



# Revista AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica

Volúmen 1, número 3, año 2007 ISSN 0718-378X  
PP

## **DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNA BATERÍA DE FILTRACIÓN DE TASA DECLINANTE, PARA UN CAUDAL DE 10.000 M<sup>3</sup>/H, MEDIANTE ESTUDIOS REALIZADOS EN PLANTA DE FILTROS PILOTO**

Determination of the optimum design parameters for a 10.000 m<sup>3</sup>/h declining rate filtration plant by using a pilot filters plant

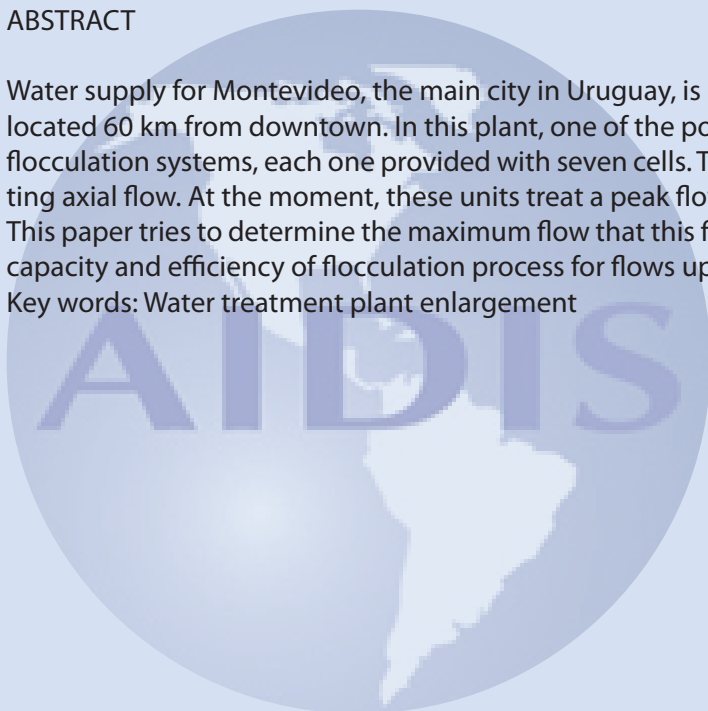
Rios, Danilo  
Manion, Ingrid  
Pintos, Margarita  
Azuriz, Karina  
Michelena, Alberto  
Martínez, Milton

### ABSTRACT

Water supply for Montevideo, the main city in Uruguay, is provided from the Aguas Corrientes treatment plant which is located 60 km from downtown. In this plant, one of the potabilization systems called "Planta Vieja" has two mechanical flocculation systems, each one provided with seven cells. The flocculation in each cell is made by vertical mixers generating axial flow. At the moment, these units treat a peak flow of 14.000 m<sup>3</sup>/h with a detention time of 30 minutes.

This paper tries to determine the maximum flow that this flocculation systems can admit, based on two items: hydraulic capacity and efficiency of flocculation process for flows up to 22.000 m<sup>3</sup>/h

Key words: Water treatment plant enlargement



## DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNA BATERÍA DE FILTRACIÓN DE TASA DECLINANTE, PARA UN CAUDAL DE 10.000 M<sup>3</sup>/H, MEDIANTE ESTUDIOS REALIZADOS EN PLANTA DE FILTROS PILOTO

### Rios, Danilo <sup>(1)</sup>

Ing. Civil Hidráulico Sanitario, Master en Ing. Ambiental de la Universidad de la República Oriental del Uruguay (UDELAR). Gerente de Producción de Obras Sanitarias del Estado de Uruguay (OSE). Profesor adjunto de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR, coordinador del curso Tratamiento de Agua Potable.



### Manion, Ingrid

Ing. Civil Hidráulico Sanitaria de la Universidad de la República Oriental del Uruguay. Jefe de tratamiento de la Planta de Aguas Corrientes (OSE) desde el 2002 a la fecha.

### Pintos, Margarita

Ing. Civil Hidráulico Sanitaria de la Universidad de la República Oriental del Uruguay. Proyectista y contraparte de los proyectos de rehabilitación de la Usina de Aguas Corrientes. Profesor adjunto de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR

### Azuriz, Karina

Ing. Civil Hidráulico Sanitaria de la Universidad de la República Oriental del Uruguay. Proyectista y contraparte técnica de los proyectos de rehabilitación de la Usina de Aguas Corrientes

### Michelena, Alberto

Operador de Tratamiento de la Planta de Aguas Corrientes entre los años 1971 y 1993. Encargado de Tratamiento de la Planta de Aguas Corrientes desde 1993 hasta la fecha

### Martínez, Milton

Encargado de Tratamiento de la Planta de Aguas Corrientes entre los años 1968 y 2005, y actualmente se desempeña como Supervisor de Producción.

