

Análisis experimental de la distribución de caudal en los sedimentadores de una planta de tratamiento de agua potable

Experimental analysis of flow distribution in the sedimentation of a treatment plant for drinking water

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: FEBRERO 20, 2015; ACEPTADO: MARZO 24, 2015

Jorge Andrés Flórez Sánchez
Hugo Fernando Rengifo Hernández
Oscar Efrén Ospina Zúñiga
osefos@gmail.com

Universidad Cooperativa de Colombia, Ibagué

Resumen

En estructuras hidráulicas con sistemas múltiples de distribución lateral a flujo libre, se asume que la repartición equitativa del caudal se da usando áreas iguales en cada lateral, pero no sucede así. Esta situación es recurrente en plantas de tratamiento convencional de agua para consumo humano, donde se usan sistemas múltiples laterales, especialmente a la entrada de floculadores y sedimentadores. El análisis de la distribución de caudal se efectuó mediante un trabajo de investigación desarrollado a partir de 2008 en el sistema de múltiples de cuatro laterales de igual área, consistente en compuertas circulares a la entrada de los dos sedimentadores de la planta de tratamiento de agua del perímetro urbano de Cajamarca (Tolima), mediante análisis experimental, usando un modelo a escala donde se evidenció diferencias de caudal al ingreso de cada sedimentador, con potencial afectación del proceso de clarificación que se lleva a cabo, al dejar remanentes que inciden en el tratamiento del agua para consumo, con incidencia en la salud humana.

Palabras Clave

Distribución; múltiple; lateral; flujo libre.

Abstract

A frequent assumption in hydraulic structures with multiple systems free flow lateral distribution is: equal distribution of the flow it is given using equal areas on each side, but not so. This situation is recurrent in conventional drinking water treatment plants, where multiple side systems are used, especially at the entrance to flocculation and sedimentation. The analysis of flow distribution was carried out by a research developed since 2008 on the system of multiple four sides of equal area, consisting of circular gates at the entrance to the two settlers from the water treatment plant water located in Cajamarca (Colombia), through experimental analysis using a scale model where income differences flow of each settler was evident, with potential impact on the process of clarification takes place, leaving remnants that affect treatment water for drinking, with an impact on human health.

Keywords

Distribution; multiple; side; free flow

I. INTRODUCCIÓN

En sistemas múltiples a flujo libre se ha supuesto que, al disponer de salidas laterales con áreas iguales, se distribuye equitativamente el caudal, lo cual no ocurre. En cambio, se presentan desigualdades que ponen en riesgo la calidad de la operación del sistema. Este es el caso de estructuras hidráulicas como canales de riego, plantas de tratamiento de agua potable, canales repartidores en lagunas de estabilización y oxidación, transporte convencional de agua, plantas de tratamiento de aguas residuales, zonas de entrada de desarenadores o captaciones, entre otras.

La operación hidráulica de una planta de tratamiento, por la desigualdad de distribución del caudal en su sistema múltiple, afecta directamente la calidad del agua que entrega para consumo humano, porque sus unidades están operando con caudales y tiempos de detención diferentes a los diseñados.

La distribución equitativa del flujo es un problema hidráulico complejo, para el que se plantean soluciones a partir de la reducción de la sección transversal del canal principal, de la variación de la pendiente de la solera del mismo o de la modificación del área del lateral.

Para el caso de esta investigación, se analiza la distribución del caudal en cuatro laterales, apoyado en la experimentación hidráulica en un modelo a escala del sistema múltiple existente en la planta de tratamiento de agua para consumo humano de la localidad de Cajamarca, ubicada en el departamento del Tolima (Colombia), específicamente el que corresponde a la entrega a los dos sedimentadores, donde el problema es evidente y los tiempos de detención no se cumplen, alterando su funcionamiento hidráulico y generando, por ende, ineficiencia en el tratamiento (Flórez, Rengifo, & Ospina, 2008). La experimentación en el modelo definió, a partir de diversos ensayos y considerando las variables involucradas, aproximadamente la distribución del caudal que pasa por cada lateral y para cada sedimentador.

El uso de este tipo de sistemas múltiples de distribución lateral se da en la totalidad de las plantas de tratamiento convencionales existentes en la mayoría de los municipios del departamento del Tolima; es además un problema generalizado a nivel nacional que puede estar afectando la calidad de agua que se consume (Flórez et al., 2008).

