la pérdida de carga y la duración de carrera, se empleó un sistema piloto utilizando tres tasas de filtración diferentes, que permitió recolectar la información requerida para desarrollar la investigación de forma adecuada.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

En la historia de la humanidad ha estado presente un sin número de amenazas para el recurso hídrico, el cual se enfrenta a una gran variedad de retos, todas estas originadas por actividad humana y desarrolladas para satisfacer necesidades tanto materiales como inmateriales, el progreso económico ha llevado a innumerables problemas de contaminación por vertimientos, esta ocasiona un daño a los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos. Los principales contaminantes son la materia orgánica e inorgánica y los agentes patógenos provenientes del contenido de aguas residuales, de origen antrópicas como la agrícola, minera, industrial, etc. (Greenfacts, 2009).

En Colombia, las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) solo gestionaban la producción de agua para el consumo humano, sin prestar atención a la producción de lodos y subproductos que se generan en el proceso, al descargar estos residuos o lodos en las corrientes naturales de agua, esto llega a plantear problemas importantes, ya que, si bien estos residuos son principalmente inorgánicos, van formando depósitos o bancos de lodos en los tramos lentos del cauce, a la vez que aumentan la turbiedad y el color de las aguas receptoras, más aun si se está empleando carbón, disminuyendo la actividad fotosintética de las plantas acuáticas. (Ramírez, 2008).

De lo anterior no hay registro alguno en el cual se estime el número de PTAP que tengan el debido proceso para el manejo adecuado de estas sustancias producidas por dichas plantas. La falta de opciones tecnológicas adaptadas a las condiciones del país y posibles usos de los lodos generados en las PTAP, asociados a los altos costos de implementación de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR<sub>S</sub>), baja capacidad de pago en tarifas de los usuarios, y el poco impacto en la recuperación de costos por pago de tasas retributivas, son determinantes para la implementación más amplia de estos tratamientos (Raigosa, 2012).

Un estudio realizado en el departamento de Risaralda mostro que 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 para zonas cercanas, dichos lodos representan del 0.3 al 1% del agua tratada. Uno de los lodos más característicos y de efectos más graves sobre el medio son los lodos aluminosos (Raigosa, 2012).

La implementación y operación y mantenimiento de alternativas para el tratamiento y recuperación de los lodos consideradas en el País, entre ellos tenemos los espesadores por gravedad y lechos de secado (RAS, 2000), podrían generar incrementos en las trifas del agua potable y limitar su aplicación, impidiendo hacer un control más efectivo en este tipo de descargas.

De otra parte, Raigosa (2012), mostró como dos de las opciones técnicas (lechos de secado y filtros prensa) tenían poca viabilidad cuando se evalúa su costo de inversión inicial y operación y mantenimiento respecto de los costos por el pago de tasas retributivas, reportando que el costo beneficio desde el punto de vista financiero fue negativo para 9 municipios del Departamento de Risaralda.

## 2. JUSTIFICACION.

En el proceso de obtención de agua potable, realizado por plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) en Colombia, generalmente de tipo convencional, se utilizan sustancias químicas y procesos físicos para la eliminación y control de las partículas y agentes microbiológicos que contiene el agua naturalmente, tales como; color, turbidez, dureza, materia suspendida, sabor, olor y entre otras. El proceso es realizado para abastecer de líquido la población de forma segura, de tal forma que se cumpla con las normas y los límites permisibles requeridos por el estado colombiano.

El tratamiento convencional para la obtención de agua potable consiste en: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración, en dicha labor se generan solidos por el coagulante adicionado, generalmente sulfato de aluminio o sulfato férrico, estos reaccionan con el agua cruda y forman los sólidos que son retenidos en los decantadores y el porcentaje restante se reduce durante la filtración, de esta forma son eliminados del agua potable, aunque no en su totalidad.

En la gran mayoría de PTAP en Colombia regresan los lodos generados a las fuentes superficiales, aunque esto conlleva a multas por dicha deposición, hasta el día de hoy resulta menos costoso pagar la multa que tratar dicho residuo, dado que al tratar los lodos demanda mayores gastos con técnicas establecidas en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) tales como lechos de secado, filtros prensa y espesadores por gravedad (RAS 2000).

Un método que ha venido siendo estudiado para remover lodos es el uso de geotextiles no tejidos (NT) como medio filtrante (Padua, V.L.; Di Bernardo, L., 1997), el cual ha venido siendo probado en otros tipos de efluentes con grandes éxitos y bajos costos de implementación (Fernández J., et. al., 2001, Pabón, E., y Rodríguez, J., 2015, Méndez, S. y Collazos, S., 2015, Campos, F. y Medina, O., 2013, Luna, et. al., 2014, Fernández, J. et. al., 2009).

Los geotextiles no tejidos (NT) poseen un área superficial específica entre 10 000 y 20 000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> y porosidad superior al 85%, lo cual hace que la probabilidad de

remover partículas y almacenarlas sea alta, además de; incrementar la carrera de filtración (Padua, V.L.; Di Bernardo, L., 1991). De otra parte, gracias a el material de fabricación por su naturaleza apolar, permite que las partículas sean retenidas y que no se adhieran de manera permanente en el geo textil, lo que hace que el proceso de limpieza sea sencillo (Universidad del Cauca et. al., 2010).

Por esta razón se cree que mediante la utilización de geo textiles NT se pueda mejorar tanto el proceso de filtración con mayor porcentaje de retención de sólidos, minimizando la polución del recurso hídrico evitando que la población que usa este recurso aguas abajo tenga problemas de salud por los altos contenido de aluminio en el agua. Sin embargo, aún se requiere de nuevas investigaciones, como el impacto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción y que faciliten el proceso de tratamiento de este tipo de efluentes, y reduzcan los costos tanto de inversión inicial como de operación y mantenimiento de dicho proceso.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

El uso de geotextiles no tejidos es una práctica que ha sido estudiada desde los años 80 en países como Inglaterra y Brasil con el objeto de mejorar las condiciones de calidad, operación y mantenimiento de los sistemas potabilizadores de agua.

Las mantas sintéticas o geotextil no tejido (NT) han sido utilizadas en la superficie de lecho filtrante de los filtros lentos de arena (FLA) lo cual muestra que la tasa de obstrucción de la superficie de la arena es más lenta en comparación con un filtro sin manta, consecuentemente, la duración de carrera del filtro se extiende utilizando velocidades entre 0.15 y 0.3 m/h y lecho de arena, con alturas entre 0.6 y 0.8 m (Fernández et al., 2000). Los geotextiles NT son particularmente utilizados en la filtración de agua potable porque poseen características que resultan ser muy benéficas teniendo en cuenta que la superficie específica es de alrededor de  $20662 \text{ m}^2/\text{m}^3$  y entre  $10000$  y  $2000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  respectivamente reportan Di Bernardo et. al., (1991) y Fernández et. al.,(2000) , así con lo cual se presume que pueden ser utilizados como medio para la retención de partículas, además; estos presentan porosidad entre 0.8 y 0.95 la cual es muy superior a la porosidad de un lecho de arena de 0.44 ( Fernández et al., 2000), los datos de porosidad son similares a los reportados por Di Bernardo et. al. (1991) para dos tipos de mantas denominadas M1 (blanca)= 84.7% y M2 (negra) = 89.3%. de aquí que sean utilizado en la superficie de lechos de filtración de agua potable ya que sus características tanto de área superficial específica como de porosidad sugieren que los geotextiles no tejidos pueden ser excelentes retenedores de partículas en la filtración de agua para consumo humano.