**Dirección (1):** Carlos Roxlo 1275 - Montevideo - Código Postal 11.200 - Uruguay -  
 Tel.: 598 (2) 1952 int. 1948 - e-Mail: [drrios@ose.com.uy](mailto:drrios@ose.com.uy)

## RESUMEN

La etapa de filtración, como proceso unitario de potabilización de aguas superficiales, debe proyectarse con especial atención en tres parámetros fundamentales de diseño: la tasa de filtración, el espesor del manto filtrante, y la granulometría del mismo. Los dos primeros parámetros determinan en buena medida el “volumen de la batería”, y en consecuencia tienen un impacto directo sobre el costo de la obra.

En función de parámetros tales como la calidad del agua y el tipo de manto filtrante, la tasa de filtración de diseño puede situarse en el entorno que va desde menos de 10 y hasta más de  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ , por lo que la correcta elección de ese parámetro es muy importante, especialmente en baterías de gran porte como es este caso.

Actualmente, no se concibe un diseño racional del proceso de filtración sin el apoyo de una batería de filtros piloto, como elemento sustancial para la determinación de los parámetros de diseño. Valores inapropiados de estos parámetros, pueden llevar a subdimensionar o sobredimensionar las instalaciones, con graves consecuencias sobre el funcionamiento del proceso y/o los costos.

El sobre costo que implicaría proyectar en base a una tasa de filtración conservadora, es notoriamente superior al costo de construir y operar una planta piloto, para elegir correctamente los parámetros de diseño, y dimensionar con mayor grado de precisión las instalaciones.

El presente trabajo consiste en determinar la tasa de diseño, espesor del manto filtrante y composición granulométrica del mismo, para una batería de filtros de tasa declinante escalonada de  $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$ , a construirse como complemento de la etapa de filtración en la planta de Aguas Corrientes, que abastece de agua potable a la ciudad de Montevideo y Región Metropolitana.

## PALABRAS CLAVE

**Tasa de filtración, granulometría, antracita**

## INTRODUCCIÓN

En base al Plan Director de Agua Potable para la ciudad de Montevideo, elaborado por el consorcio SOGREAH – SAFEGE – CSI, se ha estimado que la planta de Aguas Corrientes debe potabilizar un caudal de  $33.000 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua al final del período de previsión, fijado en el año 2035.

Dicho Plan Director permitió prever la ampliación de los distintos procesos que tienen lugar en Aguas Corrientes, desde las captaciones de agua bruta, los procesos unitarios de tratamiento, y el bombeo de alta presión.

Particularmente en cuanto al proceso de filtración, la planta de Aguas Corrientes cuenta con una única batería de filtros rápidos de arena, de tasa y nivel constantes, construida con patente INFILCO en la década de los años 60. Dicha batería, dado su avanzada edad, presenta un importante estado de deterioro, a pesar de haber sido parcialmente rehabilitada en el año 1992.

La conformación de los mantos filtrantes de arena, la altura de la “caja de filtración” y el nivel de agua sobre los mantos, determinan para ese tipo de baterías una tasa máxima de funcionamiento que no puede superar los  $7,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ .

Por lo tanto, si bien una rehabilitación de la batería existente sigue siendo necesaria, se estimó que no sería confiable asignarle a dicha batería la responsabilidad de erogar la totalidad del caudal de diseño a fin de período, ya que debería operar en el año

2035 con tasas superiores a las recomendadas, con instalaciones que superarían los 70 años de edad.

Durante los años 2003 y 2004 se realizaron estudios de evaluación del sistema por parte de técnicos de OSE, que llevaron a concluir la necesidad de construir una nueva batería de filtros, para un caudal de 10.000 m<sup>3</sup>/h, que permitiría bajar el caudal de la batería existente, que operaría a final del período de previsión con tasas que no superarían los 6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h.

Con el objetivo de fijar las bases de diseño de la nueva batería, se proyectó y construyó una planta de filtros piloto, la cual se estimó debía operar durante un período prolongado para cubrir calidades de agua bruta de diferentes características.

## OBJETIVOS Y METAS

El objetivo del trabajo consiste en determinar los principales parámetros de diseño para la nueva batería de filtros, que son la tasa de filtración, el espesor del manto filtrante y la granulometría del mismo, a partir de sucesivas campañas de trabajo desarrolladas en una planta piloto, diseñada y construida específicamente con ese objetivo. Dichos parámetros son necesarios para luego efectuar un diseño óptimo y racional de los filtros.