II. MARCO TEÓRICO

El sistema múltiple en estudio se refiere al transporte de agua a flujo libre definido, en general, por una sección rectangular de la cual se derivan los laterales, la cual, según Cadavid (2007) es la sección más simple entre todas las usadas en las aplicaciones prácticas de la hidráulica de canales.

De acuerdo con el censo sanitario urbano (Suárez & Ospina, 2005), en 35 de los 47 municipios que conforman el departamento del Tolima, existe una planta de tratamiento convencional de agua para consumo humano, en la cual los canales de entrada a los sedimentadores son de sección rectangular. La mayoría de laterales corresponde a secciones circulares ubicadas en el fondo del canal. El lateral actúa como un orificio, definido como una abertura de forma que el agua escurre a través de él. Según su funcionamiento hidráulico, se clasifican en desagüe libre o sumergido. Esta última corresponde al caso de las plantas de tratamiento de agua. Según Khouri (2004), los orificios sumergidos son aquellos que desaguan bajo el nivel estático.

La distribución de flujo en sistemas con múltiples laterales ha sido estudiada en diferentes plantas de tratamiento de agua y con resultados obtenidos para dos o más laterales. Pérez (1992) presenta la medición de caudales obtenidos según la evaluación realizada a una planta de tratamiento de agua de América Latina, con un sistema múltiple que entrega caudal a cuatro decantadores en serie; durante este proceso se utilizó el ensayo de trazadores (solución de cloruro de sodio dosificado instantáneamente), se tomó muestras a la entrada de cada decantador y se obtuvo la información de caudal que se presenta en la Tabla 1. La evaluación arrojó como resultado que al primer lateral ingresa mayor caudal y que este va disminuyendo en los demás laterales, para una distribución porcentual de 32.5%, 27.8%, 21.7% y 18%.

Tabla 1. Resultados de la evaluación realizada a un sistema múltiple con cuatro decantadores en serie (Pérez, 1992)

Decantador No.	Caudal (l/s)
1	299
2	256
3	200
4	165
Total	920

Para el caso de tres laterales, los resultados obtenidos por Canepa (2005) en la evaluación de una planta de

tratamiento de agua de América Latina, que operaba con 127 l/s y tenía una batería de tres decantadores convencionales de forma rectangular y flujo longitudinal; en ella se efectuó una prueba de trazadores aplicando una solución de sal común, obteniendo la distribución de caudal indicado en la Tabla 2, en la cual se aprecia que el 64% del caudal lo recibía la unidad 1, el 17% la unidad 2 y el restante 19%, la unidad 3.

Tabla 2. Resultados de la evaluación realizada a un sistema múltiple con tres decantadores en serie (Canepa, 2005)

Decantador No.	Caudal (l/s)
1	80.96
2	21.50
3	24.54
Total	127.00

Respecto de sistemas múltiples de dos laterales, se cita la evaluación efectuada por Canepa (1996) a la planta de filtración rápida Calana, la cual posee dos decantadores convencionales de flujo horizontal, cada uno de ellos con dos laterales rectangulares de entrada con un área de 0,24 m² cada uno. Mediante trazadores se determinó el caudal de ingreso a cada decantador y se obtuvo el resultado descrito en la Tabla 3, que muestra cómo ingresa el 61.4% del caudal en la unidad 1 y el 38.6% a la unidad 2.

Tabla 3. Resultados de la evaluación realizada a un sistema múltiple con dos decantadores en serie (Canepa, 1996)

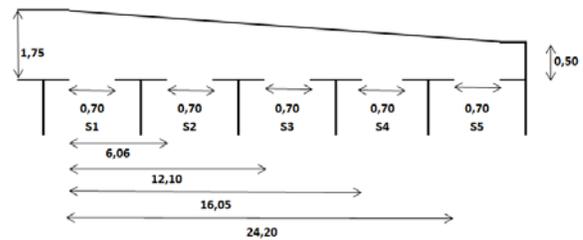
Decantador No.	Caudal (l/s)
1	51
2	32
Total	83

La opción de variar la sección del canal para obtener una velocidad constante del flujo, permite la distribución equitativa de caudal en cada lateral. Richter (1992) presenta un ejemplo de aplicación de este caso, en el cual se diseñó un sistema múltiple de cinco decantadores que entrega un caudal de 0,5 m³/s, mediante laterales con sección transversal rectangular de 0,30 m x 0,70 m, cuyo ancho de solera inicial es de 1,75 m y final de 0,50 m (Figura 1).