Tras el conocimiento de que el uso de mantas sintéticas NT sobre la superficie del lecho de FLA mejora la calidad del agua filtrada, también se presume que pueden aumentar la eficiencia en variables como lo son las carreras de filtración y eficiencia de remoción, en estudios como el de Fernández et. Al. (2000) mostro que la duración de carrera se aumenta entre 1.33 y 1.72 para NT 2000 y NT 1400 respectivamente en comparación con un FLA sin geotextil. Ferraz y Paterniani., (2002) y Di Bernardo (1990) se demostró que para velocidades de  $3 \text{ m}^2/\text{m}^3 \text{ día}$ ,

proporciona una mayor eficiencia de remoción de partículas y color aparente así como aumento de la carrera de filtración.

No obstante, en estudios del uso de geotextil no tejido aplicado en sistemas de deshidratación del lodo proveniente de sedimentadores y de lavado de filtros, su eficiencia de remoción de sólidos suspendidos mínima es del 75% (Moo-Young et. al., 2002), esta afirmación fue corroborada para remover el lodo de proveniente de decantadores y lavado de filtros de tratamiento de agua potable obteniendo una eficiencia de retención de sólidos suspendidos totales (SST) del 98,6% (Bernardo et al 2013) este estudio concuerdo con Mulligan et. al. (2009) el cual pudo demostrar que la filtración con geotextiles no tejidos resulta ser más eficiente que la filtración lenta en arena, indicando una eficiencia del 98,9% y 88,2% respectivamente para la remoción de SST.

La utilización de geotextil NT ha aumentado en los últimos años tras la viabilidad que estos proporcionan en la filtración ya que ayudan a optimizar los procesos, en investigaciones como “OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL TAMAÑO APARENTE Y LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN DE UN GEOTEXTIL NO TEJIDO EN EFLUENTES DE LAVADO DE PISCIFACTORÍAS” por Collazos y Méndez (2015) se demostró que el efluente de los filtros presentó una concentración en SST por debajo de los 3 mg/L , lo cual generó eficiencias de remoción superiores al 96% y la velocidad de 2 m/H presenta una media de duración de carrera de 69,5 minutos para alcanzar pérdida de carga de 30 cm.

En este contexto también se evaluó el uso de un geotextil no tejido como medio filtrante en el tratamiento realizado al efluente de lavado de un estanque MULTIPRO. En dicho estudio, se utilizó el geotextil NT2000 como medio de filtración y se reportó que la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales es de un 99% para una tasa de filtración de 3 m/h, con una de carga de 15 cm brindando un tiempo de operación del sistema de por lo menos una hora y eficiencias de remoción de 90% para tasas de filtración de 5, 10 y 15 m/h (Campos y Medina, 2013). Además, Bueno y Quiñones et. al., (2010) encontraron efectos similares de las tasas de filtración entre 5 y 20 m/H usando sistemas de filtración con geotextil para un

efluente menos contaminado donde las velocidades bajas presentan mayores duraciones de carrera, lo que se traduce en menor recurrencia y costos en el mantenimiento o cambio del geotextil aunque mayor inversión inicial, tasas mayores presentaban carreras más cortas.

En estos estudios, los geotextiles presentaron tamaños aparentes superiores al 80%, con permeabilidades mayores a 0.22 cm/s, demostrando que la configuración del tamaño aparente y la porosidad de los geotextiles puede llegar a permitir una mayor retención de partículas (Fernández et. al., 2001). Ofreciendo una gran alternativa para el tratamiento del efluente de lavado.

Dadas las características tanto de porosidad, superficie específica, polaridad y aumento de las carreras de filtración de los geotextiles NT se infiere que son una salida técnica y de bajo costo que puede ser aplicada en la filtración, lo cual generara mayores eficiencias en cuanto a operación y mantenimiento en las unidades.

## **4. OBJETIVOS.**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL.**

Estudiar el uso de la filtración con geotextiles no tejidos en la remoción del lodo proveniente de los sedimentadores y filtros rápidos utilizados en los sistemas convencionales de potabilización de agua.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Estudiar el impacto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción del lodo proveniente de las unidades de sedimentación y filtración de sistemas convencionales de tratamiento de agua potable, cuando se utiliza geotextiles no tejidos como medio filtrante.
- Estudiar el impacto de la velocidad de filtración en el desarrollo de carga cuando se utiliza geotextiles no tejidos como medio filtrante en la remoción del lodo proveniente de las unidades de sedimentación y filtración de sistemas convencionales de tratamiento de agua potable.

## **5. MARCO TEORICO.**

### **5.1. CONSIDERACIONES GENERALES**

La investigación asociada a la retención de ST, es un estudio a pequeña escala o nivel de planta piloto, que se realizó con el agua proveniente de los sedimentadores de la PTAP El Tablazo, esta herramienta permitirá llevar al cabo un análisis preliminar para iniciar estudios a un nivel de complejidad más alto.

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

La planta de tratamiento de agua potable El Tablazo se encuentra ubicada en la zona norte de la ciudad de Popayán, tiene como principal fuente de abastecimiento el río Piedras; Cuenta con un caudal máximo de 1050 L/s y un caudal medio de 800 L/s. La planta de tratamiento es de tipo convencional, e incluye los procesos de aireación, coagulación (Sulfato de Aluminio), floculación, sedimentación, filtración, estabilización del PH y desinfección (Pabón, E., y Rodríguez, J. 2015).

La dosis de coagulante depende de la calidad del agua cruda, época del año y otros factores, llegando a ser nula en caso de que la turbiedad de esta se encuentre por debajo de 5 NTU (Pabón, E., y Rodríguez, J 2015).

Dado que los sedimentadores generan entre el 60 y el 70% de los sólidos totales y en los filtros entre el 30 y el 40% según lo observado por la literatura consultada (Pabón, E., y Rodríguez, J.2015), se seleccionó el agua proveniente de estas estructuras para realizar el estudio del impacto de la velocidad de filtración, en relación con la pérdida de carga y eficiencia de remoción del lodo procedente de las estructuras mencionadas, mediante el uso del geotextil no tejido.

### **5.3. ESTRUCTURAS DE SEDIMENTACION.**

La planta cuenta con cuatro (4) unidades de sedimentación acelerada, cada una constituida por dos (2) cámaras iguales de 8x38 m y una profundidad promedio útil de 3.85 m, la velocidad horizontal del agua es de 0.18 m/seg. El lavado de estas estructuras se realiza mensualmente, en primer lugar se cierra la válvula de entrada al sedimentador y luego se abre la válvula de desagüe vaciando todo el contenido de la estructura, mientras esto sucede el operador encargado va limpiado con agua a presión las placas y paredes del sedimentador y cuando el nivel del agua es más bajo empuja el lodo decantado en el fondo de toda la estructura hasta el desagüe, los tiempos en que esto se realiza y la cantidad del lodo evacuado dependen del criterio y laboriosidad del operador (Pabón, E., y Rodríguez, J 2015).