## METODOLOGIA

### Descripción de la Planta Piloto

La instalación piloto está formada por 4 filtros de acrílico transparente de 150 mm de diámetro, paredes de 6 mm de espesor, y una altura total de 4,20 m, y puede procesar un caudal máximo de 2.400 l/h. Para poder comparar resultados, estos filtros funcionan con tasa constante (Arboleda, 2000), y reciben por gravedad agua sedimentada desde los “acelerators” (clarificadores de manto de lodos existentes), a través de una caja repartidora de caudales.

El caudal de agua sedimentada que ingresa a los filtros, y el caudal utilizado para el lavado a contracorriente de los mismos, son medidos con respectivos rotámetros, que tienen el grado de precisión apropiado para este tipo de ensayos.

Para evaluar el depósito de material floculento en el manto filtrante, los filtros cuentan con tomas para instalar piezómetros cada 0,10 m de altura. Los mantos filtrantes ensayados son de antracita, y todos cuentan con el mismo falso fondo y manto soporte de grava.

El cuerpo de los filtros está armado por tramos bridados, de modo que pueden ajustarse las cotas de la canaleta de lavado, de ingreso de agua sedimentada, y de salida de agua filtrada, en función de los ensayos que deban ser realizados.

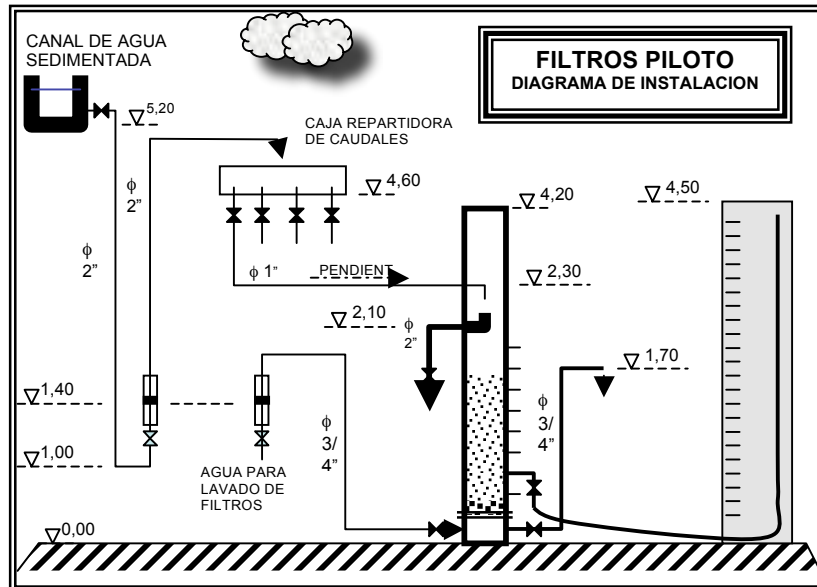


Figura N°1: Diagrama de la Planta de Filtros Piloto

### Plan de Trabajo

Se realizaron cuatro campañas de trabajo, durante las tres primeras se compararon diferentes configuraciones que permitieron definir la granulometría de los mantos filtrantes, y se obtuvo una aproximación a la tasa de diseño. Durante la cuarta campaña se operaron los cuatro filtros piloto con diferentes espesores de manto y la misma granulometría, seleccionada en base a las campañas anteriores. Las campañas consistieron en operar la planta piloto en forma continua, efectuando mediciones de turbiedad, color, alcalinidad y pH en los efluentes de los filtros piloto, durante varias carreras de filtración, totalizando un tiempo de aproximadamente una semana de trabajo continuo por cada campaña.

También se monitoreó la calidad del agua bruta y sedimentada (afluente a los filtros), y las pérdidas de carga en distintos tramos de los mantos filtrantes. Todas las campañas se realizaron para tres diferentes tasas de filtración:  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ,  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  y  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ .

### Configuración de los mantos filtrantes ensayados

Para las campañas 1 a 3 se colocó por debajo del manto de antracita, un manto de arena de reducido espesor, como puede observarse en la siguiente tabla. En el filtro N° 1 se colocó antracita de tipo “comercial”, importada de EEUU especialmente para estos ensayos, los mantos de los filtros 2 y 3 se armaron en base a un tamizado de la misma antracita, y el manto del filtro N° 4 se armó con antracita suministrada para la planta potabilizadora de San Ramón.