Para el caso de la planta de tratamiento de Cajamarca, la evaluación de la distribución de flujo se realizó al sistema múltiple a la entrada de la sedimentación existente. Según UNAD (2013), la sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación, relacionado exclusivamente con

las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada.

Figura 1. Sistema múltiple de distribución lateral para cinco decantadores (Richter, 1992)



Su importancia se da cuando el agua contiene impurezas que pueden afectar la salud humana y deben ser removida para su potabilización. Según la UNAD (2013), estas impurezas pueden ser solubles e insolubles. En esta última categoría se destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad; para que estas impurezas puedan ser removidas es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Estos procesos requieren de coagulantes que coadyuven al proceso de clarificación, por lo que en la planta de tratamiento de agua de Cajamarca se utiliza sulfato de aluminio, el cual, según Molano (2011) es un coagulante metálico de tipo sal de aluminio, junto con el sulfato de aluminio amoniacal y el aluminato de sodio. En este proceso, para obtener la eficiencia adecuada, es necesario cumplir con el tiempo mínimo de sedimentación. Una deficiencia del proceso de sedimentación puede conllevar a dejar residuales que pueden permanecer en el agua para consumo humano.

Según el estudio realizado por González, Hernández y Kaehler (1991), para determinar aluminio en el agua potable de la localidad de Valencia (Venezuela), la mayor parte del aluminio añadido en la purificación se elimina si en el tratamiento existe un buen proceso para la sedimentación; de esta manera la cantidad de aluminio residual alcanza valores que caen dentro del límite permitido por la Organización Mundial de la Salud (0,1 mg/l), un valor tres veces menor que el establecido en la norma venezolana. En relación con la incidencia en la salud humana, González et al., (1991) indican que, por lo

general, el ser humano no absorbe mucho del aluminio ingerido; sin embargo, si la concentración es muy alta, atraviesa la pared intestinal pasando al torrente sanguíneo a través de los ésteres fosfáticos, de tal forma que el aluminio absorbido se acumula en el hígado, los huesos, el cerebro y los músculos estriados, entre otros tejidos; interfiere con el transporte de hierro, produciendo un tipo de anemia; disminuye la absorción de calcio, originando dolores, deformaciones y fracturas en los huesos; pasa al cerebro, produciendo enfermedades neurológicas –se considera asociado a la enfermedad de Alzheimer, la cual produce un proceso degenerativo de la corteza cerebral que conduce a la demencia–.

Algunas investigaciones han asociado la enfermedad de Alzheimer con la concentración de aluminio presente en el agua potable (Suay & Ballester, 2002). Los investigadores piensan que el sulfato de aluminio que se añade al agua para aclararla, puede ser absorbido fácilmente por el cuerpo humano. En investigaciones médicas realizadas en Inglaterra se ha encontrado que los riesgos de contraer Alzheimer son 1,5 veces mayores en aquellos sitios donde las concentraciones de aluminio en el agua exceden los 0,10 mg/l (González, 1991). Según Molano (2011) prevenir la exposición al aluminio podría disminuir la incidencia de enfermedades crónicas degenerativas como la enfermedad de Alzheimer, que en los últimos años ha adquirido gran importancia para la salud en todo el mundo.

La velocidad de sedimentación de partículas se presenta cuando en el agua se iguala la fuerza de fricción con el peso aparente de la partícula, lo que permite que ella caiga debido a su propio peso. La presencia de movimiento en la partícula genera una fuerza de fricción –que es función de la velocidad de sedimentación–, la cual al igualarse a la fuerza resultante obliga a la partícula al movimiento hacia abajo; la partícula deja de variar su velocidad y continúa su descenso con velocidad constante de acuerdo con el principio de inercia, lo que corresponde a la velocidad de sedimentación (Corcho & Duque, 2005).

La carga superficial o tasa de sedimentación es equivalente a la velocidad de sedimentación crítica; por tanto, en caso de que la velocidad de sedimentación sea menor que la crítica, solo una parte de las partículas queda retenida; en cambio, si la velocidad es más alta que la velocidad de sedimentación crítica, todas las partículas quedan retenidas. De esto se puede deducir que la eficiencia de un sedimentador ideal solamente depende de la relación entre la velocidad de las partículas y la velocidad

de sedimentación, por lo que el sedimentador *ideal* debe estar diseñado para eliminar el 100% de las partículas que tengan una determinada velocidad de sedimentación crítica o mayor (UNAD, 2013).