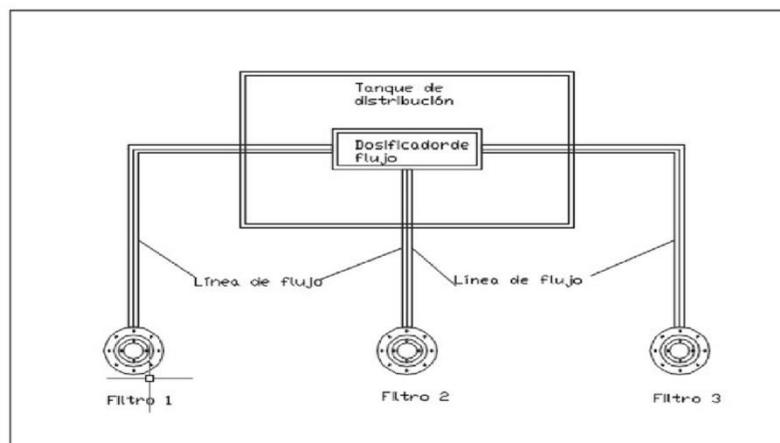
### **5.4. ESTRUCTURAS DE FILTRACION.**

Existen ocho (8) filtros rápidos a gravedad con lecho mixto de arena y antracita, con un área total de filtración de 363 m<sup>2</sup> y una tasa de filtración de 250 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día. En cuanto al lavado de las unidades de filtración, según los registros de operación de la planta durante el día se lavan en promedio 5 filtros en época de invierno, lo que equivale a 160 lavados al mes. Para cada uno de ellos el operador de turno desocupa el filtro cerrando la entrada y esperando que filtre el agua que esta retenida, posteriormente el operador limpia las paredes y canales de la estructura con agua a presión, finalmente se abre una válvula que permite la entrada de agua de lavado desde un tanque de almacenamiento con un volumen aproximado de 500 m<sup>3</sup> el cual lava el área de filtración de manera ascendente, evacuándola mediante canales hasta el desagüe. (Pabón, E., y Rodríguez, J 2015).

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. PRIMER OBJETIVO.

Para el estudio del impacto de la velocidad de filtración en relación con la remoción de lodos mediante el uso del geotextil no tejido, se utilizó 3 diferentes velocidades de flujo tratando el agua proveniente de las unidades de sedimentación y filtración de la planta, se contó con un sistema que está compuesto por tres filtros acrílicos de flujo descendente, un tanque de distribución con mezclador y un dosificador de cabeza contante, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema General del sistema experimental. Fuente: García y Pineda (2017)

Los filtros tienen un diámetro de 14 cm y una altura total de 50 cm como se muestra en la Figura 2 y están acondicionados de tal forma que se puede disponer en cada uno de ellos una velocidad de filtración a experimentar. Las velocidades consideradas son: 2, 3 y 4m/h Estas velocidades fueron reguladas ajustando el caudal de entrada al filtro por medio de un dosificador de cabeza constante ubicado en el tanque de distribución, suministrando los siguientes caudales: 513.13, 769.69 y 1026.25 ml/min; los cuales son equivalentes para cada velocidad respectivamente.

El geotextil a utilizar es el NT 1600 de Pavco, el cual ha sido probado en estudios previos con buenos resultados (Fernández, et al. 2010; Campos y Medina, 2013). A cada filtro se le adapto (2) capas del geotextil NT 1600 Las características generales del geotextil se muestran en la Tabla 1.

El agua de lavado del sedimentador y de los filtros será tratada de manera independiente y una muestra fue tomada en el desagüe de cada uno de los sistemas a evaluar. Una muestra compuesta de aproximadamente 100 litros fue tomada para ser distribuida a las unidades de filtración. La muestra almacenada fue aireada y mezclada para evitar la sedimentación, utilizando para ello un aireador de pecera. Volúmenes de 25L aproximadamente fueron tomados para ser introducidos al tanque de distribución de cabeza constante el cual suministro un total de 2309,07 ml/min a los filtros durante toda la toma de datos. Cada vez que el nivel del agua en el tanque de distribución se baje, a la altura mínima de funcionamiento se subio el nivel introduciendo el agua almacenada.

**Tabla 1.** Características mecánicas e hidráulicas de los geotextiles.

Marca	Referencia	Apertura aparente (mm)	Espesor (mm)	Permitividad (1/s)	Permeabilidad (cm/s)
PAVCO	NT 1600	0,18	1,50	2,90	0,44

Fuente: PAVCO 2010



## **6.2. OBJETIVO 2.**

Para el desarrollo de este objetivo se le incluyó en cada filtro dos piezómetros que permitió la medición de la pérdida de carga en el medio filtrante. La duración de carrera se considera como el tiempo que le toma al filtro en alcanzar una pérdida de carga mínima de 10cm.

Para evitar errores en la medición de la pérdida de carga ocasionado por la formación de burbujas dentro del medio filtrante, cada filtro fue llenado previamente con agua destilada con un flujo ascendente hasta lograr un equilibrio de niveles en los piezómetros de cada filtro.

El tiempo de duración de carrera inicio a contar a partir del momento en el que el volumen de agua destilada usada para evitar el burbujeo salga de cada filtro, el cual se estipular en 3, 5 y 8 minutos para las velocidades de 2, 3 y 4 m/H respectivamente, siempre y cuando se considere un suministro constante y homogenizado proveniente del dosificador. La medición de la pérdida de carga se realizó cada 10 minutos hasta que el geotextil NT alcance el 80% de saturación (aproximadamente 16 cm de pérdida de carga), a partir de este se redujo el intervalo de medida cada 5 minutos durante el resto de la duración de carrera.

Se realizo pruebas de análisis de inferencia y contraste estadístico que permitieron determinar si la velocidad de filtración tiene un efecto sobre la duración de carrera. Dependiendo de la normalidad de los datos (determinada con la prueba de Shapiro-Wilk), el análisis se realizó en base a pruebas paramétricas (Anova) o No Paramétricas (Kruskal-Wallis, Mann-Whitney).

## 7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

A continuación, se presentan los datos del presente estudio, desarrollado con el efluente de lavado de las unidades de filtración y sedimentación convencional en la PTAP El Tablazo de Popayán, la cual presta el servicio de distribución del líquido en condiciones normales y técnicas necesarias de operación durante todo el tiempo de muestreo.

### 7.1. Resultados con Efluente de Lavado del Sedimentador.

Los resultados de la turbiedad del agua medidos en el afluente y efluente de cada velocidad de filtración evaluada, en las dos réplicas, se presentan en la tabla 2, mientras que los resultados correspondientes a sólidos Suspendidos Totales ST (mg/l), se presentan en la tabla 3.