		FILTRO 1	FILTRO 2	FILTRO 3	FILTRO 4
Espesor del manto de antracita (m)		1,00	1,00	1,00	1,00
Granulometría del manto de antracita	T.E. (mm)	1,84	1,61	1,05	0,85
	C.U.	1,42	1,36	1,37	1,95
Manto de arena (espesor 0,20 m)	T.E. (mm)	1,26	1,26	0,5	0,5
	C.U.	1,33	1,33	1,7	1,7
Manto soporte de grava (dos capas de 0,05 m de espesor)		1,5 a 3 mm	1,5 a 3 mm	1,5 a 3 mm	1,5 a 3 mm
		3 a 5 mm	3 a 5 mm	3 a 5 mm	3 a 5 mm

**Tabla N°1: Configuración de los mantos filtrantes durante las campañas 1 a 3 (T.E. = Tamaño efectivo de los granos, C.U. = coeficiente de uniformidad)**

En la cuarta campaña se trabajó en todos los filtros con la misma granulometría de antracita (T.E. = 0,90 mm y C.U. = 1,54), ya previamente seleccionada en base a los resultados de las campañas 1 a 3, pero con diferentes espesores de manto (0,8 m, 1,0 m, 1,2 m y 1,4 m). El suministro de antracita fue una partida adquirida por OSE para la planta potabilizadora de Rio Branco.

### Criterios utilizados para evaluar los resultados

Los resultados se analizaron en base a un balance entre la calidad del agua filtrada obtenida, y la evolución de las pérdidas de carga resultantes, teniendo en cuenta que las turbiedades que se obtienen en filtros piloto de estas características, no son fielmente representativas de la realidad, sino que tienden a ser levemente superiores a los valores obtenidos en filtros de tamaño real, particularmente por efectos de “pared” (Kawamura, 2000).

Se adoptaron los siguientes indicadores: turbiedad del agua filtrada (promedio, máximo y mínimo), duración de la carrera de filtración (hasta desarrollar una pérdida de carga total de 2 m.c.a., o llegar a un máximo preestablecido de 48 horas), porcentaje de tiempo en que la turbiedad se mantiene por debajo de 0,5 NTU y 1,0 NTU, y pérdida de carga en los diferentes tramos del manto filtrante, definidos por los piezómetros instalados.

Se le dio especial importancia a la turbiedad del agua filtrada, dado que el mejoramiento de la calidad del agua se encuadra dentro de los objetivos principales del proyecto, y se descartaron aquellas configuraciones para las cuales la carrera de filtración fue inferior a 24 horas.

## RESULTADOS

### Campañas de trabajo 1 a 3

Los resultados surgen de comparar para un mismo caudal de operación (equivalente a una tasa de filtración), los valores de turbiedad y color del agua filtrada, y la evolución de las pérdidas de carga, entre los cuatro filtros piloto. Asimismo, se analizó el comportamiento de cada filtro piloto frente a diferentes caudales, en este caso correspondientes a tasas de filtración de  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ,  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  y  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ .

<b>RESUMEN DE RESULTADOS PARA TASA DE FILTRACIÓN = 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h (FILTROS PILOTO CON DISTINTAS GRANULOMETRÍAS)</b>						
	<b>TURBIEDAD AGUA FILTRADA (NTU)</b>			<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 0,5 NTU</b>	<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 1,0 NTU</b>	<b>CARRE RA (HORA S)</b>
	<b>MÍN</b>	<b>PROM</b>	<b>MÁX</b>			
<b>FILTRO 1</b> T.E.=1,84 mm	0,16	0,59	2,38	67	84	48
<b>FILTRO 2</b> T.E.=1,61 mm	0,12	0,43	1,90	80	89	48
<b>FILTRO 3</b> T.E.=1,05 mm	0,09	0,31	1,39	84	92	48
<b>FILTRO 4</b> T.E.=0,85 mm	0,09	0,31	1,42	84	93	48

**Tabla N°2: Resumen de resultados carrera N° 1 (tasa de filtración 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, turbiedad promedio del agua sedimentada 2,87 NTU, comienzo 11:30 hs del 8/11/04). Los valores máximos que se presentaron obedecen a deficiencias en el sistema de dosificación.**

<b>RESUMEN DE RESULTADOS PARA TASA DE FILTRACIÓN = 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h (FILTROS PILOTO CON DISTINTAS GRANULOMETRÍAS)</b>						
	<b>TURBIEDAD AGUA FILTRADA (NTU)</b>			<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 0,5 NTU</b>	<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 1,0 NTU</b>	<b>CARRE RA(HO RAS)</b>
	<b>MÍN</b>	<b>PROM</b>	<b>MÁX</b>			
<b>FILTRO 1</b> T.E.=1,84 mm	0,45	1,05	2,23	7	52	48
<b>FILTRO 2</b> T.E. =1,61 mm	0,29	0,91	1,89	28	57	43,5
<b>FILTRO 3</b> T.E.=1,05 mm	0,20	0,71	1,63	37	77	29
<b>FILTRO 4</b> T.E.=0,85 mm	0,16	0,46	1,04	60	98	20,5