La desigual distribución de caudal que pueda darse en un sistema múltiple de distribución lateral modifica la velocidad de sedimentación y potencialmente afecta la eficiencia del sedimentador; parte de las partículas pueden quedar retenidas y dejar así remanentes de turbiedad que dificultan el proceso de filtración y desinfección. La United States Environmental Protection Agency [USEPA] (1998) recomienda que la turbiedad del agua a la salida de cada una de las unidades de clarificación debe ser menor de 2 UNT, para minimizar la carga de partículas que llegan a los filtros y optimizar su operación. La American Water Works Association [AWWA] (2001), por su parte, presenta para el agua clarificada, 1 UNT, como valor objetivo promedio, y 5 UNT, como valor máximo. En Colombia, el valor máximo establecido para el agua tratada (resolución 2115 de 2007) es 2 UNT, mientras que la Unión Europea (1998) establece dicho límite en 1 UNT. Aunque la Organización Mundial de la Salud [WHO] no determina un valor admisible de turbiedad basado en criterios de salud, sugiere que la mediana de la turbiedad del agua tratada sea menor de 0,1 UNT, para garantizar una desinfección efectiva (WHO, 2006).

Marcó, Azario, Metzler y Gracia (2004) describen que la causa de la turbidez del agua para beber puede ser: un tratamiento insuficiente en la planta de potabilización, que el sedimento ha vuelto a quedar en suspensión en el sistema de distribución, o la existencia de conexiones cruzadas en él. Elevados niveles de turbidez pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro. En muchos casos no se logra destruir a los patógenos y las bacterias fecales, aglomerados o absorbidos por partículas. Asimismo, diversas sustancias químicas peligrosas, como metales pesados, organoclorados y otros, se unen, sobre todo, a los ácidos húmicos y a otras partículas orgánicas. En el mismo estudio citan que incluso el cloro introducido como parte del tratamiento puede formar trihalometanos y cloraminas.

El proceso de sedimentación que antecede a la filtración en el tratamiento convencional es crucial para lograr una eficiente remoción de turbiedad, ligada a la protección de microorganismos. Di Bernardo y Di Bernardo (2005) recomiendan, para asegurar una adecuada

eficiencia en la reducción de enterovirus, quistes de *Giardia spp* y ooquistes de *Cryptosporidium sp*, que el efluente de un filtro rápido tenga una turbiedad inferior a 0,5 UNT, en el 95 % de los datos diarios del mes, y que dicho valor nunca supere 5 UNT.

En la sedimentación de partículas floculentas, los factores primordiales que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma y densidad. La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice –finamente dividido–, arcilla y limo. El color, en cambio, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos, etc.) de origen vegetal, con densidades variables, que dependen de su concentración. Las partículas se presentan principalmente en estado coloidal, que en aguas tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua en 85 a 95% y turbiedad o color con densidades variables. El diámetro de los flóculos es variable –desde menos de 0,001 mm, hasta más de 5 mm–, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención).

Para obtener los valores de sedimentación crítica y de remoción de turbiedad para estas partículas se emplea el ensayo de jarras y, a su vez, el ensayo de columna de sedimentación (UNAD, 2013), el cual consiste en colocar en un recipiente la suspensión que se analizará, tomando muestras de agua a diferentes alturas para determinar la turbiedad residual frente a la velocidad de sedimentación

de las partículas, mediante una curva, con el fin de determinar la eficiencia, la distribución estadística de tamaños de partículas y su velocidad de caída, todo ello teniendo en cuenta que, dependiendo del tipo de suspensión, el sedimentador remueve un mayor o menor porcentaje de partículas de determinado diámetro.

III. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

La investigación se realizó mediante un estudio experimental integrado por un conjunto de actividades metódicas y técnicas realizadas para determinar la distribución lateral de flujo, describiendo el modo y la causa para la inequidad de entrega de caudal en este tipo de estructuras hidráulicas, mediante la experimentación, en un modelo a escala, de un sistema múltiple conformado por cuatro laterales a flujo libre, con el fin de analizar la distribución de caudal que realiza el sistema a la entrada de los dos sedimentadores convencionales de la planta de tratamiento de agua para consumo humano del municipio de Cajamarca (Colombia).