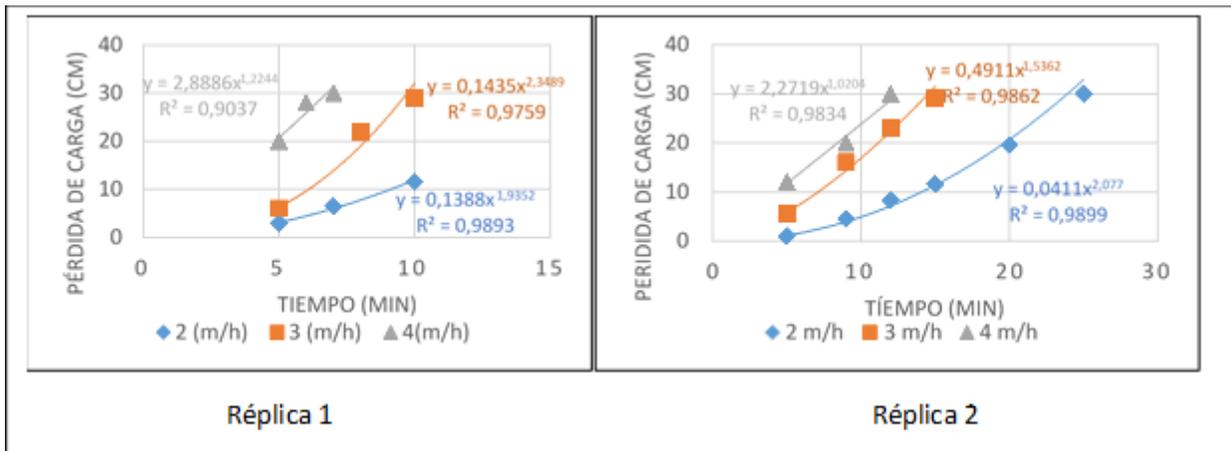
**Tabla 2.** Remoción de la turbiedad (UNT) del efluente de lavado del sedimentador, mediante el uso del geotextil (NT 1600) a diferentes velocidades.

Réplica	Filtro	Q(ml/min) Promedio	V(m/h)	Turbiedad Afluente (UNT)	Tiempo (min)	Turbiedad Efluente (UNT)	Eficiencia Remoción (%)
1	1	513,33	2	8500	5	284	96,7
					7	295	96,5
					10	343	96,0
	2	769,69	3		5	72,4	99,1
					8	316	96,3
					10	612	92,8
	3	1026,25	4		5	458	94,6
					6	481	94,3
					7	715	91,6
2	1	513,33	2	7880	5	100	98,7
					7	133	98,3
					10	189	97,6
					15	230	97,1
	2	760	3		5	178	97,7
					7	242	96,9
					10	290	96,3
					15	792	89,9
	3	1026,66	4		5	166	97,9
					7	274	96,5
					10	354	95,5
					15	406	94,8

**Tabla 3.** Sólidos suspendidos totales (mg/L) en efluente de sedimentador, a la entrada y salida de cada filtro y su eficiencia de remoción, para las diferentes réplicas.

Réplica	ST Afluente (mg/L)	Velocidad de filtración (m/h)					
		2		3		4	
		ST Efluente (mg/L)	Eficiencia %	ST Efluente (mg/L)	Eficiencia %	ST Efluente (mg/L)	Eficiencia %
1	22405	2413,3	89,2	2623,3	88,3	2536,7	88,7
2	8500	50	99,8	280	98,8	273,3	98,8
3	10893	470	95,7	813,3	92,5	770	92,9

En las figuras 3 y 4 se describe el comportamiento de la pérdida de carga en los filtros para cada velocidad de filtración en las dos réplicas realizadas. En cada caso se utilizó agua de lavado del sedimentador y geotextil (NT 1600) como medio filtrante.



**Figura 3.** Comportamiento del desarrollo de la pérdida de carga tratando agua del lavado de sedimentador. Réplicas 1 y 2.

## 7.2. Resultados con Efluente de Lavado de los Filtros Rápidos.

El resumen de los resultados de turbiedad y sólidos suspendidos para las diferentes velocidades de filtración en las cuatro (4) réplicas, se presentan en las tablas 4 y 5 respectivamente. En el Anexo 1, se presenta en detalle los resultados alcanzados en cada una de las réplicas

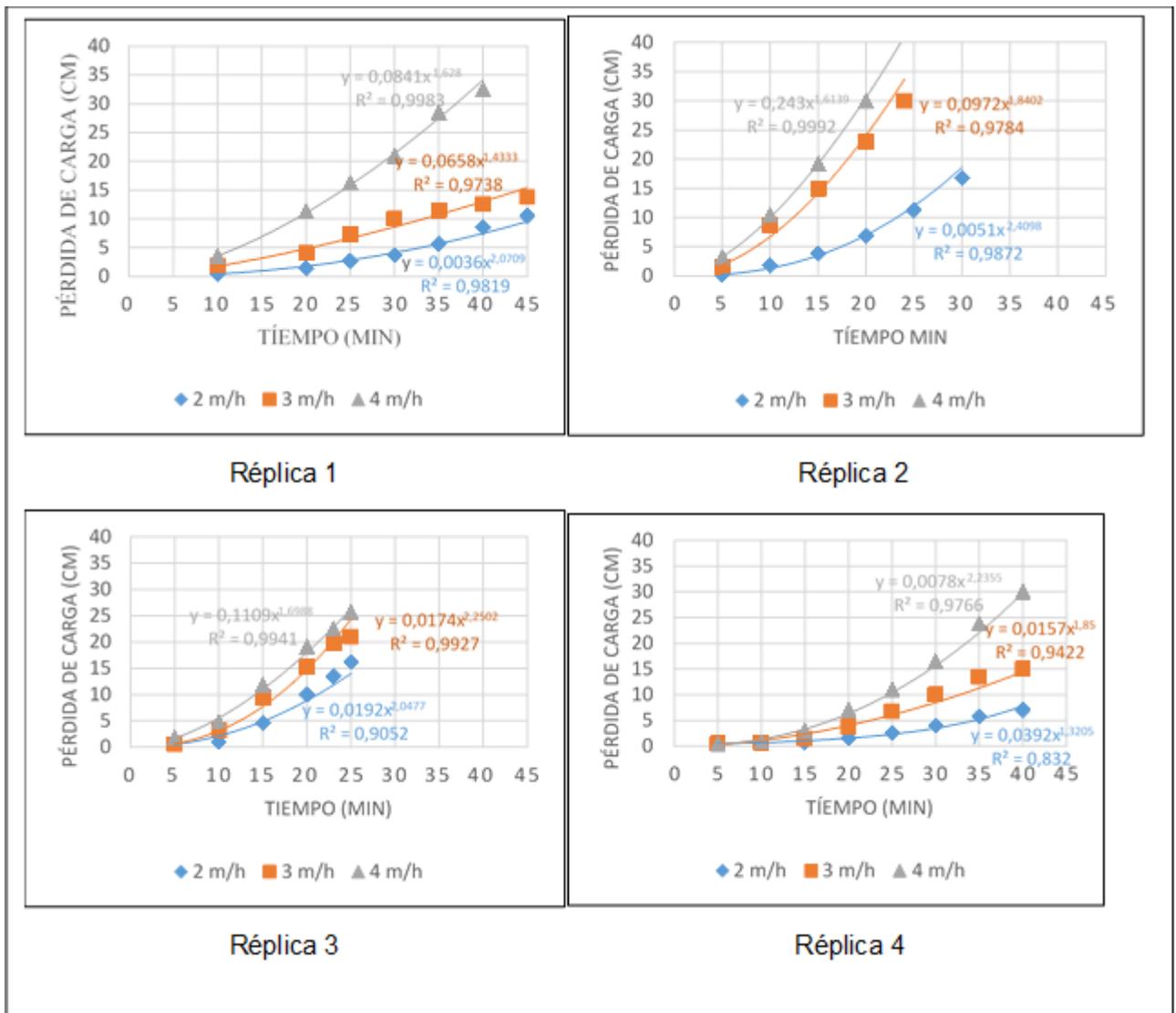
**Tabla 4.** Resumen valores de la turbiedad (UNT) afluente y efluente alcanzados en 4 réplicas para diferentes velocidades de filtración, tratando agua de lavado de los Filtros Rápidos.