**Tabla N°3: Resumen de resultados carrera N° 1 (tasa de filtración 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, turbiedad promedio del agua sedimentada 3,15 NTU, comienzo 11:30 hs del 4/10/04)**



RESUMEN DE RESULTADOS PARA TASA DE FILTRACIÓN = 20 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h (FILTROS PILOTO CON DISTINTAS GRANULOMETRÍAS)						
	TURBIEDAD AGUA FILTRADA (NTU)			PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB < 0,5 NTU	PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB < 1,0 NTU	CARRE RA (HORA S)
	MÍN	PROM	MÁX			
<b>FILTRO 1</b> T.E.=1,84 mm	0,55	1,37	2,70	0	22	48
<b>FILTRO 2</b> T.E.=1,61 mm	0,33	0,87	2,43	13	81	30,5
<b>FILTRO 3</b> T.E.=1,05 mm	0,32	0,65	1,48	53	87	26
<b>FILTRO 4</b> T.E.=0,85 mm	0,31	0,67	1,28	25	94	17,5

Tabla N°4: Resumen de resultados (tasa de filtración 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, turbiedad promedio del agua sedimentada 3,53 NTU). Filtro N° 1: los datos corresponden a la carrera N°1 (de 10:30 hs del 7/12/04 a 10:30 hs del 9/12/04). Filtro N° 2: los datos corresponden a la carrera N°2 (de 14:00 hs del 7/12/04 a 20:30 hs del 8/12/04). Filtro N° 3: los datos corresponden a la carrera N°3 (de 1:30 hs del 8/12/04 a 3:30 hs del 9/12/04). Filtro N° 4: los datos corresponden a la carrera N°3 (de 19:00 hs del 7/12/04 a 12:30 hs del 8/12/04)

En el siguiente gráfico se observa la evolución de la pérdida de carga total y la turbiedad del agua filtrada obtenida en uno de los filtros (filtro N° 4), operando a una tasa de 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h.

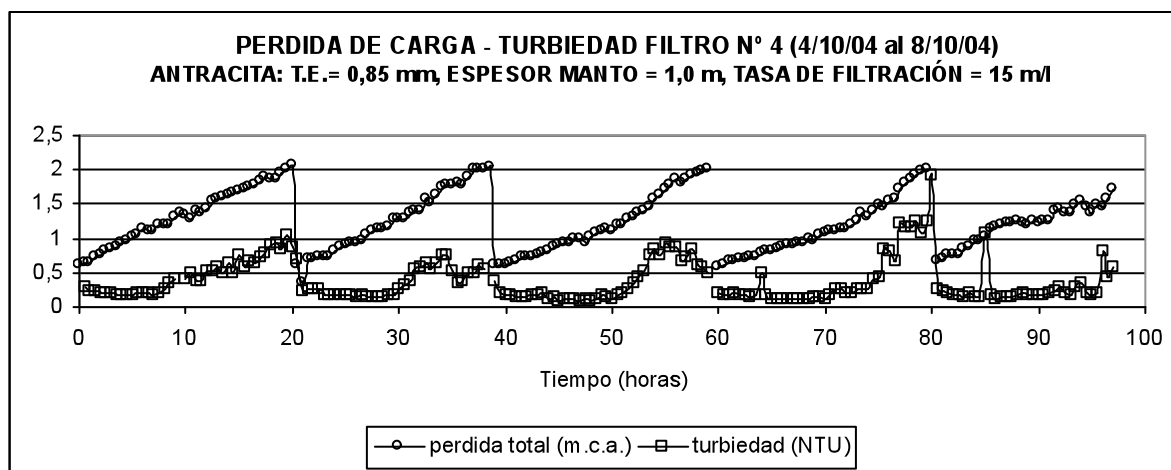


Gráfico N°1: Evolución de pérdidas de carga y turbiedades en un filtro piloto durante una campaña de trabajo

Campaña de Trabajo N° 4

La cuarta campaña de trabajo se desarrolló con el objetivo de determinar el espesor del manto filtrante, y la tasa de filtración de diseño, para una granulometría preestablecida en base a los resultados de las campañas 1 a 3. Se operó la planta piloto con tasas de  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  y  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ , y estando en operación con esta última tasa, se bajó el caudal pasando a operar durante 24 horas con una tasa de  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ . Los resultados obtenidos para la tasa de  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  no pueden presentarse con el mismo formato, ya que en el momento de bajar el caudal, los filtros tenían diferentes horas en operación, desde su último lavado a contracorriente.