La planta opera 30 l/s de caudal, lo que indica, al menos en teoría, que cada sedimentador se diseñó para 15 l/s, y cada lateral para 7,5 l/s. El canal de entrada posee una sección transversal de 0,70 m de ancho y 0,90 m de altura, por donde el caudal escurre con una velocidad de diseño de 0,30 m/s, y se distribuye en cuatro laterales, correspondientes a compuertas circulares de $\varnothing 8''$. La Figura 2 presenta el sistema múltiple analizado.

Figura 2. Sistema múltiple de distribución lateral de la planta de tratamiento de agua del Municipio de Cajamarca (Flórez et al., 2008)



Los sedimentadores son de forma rectangular de tipo convencional y flujo horizontal. El tiempo de detención de cada sedimentador corresponde a 2,22 h, obtenido a partir del volumen útil correspondiente a 120m³ (3m de ancho, 2,5m de profundidad y 16m de largo), para un caudal de diseño de 15 l/s y una carga superficial de 27 m³/(m².día). De acuerdo con las especificaciones técnicas establecidas (Resolución 1096 de 2000), cada sedimentador cumple con el tiempo mínimo de detención (2 h), con la relación ancho:largo de 1:5,3 (entre 1:4 y 1:8) y con la carga

superficial (entre 15 m³/(m².día) y 30 m³/(m².día)).

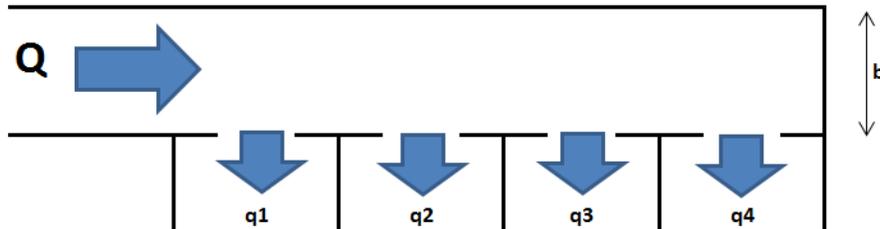
El esquema básico del modelo para simular el sistema múltiple se representa en la Figura 3 para un caudal Q que entrega a cuatro laterales (q1, q2, q3 y q4), donde:

$$Q = q1 + q2 + q3 + q4 \quad (1)$$

Si la distribución lateral es equitativa, entonces:

$$q1 = q2 = q3 = q4 \quad (2)$$

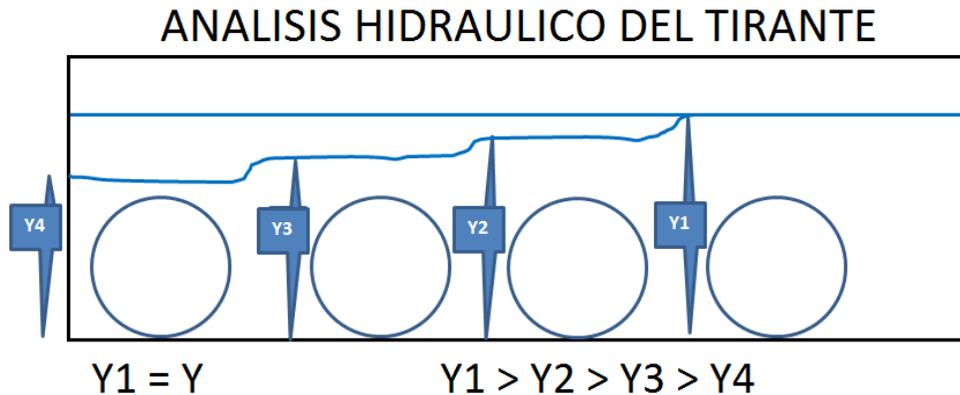
Figura 3. Esquema del sistema múltiple con 4 laterales (Flórez et al., 2008)



En la medida de entrega del caudal en cada lateral, se disminuye el tirante y por tanto al disponerse de laterales de igual área, el caudal en cada uno de ellos disminuye. O

sea, el primer lateral recibe mayor caudal que el siguiente y así sucesivamente. El análisis esquemático del tirante se ilustra en la figura 4 [1].

Figura 4. Esquema del análisis hidráulico del tirante en un sistema múltiple con 4 laterales (Flórez et al., 2008)



La descarga de los orificios es ahogada, como ocurre en los sedimentadores de la planta de tratamiento. El esquema planta – perfil del modelo a escala se describe en la Figura 5.

Para cada uno de los cuatro orificios (laterales) se efectuó un total de trece ensayos, con el fin de promediar los valores, con los cuales se determinó el caudal depositado por cada lateral. El mapa conceptual del

ensayo se describe en la Figura 6.