Número de Réplica	Velocidad Filtración (m/H)	Turbiedad Afluente (UNT)	Turbiedad Efluente (UNT)					Eficiencia Remoción (%)
			Promedio	Desv. Stand.	Máximo	Mínimo	# Datos	
1	2	115	2,83	0,35	3,14	2,11	7	97,5
	3		5,38	1,08	7,31	4,01	7	95,3
	4		5,73	2,35	8,87	2,32	6	95,0
2	2	60,4	12,44	6,08	19,30	2,57	6	79,4
	3		14,28	9,73	25,70	1,80	6	76,4
	4		29,52	15,89	45,50	4,91	6	51,1
3	2	50,3	4,61	0,74	5,79	3,63	8	90,8
	3		3,90	0,46	4,68	3,33	8	92,2
	4		5,18	0,66	6,49	4,23	8	89,7
4	2	238	58,53	27,92	78,20	6,89	6	75,4
	3		68,50	34,90	104,00	31,70	5	71,2
	4		100,75	33,75	124,00	51,00	4	57,7

**Tabla 5.** Sólidos totales en mg/L a la entrada y salida de cada filtro y su eficiencia de remoción, para las diferentes réplicas usando efluente de lavado de filtros rápidos.

Réplica	ST Afluente (mg/L)	Velocidad de filtración (m/h)					
		2		3		4	
		ST Efluente (mg/L)	Eficiencia %	ST Efluente (mg/L)	Eficiencia %	ST Efluente (mg/L)	Eficiencia %
1	253,33	110	56,58	206,67	18,42	213,33	15,79
2	226,66	65	71,32	62,5	72,42	47,06	79,24
3	503,33	63,34	87,42	56,67	88,74	66,67	86,75
4	490	63,33	87,07	110	77,55	33,33	93,19

En la figura 4 se presenta el comportamiento de la pérdida de carga en el tiempo para cada velocidad de filtración y replica evaluada.



**Figura 4.** Comportamiento del desarrollo de pérdida de carga en el tratamiento del agua de lavado de filtros rápidos

## **8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **8.1. CALIDAD DEL EFLUENTE TRATADO.**

### **8.2 Remoción de Sólidos Totales en sistema piloto.**

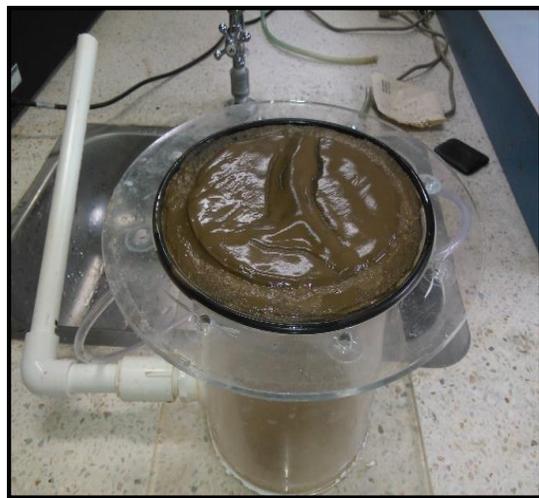
La concentración de sólidos en el efluente de lavado de sedimentadores puede ser considerada como de alta, dados los valores alcanzados (>8500 mg/L), mientras que los correspondientes al efluente de filtros se consideran de concentración media (500 a 200 mg/L), esto generó un impacto diferencial sobre el desempeño de los geotextiles como medio filtrante, en aspectos como la duración de carrera y la eficiencia de remoción, los cuales se discute más adelante. En términos generales la concentración de sólidos totales (mg/l) presentes en el agua de lavado, tanto en sedimentadores como en filtros rápidos, presentó diferencias en entre cada replica realizada, sin embargo, los valores medidos están dentro de los rangos reportados en el estudio de caracterización de lodos en El Tablazo por Pabón y Rodríguez (2015). Las diferencias encontradas en la concentración del efluente de lavado de filtros y sedimentadores, se explica por las características por el periodo climático dentro del cual se desarrolló la toma de muestras y la evaluación experimental, la cual correspondió a un periodo de lluvias con intervalos secos de hasta una semana en el mes de Febrero 2017.

### **8.3 Remoción de sólidos totales en el efluente del sedimentador**

Las eficiencias de remoción en solidos totales alcanzadas al tratar el efluente del sedimentador presentaron gran similitud entre las velocidades de sedimentación evaluadas y réplicas realizadas, presentándose en el rango del 88,3 al 99,8% (ver Tabla 3). Estas remociones alcanzadas fueron similares a las obtenidas por Collazos y Méndez (2015), quienes trataron efluentes del lavado de estanques de trucha con concentraciones promedio del 216 mg/L y velocidades de filtración del entre 2 y 5 m/H, con dos capas de geotextil NT 2000 sobre NT 1600.

Al comparar estadísticamente las eficiencias de remoción alcanzadas para las distintas velocidades estudiadas, utilizando la prueba de Kruskal-Wallis para valores

independientes, con un nivel de confiabilidad del 95%, se determinó que no existe una diferencia estadísticamente significativa ( $P=0,706566$ ) (ver Anexo 2A). Este resultado es contrario al obtenido por Collazos y Méndez (2015), los cuales encontraron que existían diferencias significativas en la remoción de sólidos suspendidos totales utilizando geotextiles como medio filtrante para velocidades de filtración entre 2 y 5 m/h.



**Figura 5.** Formación de torta de lodos en la superficie del medio filtrante.

En las tres velocidades de filtración se presentó la formación de una torta o capa de lodo sobre la superficie del geotextil (ver figura 5), por lo que se puede inferir que el mecanismo de filtración que predominó en este proceso fue el de filtración en superficie producido por el efecto del tamiz. Según estudios previos, estos efluentes se caracterizan por presentar partículas con tamaños que van desde los 0,0014 a 0,25 mm (Pabón y Rodríguez, 2015) mientras que el geotextil que reside en la superficie de la configuración usada presenta un tamaño de abertura aparente de 0,18 mm. Esta característica de tamaño de partícula puede explicar la formación de la torta o capa ya que las partículas más grandes pueden ser retenidas inicialmente por el mecanismo de colado ayudando a la formación de una torta inicial que disminuye el tamaño de poro nominal para la retención de las partículas finas y aumenta el área superficial específica de filtración (Mahdi & Holdich, 2013; Ni, Yu, Lu, & Howes, 2006; Sacramento et al., 2015; Fernández et. al, 2001 Citado por Collazos y Méndez), aumentando de esta manera sustancialmente la eficiencia en el proceso de remoción (Mulligan et. al 2009). Es claro que si bien la eficiencia de remoción aumenta esto también tendría efectos sobre la rápida obstrucción del geotextil.