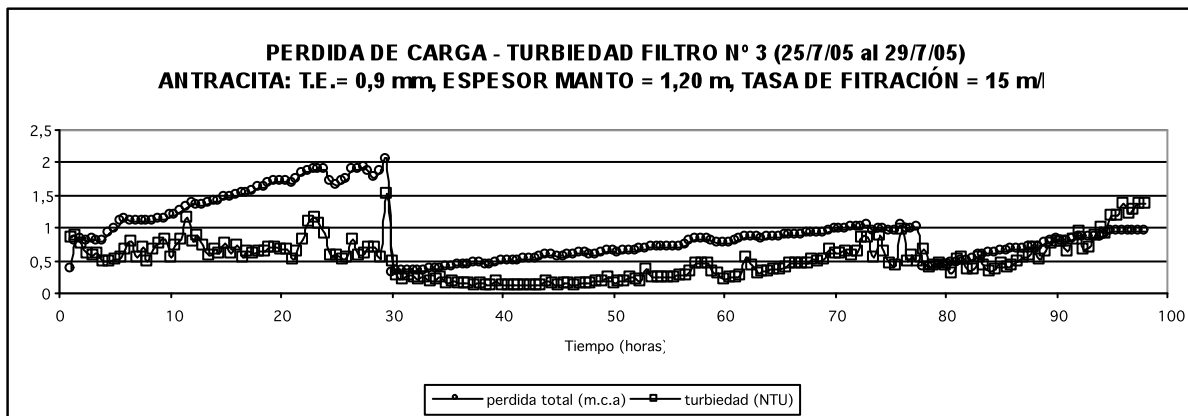
<b>RESUMEN DE RESULTADOS PARA TASA DE FILTRACIÓN = <math>15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}</math> (FILTROS PILOTO CON DIFERENTES ESPESORES DE MANTO FILTRANTE, Y LA MISMA GRANULOMETRÍA , T.E.= 0,9 mm y C.U = 1,54)</b>						
	<b>TURBIEDAD AGUA FILTRADA (NTU)</b>			<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 0,5 NTU</b>	<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 1,0 NTU</b>	<b>CARRERA (HORAS)</b>
	<b>MÍN</b>	<b>PROM</b>	<b>MÁX</b>			
<b>FILTRO 1</b> espesor 0,80 m	0,51	1,02	2,23	0	61	48
<b>FILTRO 2</b> espesor 1,00 m	0,10	0,51	1,41	49	93	48
<b>FILTRO 3</b> espesor 1,20 m	0,12	0,32	0,98	84	100	46
<b>FILTRO 4</b> espesor 1,40 m	0,37	0,77	1,48	14	81	39

**Tabla N°5: Resumen de resultados (tasa de filtración  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ). Filtro N° 1: los datos corresponden a la carrera N°1 (de 10:00 hs del 25/7/05 a 10:00 hs del 27/7/05). Filtro N° 2: los datos corresponden a la carrera N°1 (de 10:00 hs del 25/7/05 a 10:00 hs del 27/7/05). Filtro N° 3: los datos corresponden a la carrera N°2 (de 16:00 hs del 26/7/05 a 14:00 hs del 28/7/05). Filtro N° 4: los datos corresponden a la carrera N°1 (de 10:00 hs del 25/7/05 a 1:00 hs del 27/7/05). Turbiedades promedio del agua sedimentada durante las carreras analizadas: 3,57 NTU para los filtros N°s 1 y 2, 3,56 NTU para el filtro N°3, y 3,71 NTU para el filtro N°4**

<b>RESUMEN DE RESULTADOS PARA TASA DE FILTRACIÓN = 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h (FILTROS PILOTO CON DIFERENTES ESPESORES DE MANTO FILTRANTE, Y LA MISMA GRANULOMETRÍA , T.E.= 0,9 mm y C.U = 1,54)</b>						
	<b>TURBIEDAD AGUA FILTRADA (NTU)</b>			<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 0,5 NTU</b>	<b>PORCENTA JE DE TIEMPO CON TURB &lt; 1,0 NTU</b>	<b>CARRE RA (HORA S)</b>
	<b>MÍN</b>	<b>PROM</b>	<b>MÁX</b>			
<b>FILTRO 1</b> espesor 0,80 m	0,59	1,27	2,49	0	23	25,5 (*)
<b>FILTRO 2</b> espesor 1,00 m	0,47	1,08	1,88	11	34	25,5 (*)
<b>FILTRO 3</b> espesor 1,20 m	0,48	1,09	1,77	2	31	25,5 (*)
<b>FILTRO 4</b> espesor 1,40 m	0,45	0,98	1,84	6	52	25,5 (*)