#### **8.4 Remoción de sólidos totales en el efluente de los Filtros Rápidos**

La eficiencia de remoción en los sólidos totales alcanzada en el agua efluente de filtros rápidos presentó un rango entre el 15,8 y 93,2% (ver Tabla 5), presentando una mayor variabilidad que en el efluente de lavado de los sedimentadores. Esta menor eficiencia podría estar relacionadas con dos aspectos: la dosificación de coagulantes químicos y el dominio de menores tamaños de partícula que llegan a los filtros rápidos. Las eficiencias de remoción más bajas fueron obtenidas durante la réplica 1, (ver Tabla 4), la cual correspondió con el periodo de trabajo de los filtros correspondiente a los días 1 y 2 Marzo de 2017, periodo en el cual se presentaron turbiedades <5 UNT en el agua cruda del sistema de tratamiento, y por tanto no se aplicó coagulante para realizar el tratamiento del agua. Este aspecto podría generar la presencia de partículas con un menor tamaño del que normalmente llega cuando se realiza la coagulación. De otra parte, un estudio de la distribución de tamaños de partícula presentes en la fuente de lavado de los filtros rápidos de la planta el Tablazo, mostró que el 95% de las partículas tenían tamaños menores a 0,025 mm (Pabón y Rodríguez, 2015). Estos menores tamaños de partícula generan mayores limitantes para mantener una mayor eficiencia, si no han sido desestabilizados previamente durante el proceso de coagulación-floculación.

Al comparar estadísticamente las eficiencias de remoción alcanzadas para las distintas velocidades estudiadas, utilizando la prueba de Kruskal-Wallis para valores independientes, con un nivel de confiabilidad del 95%, se determinó que no existe una diferencia estadísticamente significativa ( $P= 0,925961$ ) (ver Anexo 2B).

El efecto de formación de una torta sobre el geotextil también se presentó con este tipo de efluente, sin embargo, al presentar una menor concentración de sólidos en el afluente y menores eficiencias de remoción comparadas con lo evaluado para el efluente de los sedimentadores, es de esperarse que la obstrucción del geotextil tome un mayor tiempo.

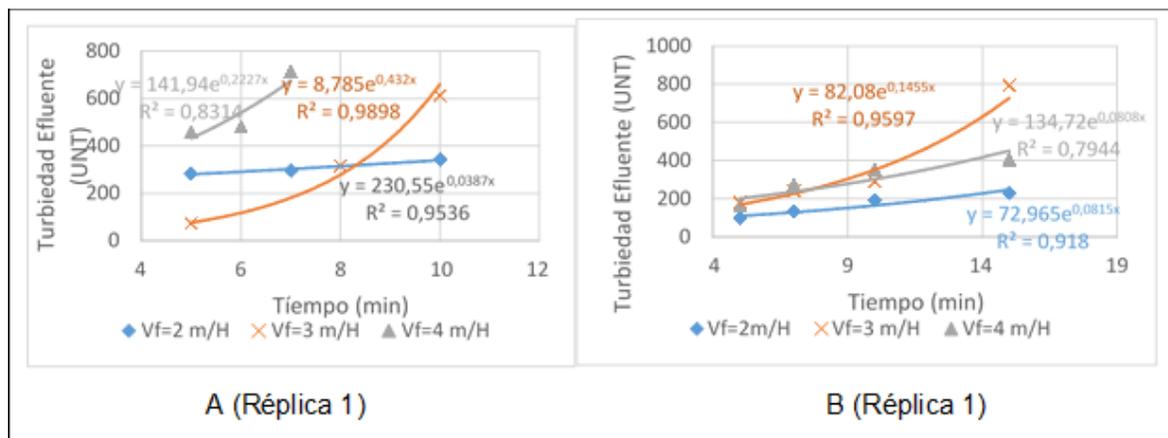
Estos resultados, tanto los alcanzados con el agua efluente de sedimentadores como con los del filtro rápido, están indicando que la velocidad de filtración no tiene importancia sobre la remoción de los sólidos totales para velocidades de filtración

entre 2 y 4 m/H. Sin embargo, si existe una diferencia entre el valor de la eficiencia dependiendo del tipo de agua tratada. En este caso las mayores eficiencias se alcanzaron en el tratamiento del agua efluente del sedimentador.

### 8.5 Remoción de Turbiedad en el sistema piloto.

Las eficiencias de remoción de turbiedad alcanzadas estuvieron en el rango del 89.9 al 99.1% para el tratamiento de agua efluente del lavado de sedimentadores y del 51.1 al 97.5% para el agua efluente del lavado de filtros, valores que fueron similares a los presentados en la remoción de los sólido totales.

En ambos casos se observó que la turbiedad en el efluente filtrado se incrementa con el tiempo, tal como se presenta en la Figura 6. Esto está indicando que el geotextil se satura muy rápidamente con la llegada de los sólidos y se inicia un progresivo traspase del lodo o desprendimiento del mismo que genera este tipo de incremento. Esto indica además que el uso de los geotextiles podría verse limitado por la duración de carrera, medida en términos de calidad.



**Figura 6.** Comportamiento de la turbiedad efluente para las diferentes velocidades estudiadas, tratando agua efluente del lavado del sedimentador (A) y de filtros rápidos (B).

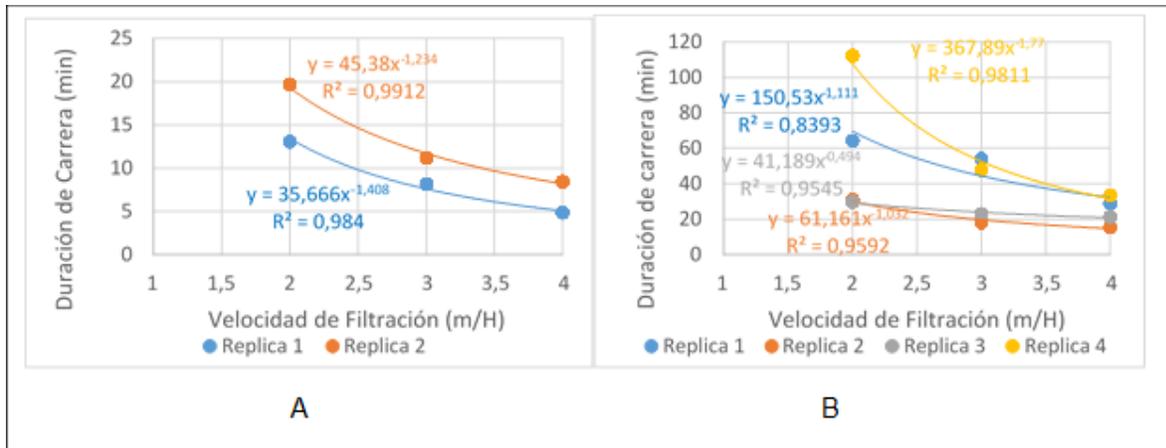
Al comparar estadísticamente las turbiedades efluentes para las distintas velocidades de filtración, utilizando la prueba de Kruskal-Wallis para valores

independientes, con un nivel de confiabilidad del 95%, se determinó que no existe una diferencia estadísticamente significativa cuando se trata el efluente de lavado de los sedimentadores ( $P=0,152398$ ). De igual manera no se encontraron diferencias significativas entre las velocidades de filtración en el efluente del lavado de filtros rápidos ( $P= 0,330201$ ) (ver Anexo 2C y 2D).

## **8.6 DESARROLLO DE LA PÉRDIDA DE CARGA Y SU IMPACTO SOBRE LA DURACIÓN DE CARRERA.**

Tal como se mostró en la figura 2 y 3, las pérdidas de carga presentaron un comportamiento que se ajusta a una regresión por mínimos cuadrados de tipo Potencial, con índices de correlación de Pearson ( $R^2$ ) mayores al 95%, aunque dos réplicas presentaron índices menores a este valor, pero mayores del 80%. Estos valores explican claramente la dependencia de entre el desarrollo de la pérdida de carga y el tiempo de trabajo. Las gráficas también muestran que cuanto menor es la velocidad de filtración es más lento el desarrollo de la pérdida de carga, lo cual se considera un comportamiento lógico ya que la mayor parte de las pérdidas de energía se deben a la fricción generada por la velocidad de flujo.

Con el fin de evaluar el impacto del desarrollo de la PC en la duración de carrera del filtro, se utilizaron los ajustes por mínimos cuadrados alcanzados y determinó estimó la duración de carrera para una pérdida de carga de 20 cm y se graficaron en función de la velocidad de filtración. Los resultados encontrados se presentan en la Figura 7.



**Figura 7.** Duración de carrera de filtración en función de la velocidad de filtración efluente de lavado de sedimentadores (A) y filtros rápidos (B) para las réplicas evaluadas.

Las Curvas de la Figura 7 muestran que cuanto menor sea la velocidad, el desarrollo es más lento de la pérdida de carga y se presenta una tendencia al aumento en la duración de carrera. Resultados similares fueron obtenidos por Campos y Medina (2013), en estudios similares evaluando la viabilidad de remoción de efluentes de lavado de estanques de trucha.

Si bien las tendencias de las curvas en las de ajuste entre la velocidad de filtración y la duración de carrera fueron similares para todas las réplicas, éstas presentaron valores distintos para una misma velocidad de filtración. Esta variación en los datos se presume fue ocasionada por la concentración inicial de sólidos totales de muestra de lavado, tanto en sedimentador como en el efluente de los filtros rápidos. En este sentido las concentraciones más altas de sólidos generan desarrollos rápidos de pérdida de carga y menores duraciones de carrera.

### **8.7 Efluente de lavado del Sedimentador.**

Tal como se aprecia en la Figura 6A, la duración de carrera máxima alcanzada fue de 20 min para la velocidad de filtración de 2 m/h y la más baja fue de apenas 5 min para la velocidad de 4 m/h. Considerando que la evacuación los lodos de un sedimentador como el que se presenta en la Planta de tratamiento de El Tablazo, toma un tiempo en el rango de 45 a 60 min y su lavado total del orden de 120 min, las duraciones de carrera máximas alcanzadas la utilización del geotextil NT, en las velocidades de filtración evaluadas, no alcanzarían a cubrir los tiempos requeridos para la evacuación del lodo del sedimentador. Estos datos indican que en términos prácticos podría no ser una solución adecuada para la remoción de sólidos totales en las velocidades de filtración evaluadas y que una posible aplicación para el tratamiento de estos efluentes tendría que estar basada en tanques de homogenización y compensación previa, permitan el uso de sistemas con geotextiles en serie.

### **8.8 Efluente del lavado de los Filtros Rápidos.**

Las duraciones de carrera alcanzada en el tratamiento del agua efluente del filtro rápido estuvo en el rango entre 15 y 112 min para el rango de velocidades evaluado. Al igual que en el tratamiento del efluente del sedimentador, la duración de carrera presentó variaciones para cada velocidad en cada réplica realizada, lo que mostró el efecto generado por la concentración de sólidos totales en el agua a tratar.

Para establecer el efecto de la velocidad de filtración sobre la duración de carrera, se compararon estadísticamente utilizando la prueba de Kruskal-Wallis para valores independientes, con un nivel de confiabilidad del 95%. La prueba indicó que se determinó que no existe una diferencia estadísticamente significativa ( $P= 0,281111$ ) entre las duraciones de carrera para las diferentes velocidades estudiadas (Anexo 3). Este resultado está indicando que a pesar de que la velocidad de filtración y la duración de carrera presentan un ajuste de tipo lineal, tal como se aprecia en la figura (6) turbiedad vs tiempo, la velocidad de filtración no afecta la duración de carrera, lo

cual implicaría que la utilización de la mayor velocidad de filtración tendría un gran potencial de uso, por las menores áreas que requeriría para filtrar un mismo caudal.

Al considerar la evacuación los lodos en los filtros rápidos como el que se presenta en la Planta de tratamiento de El Tablazo, toman un tiempo en el rango de 12 a 15 min (Pabón y Rodríguez, 2015) y las duraciones de carrera alcanzadas están en el rango entre 15 y 112 min, lo que indica que para la remoción de sólidos totales en las velocidades de filtración evaluadas, es posible la aplicación de geotextiles NT para el tratamiento de este tipo de efluentes.

### **8.9 Impacto de la velocidad de filtración y la duración de carrera en el Volumen de agua Producido.**

Considerando que la aplicación de la filtración en geotextiles NT podría tener una mayor aplicación en el tratamiento de los efluentes de filtración, se determinó para las réplicas realizadas el caudal promedio tratado y así como su duración de carrera promedio (para alcanzar una pérdida de carga de 20 cm), se calculó el volumen de agua producido por cada filtro (ver tabla 6).

**Tabla 6.** Volumen de agua producido.

Velocidad de Filtración (m/h)	Caudal promedio (ml/min)	Duración promedio (min)	Volumen Producido (ml)
2	513,3	59,4	30466,5
3	769,7	35,7	27451,8
4	1026,7	24,7	25401,4

Tal como se aprecia en la tabla 5, el volumen de agua producido está en relación inversa con la velocidad de filtración, a mayor velocidad menor volumen de agua. El uso de la velocidad de filtración de 2m/h genera una 19,9% más de agua respecto de la velocidad de 4 m/h y del 11% respecto de la velocidad de 3 m/h. Esto claramente muestra que las velocidades de filtración bajas generan un mayor potencial para la producción de agua.

En este sentido, dado que la calidad del agua filtrada en términos de turbiedad y sólidos suspendidos no presenta diferencias significativas para las velocidades de filtración, y que variables como la duración de carrera tampoco generaron diferencias significativas, la variable volumen producido de agua estaría siendo el indicador más importante para la recomendación de la velocidad de filtración a utilizar en un proceso de escalamiento, que para el caso específico se debería considerar la velocidad de filtración de 2 m/h.

## 9. CONCLUSIONES.

- El uso del geotextil NT 1600 como medio filtrante para remover los lodos provenientes del lavado de filtros rápidos y sedimentadores, desde el punto de vista calidad del agua puede ser considerado un método eficaz para remover los sólidos suspendidos.
- El uso de geotextil NT 1600 como medio filtrante y la utilización de velocidades de 2, 3 y 4 m/h empleadas en la filtración de lodos provenientes de sedimentadores, si bien mostró una alta eficiencia de remoción en sólidos suspendidos, su impacto sobre el rápido desarrollo de la pérdida de carga y la poca duración de carrera comprometen su viabilidad como tratamiento para este tipo de efluentes.
- En el tratamiento del efluente de lavado de filtros rápidos con el uso de geotextil NT 1600 y velocidades de filtración de 2, 3 y 4 m/h se considera como una opción viable para la separación de los lodos, tanto desde el punto de vista de remoción de sólidos en suspensión como por el desarrollo de pérdida de carga y la duración de carrera.
- Si bien los resultados de la presente investigación mostraron que no se presentan grandes diferencias entre las velocidades de filtración 2, 3 y 4 m/h, la mayor producción de agua generada por la velocidad de filtración de 2 m/h permite recomendar esta velocidad de filtración para un posible escalamiento de la tecnología.