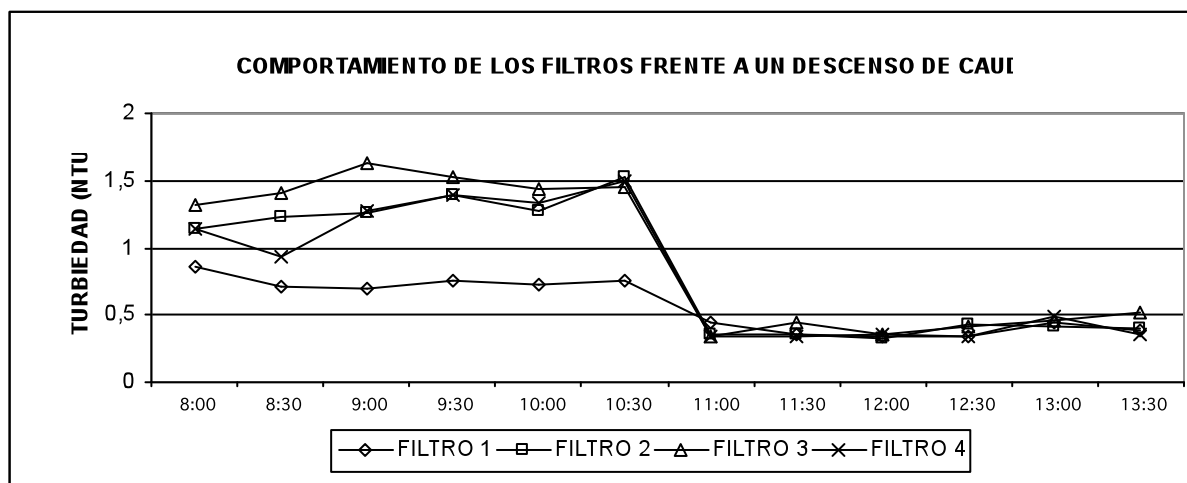
**Tabla N°6: Resumen de resultados carrera N° 1 (tasa de filtración 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, turbiedad promedio del agua sedimentada 3,78 NTU, datos tomados entre las 10:00 hs del 15/08/05 y las 11:30 hs del 16/08/05).**

**(\*) Las carreras se interrumpieron pues todos los filtros había desarrollado turbiedades superiores a 1,5 NTU. Las pérdidas de carga al interrumpir las carreras eran: Filtro N°1: 1,30 m.c.a., Filtro N°2: 1,63 m.c.a., Filtro N°3: 1,63 m.c.a., Filtro N°4: 1,93 m.c.a.**



**Gráfico N°2: Evolución de pérdidas de carga y turbiedades en un filtro piloto durante la cuarta campaña de trabajo**

A las 11:00 horas del 18/08/05 se bajó bruscamente el caudal de los filtros piloto, con el objetivo de evaluar el efecto que produce ese fenómeno sobre la calidad del agua filtrada. Estando los filtros en operación a 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, se pasó a operarlos con una tasa de 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h. Los resultados se observan en el siguiente gráfico:



**Gráfico N°3: Efecto de un descenso de caudal sobre la calidad del agua filtrada, durante la cuarta campaña de trabajo. El filtro N°4 llevaba pocas horas de operación**

En el momento de bajar el caudal, el filtro N° 1 llevaba 3,5 horas de operación, los filtros N°s 2 y 3 llevaban 12 horas, y el filtro N° 4 llevaba 11,5 horas de operación.

## CONCLUSIONES

Los filtros de granulometría “gruesa” y manto profundo (filtros 1 y 2), para tasas de filtración elevadas ( $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ), si bien desarrollaron muy poca pérdida de carga, no removieron adecuadamente la turbiedad. En las tres primeras campañas, los mejores resultados se ubicaron en torno a los filtros 3 y 4 operando a  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ , con turbiedades del agua filtrada del orden de 0,5 NTU y pérdidas de carga de 1,5 m.c.a. a las 24 horas de operación.

También se observó en estas campañas que con una tasa superior a  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  se desmejoran los resultados, ya que los filtros de granulometría “gruesa” (filtros 1 y 2), si bien desarrollaron poca pérdida de carga, no removieron adecuadamente la turbiedad, y los filtros de granulometría “más fina” (filtros 3 y 4), presentaron elevadas pérdidas de carga, y no se destacaron por su remoción de turbiedad. Las conclusiones del trabajo se pueden resumir en:

- Los filtros de “lecho profundo” y granulometría “gruesa” (T.E. > 1,5 mm), no dieron buenos resultados, para ninguno de los casos ensayados
- No se pudieron apreciar diferencias en el funcionamiento de los filtros piloto, trabajando con un manto “doble”, al colocar una capa de arena de 0,20 m de espesor por debajo del manto de antracita (campañas 1 a 3), en comparación con un manto simple de antracita (campaña 4). Se entiende que por razones de calidad del agua filtrada, no sería necesario colocar dicho manto de arena, pero su colocación podría estar recomendada por otras consideraciones de orden técnico y/o económico (tipo de falso fondo, granulometría del manto soporte, costo de antracita)

- Ninguna de las configuraciones ensayadas dio resultados satisfactorios para la tasa de filtración de  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ . Se desarrollaron excesivas pérdidas de carga y se produjo el “traspaso” de los filtros (turbiedad elevada), a las pocas horas de operación, en todos los ensayos.
- La tasa de filtración de  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  dio excelentes resultados en las campañas 1 a 3 (turbiedades promedio por debajo de 0,5 NTU, excepto el filtro N° 1), y puede considerarse como “conservadora”
- La tasa de filtración de  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  dio muy buena calidad de agua en el filtro N° 4 (tabla N°3), en cambio su carrera de filtración fue corta (20,5 horas). En este caso (T.E. = 0,85 mm), dicha tasa de filtración se puede considerar elevada.
- Analizando las campañas 1 a 3, se concluye que la granulometría apropiada se encuentra entre los filtros N°s 3 y 4, y que la tasa de filtración no debe superar los  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$
- La granulometría seleccionada para la cuarta campaña (T.E. = 0,9 mm), dio excelentes resultados con la tasa de filtración de  $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  (tabla N° 5), en cambio los resultados no fueron buenos para la tasa de  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  (tabla N° 6). En este último caso se produjo el “traspaso” de los mantos filtrantes en menos de 20 horas, elevando la turbiedad por encima de 1,5 NTU en todos los filtros.
- Durante la cuarta campaña, se observó que el espesor del manto filtrante influye apreciablemente sobre la calidad del agua filtrada y la pérdida de carga: Los filtros N° 1 (espesor 0,80 m) y N° 4 (espesor 1,40), no dieron buenos resultados para ninguna de las tasas ensayadas (tablas N°s 5 y 6).

Tomando en cuenta las conclusiones anteriores, la batería de filtros de  $10.000 \text{ m}^3/\text{h}$  fue diseñada con manto de antracita, de 1,20 m de espesor, con una granulometría similar a la ensayada en la campaña N° 4 (T.E. = 0,9 mm), y tasa de filtración de diseño de  $12,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ .

Es de tener en cuenta que los resultados no son para nada extrapolables a otros casos, y las conclusiones son específicas para el agua ensayada, pudiendo ser para otras fuentes de agua, totalmente diferentes. Por lo tanto el diseño de baterías de filtros basándose exclusivamente en referencias bibliográficas y parámetros extraídos de otras investigaciones y/o experiencias, puede inducir a importantes errores de proyecto, difícilmente subsanables luego de ejecutada la obra. Los trabajos de investigación fueron realizados exclusivamente por personal técnico de Obras Sanitarias del Estado de Uruguay (OSE), Empresa Pública del Estado Uruguayo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ARBOLEDA VALENCIA, JORGE, Teoría y práctica de la purificación del agua, McGraw-Hill Book Company, Inc., tercera edición, tomo 2: páginas 363-632, 2000.
2. AZEVEDO NETTO, J. (et al.), Técnica de abastecimiento e tratamento de água, Convenio CETESB / ASCETESB, tercera edición, volumen 2, páginas 197-227, 1987

3. CLEASBY JOHN L. ET AL., Water quality and treatment-quinta edición, McGraw-Hill Book Company, Capítulo 8, 1999
4. DI BERNARDO, LUIZ, "Métodos e técnicas de tratamento de água, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, volumen 1, 481 pp, 1993.
5. FAUST, SAMUEL D.; ALY, OSMAN M., Chemistry of water treatment, Lewis Publishers, segunda edición, 581 pp, 1999.
6. HSIUNG A y col., The effect of media selection on filtration performance, American Water Works Association Inagural Meeting in Hawaii, abril 29 de 1976.
7. HUDSON, HERBERT E., Water clarification processes: practical design and evaluation, Van Nostrand Reinhold Company, 353 pp, 1981.
8. KAWAMURA SUSUMU, Integrated design and operation of Water Treatment Facilities, John Wiley & Sons Inc., Second Edition, páginas 194- 59, 2000
9. RICHTER C.; AZEVEDO NETTO, J., Tratamento de água: tecnologia autorizada, Editora Edgard Blücher Ltda, páginas 195-279, 1998
10. ROCHA VIANNA MARCOS, Hidráulica aplicada a estações de tratamento de água, Imprimatur Artes Ltda., páginas 382-507