## BIBLIOGRAFIA.

Bernardo O. Ferreira. (2013). Eficiência do desaguamento de lodos de decantadorese água de lavagem de filtros de estação de tratamento de água através de filtros geotêxteis. September 2013.

Bueno Karen A., Quiñones A, (2010) Uso de Geotextiles NT para el Control de la Contaminación Generada por sólidos suspendidos en la cría de trucha: Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería., 2010. # pag. Tesis

Campos, F., y Medina, O. (2013). Estudio de tratabilidad de efluentes de lavado de estanques piscícolas de trucha. Popayán 2013.

Di Bernardo, L; Ruiz, C. (1991). Uso de mantas sintéticas em pré-filtros de pedregulho para pré-tratamento de águas de abastecimento. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Brasil 1991.

Fernández J., Latorre J., Berón F., Muñoz N Y Vargas V. (2001). “Uso de mantas sintéticas y naturales en filtración lenta en arena, una experiencia en ambientes tropicales”, *Instituto Cinara*, Universidad del valle. p. 1-8.

Fernández, J. Escobar, I. y Peña W (2009). Determinación de la viabilidad en uso de geotextil no tejido como medio filtrante, en flujo horizontal, para la remoción de solidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes en efluentes de piscifactorías de trucha. Colombia Ingeniería hoy ISSN: 0121-392X Ed; Editorial Universidad del Cauca.

Ferraz, C; Paterniani,J. (2002). Redução da espessura da camada suporte através da substituição por mantas não-tecidas na filtração lenta de águas de abastecimento.Brasil.

Greenfacts. Recursos hídricos. (2009). 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los recursos hídricos en el mundo.

Luna, M., Fernández, J. Caicedo, J. (2014). Estudio de geotextiles para el tratamiento de efluente del cultivo de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). VI

Congreso Colombiano de Acuicultura y XX Jornada de Acuicultura. Villavicencio Colombia. Octubre de 2014.

Méndez, S., y Collazos, S. (2015). Optimización de la configuración del tamaño aparente y la velocidad de filtración de un geotextil no tejido utilizado en la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes en efluentes de lavado de piscifactorías de trucha arco iris. Popayán 2015.

MOO-YOUNG, H. K. (2002). Testing procedures to Assess the Viability of Dewatering with Geotêxtil Tube. Geotextiles and Geomembranes. ELSEVIER n°20. E.U.A. et al. (2002)

Mulligan, C. N., Davarpanah, N., Fukue, M., & Inoue, T. (2009). Filtration of contaminated suspended solids for the treatment of surface water. Chemosphere, 74(6), 779–786. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.10.055>

Pabón, E., y Rodríguez, J (2015). Estudio de los Lodos Generados por las Unidades de Sedimentación y Filtración de la Planta de Tratamiento de Agua Potable EL TABLAZO en la ciudad de Popayán.

Padua, V.L.; Di Bernardo, L. (1997). Empleo de mantas sintéticas nos estudos de tratabilidade de agua químicamente coagulada. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Foz do Iguaçu, setembro de 1997.

Raigosa, M. (2012). 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. (2008). Lodos producidos en el tratamiento del agua potable. En: Revista técnica industrial. Junio 2008, 1 p.

Ramírez, F. Guillermo. (2003). Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, planta II, del municipio de Cartago, Valle

RAS. (2000). Reglamento técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Resolución No. 1096 del 17 de noviembre del 2000.

Universidad del Cauca, U. del V., CREPIC, C. regional de P. e I. del C., & MADR, M. de A. y D. rural. (2010). Proyecto Estudio, Diseño y Evaluación de un Prototipo de Estanque Piscícola.

## ANEXOS.

**Anexo 1.** Resultados de turbiedad (unt), para efluente de filtros rápidos del sistema piloto.

Replica		1		2		3		4	
turbiedad inicial (UNT)		115		60,4		50,3		238	
Q(ml/min)	V(m/h)	Tiempo (min)	Turbiedad (UNT)						
513,33	2	10	2,11	5	2,57	5	3,63	5	6,89
		20	2,82	10	9,36	10	4,01	10	45,8
		25	2,92	15	12,1	15	4,18	15	71,7
		30	2,99	20	13,4	20	4,25	20	72
		35	3,11	23	17,9	25	4,57	25	78,2
		40	3,14	25	19,3	30	5,06	30	76,6
		45	2,72			35	5,39		
						40	5,79		
769,66	3	10	4,01	5	1,8	5	3,59	5	31,7
		20	4,76	10	4,8	10	3,8	10	32,8
		25	5,24	15	11,8	15	3,84	15	74,8
		30	5,61	20	19,1	20	4,28	20	99,2
		35	7,31	23	22,5	25	4,68	24	104
		40	6,03	25	25,7	30	4,18		
		45	4,69			35	3,47		
						40	3,33		
1026,66	4	10	2,32	5	4,91	5	4,23	5	51
		20	4,14	10	17,7	10	4,69	10	109
		25	5,25	15	28,5	15	4,9	15	119
		30	6,29	20	36,4	20	5,46	20	124
		35	7,5	23	44,1	25	6,49		
		40	8,87	25	45,5	30	5,45		
						35	5,13		
						40	5,12		

## Anexo 2

- A) Comparación de sólidos totales para las diferentes velocidades de filtración tratando agua efluente de los sedimentadores.

### Prueba de Kruskal-Wallis para Efic. Rem. Sol. Sed. por Col\_2

<i>Col_</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
2	3	6,0
3	3	4,16667
4	3	4,83333

Estadístico = 0,694678 Valor-P = 0,706566

- B) Comparación de sólidos totales para las diferentes velocidades de filtración tratando agua efluente de los Filtros Rápidos.

### Prueba de Kruskal-Wallis para Efic. Rem. Sol. Fil. por Col\_4

<i>Col_</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
2	4	6,5
3	4	6,0
4	4	7,0

Estadístico = 0,153846 Valor-P = 0,925961

- C) Comparación turbiedades efluentes para diferentes velocidades de filtración que tratan agua efluente lavado de sedimentador

### Prueba de Kruskal-Wallis para Turbiedad Sedimentador por Col\_8

<i>Col_</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
2	7	7,71429
3	7	11,1429
4	7	14,1429

Estadístico = 3,76252 Valor-P = 0,152398

- D) Comparación turbiedades efluentes para las diferentes velocidades de filtración que tratan agua efluente de lavado de filtros

### Prueba de Kruskal-Wallis para Turbiedad por Col\_6

<i>Col_</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
2	27	33,8148
3	24	39,2292
4	25	42,86

Estadístico = 2,21611 Valor-P = 0,330201

### Anexo 3.

Prueba de Kruskal-Wallis para Dur. de Car PC 20 cm (min) por Vel. de Filt. (m/h)

<i>Vel. de Filt. (m/h)</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
2	6	12,1667
3	6	9,0
4	6	7,33333

Estadístico = 2,53801 Valor-P = 0,281111