La eficiencia de retención del sedimentador (E) se define a partir de la relación inversa de la velocidad de sedimentación (Vs) y la velocidad de sedimentación crítica (Vsc) (UNAD, 2013).

$$E = \frac{Vs}{Vsc} \quad (3)$$

Figura 5. Esquema en planta – perfil del modelo experimental

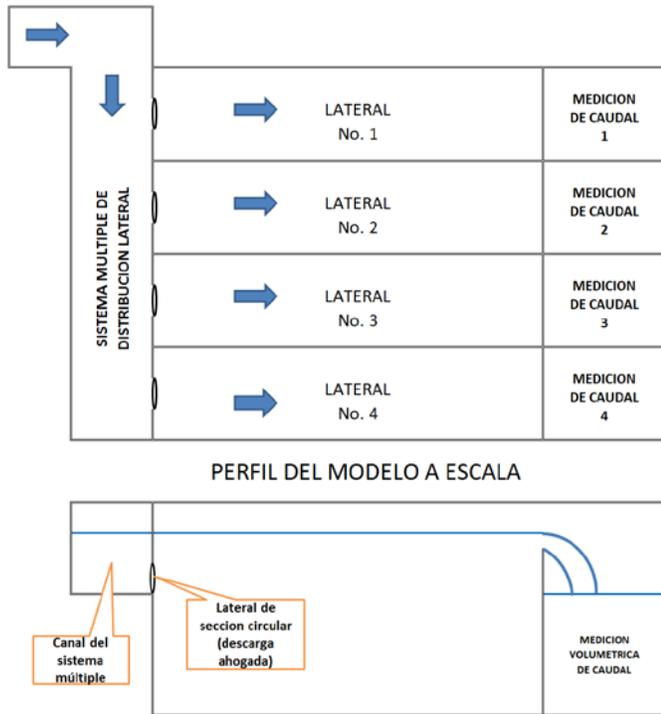
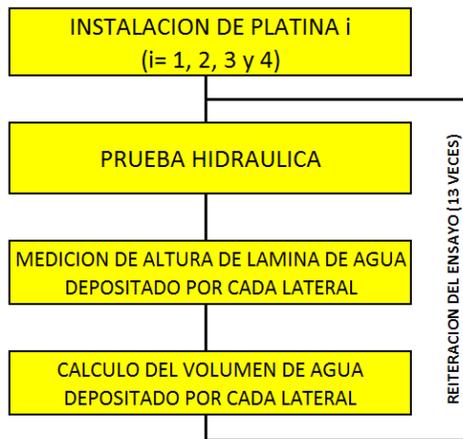


Figura 6. Mapa conceptual del ensayo experimental (Flórez et al., 2008)



IV. RESULTADOS

El modelo experimental se diseñó a escala 1:100 con relación al sistema múltiple real de la planta de tratamiento de Cajamarca; en él se simula el comportamiento hidráulico y se determina la distribución lateral del caudal, evidenciando las falencias hidráulicas que posee este tipo de diseño de unidades con laterales de igual área, mediante la realización de diferentes pruebas hidráulicas.

El modelo experimental está constituido por cuatro laterales que entregan el caudal a sendos compartimentos,

donde se puede visualizar y evaluar el caudal de entrada, evidenciando la inequidad de repartición en las condiciones actuales. La velocidad de entrada al sistema es de 0,3 m/s, que corresponde a flujo laminar sub-crítico, similar al que se presenta en el canal de entrada a los sedimentadores de la planta de tratamiento. De acuerdo con el título C del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, R.A.S. 2000, esta velocidad debe ser inferior a 0,6 m/s –luego el sistema existente cumple con este requerimiento técnico–.

El modelo a escala se construyó usando materiales resistentes a la humedad, con opción de visualizar el fenómeno, y con hermeticidad, para obtener resultados fiables: vidrio, láminas de super-board y platinas metálicas, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Proceso constructivo del modelo a escala del sistema múltiple de distribución lateral (Flórez et al., 2008)



La distribución de flujo se analizó en el modelo con la fabricación de láminas removibles para tener entradas laterales con orificios que representan a escala 1:100 los correspondientes a laterales de Ø4", Ø6", Ø8" y Ø10", o sea, de 0,811 cm², 1,815 cm², 3,237 cm² y 5,067 cm², respectivamente. En la Figura 8 se muestran las láminas utilizadas en el modelo. De acuerdo con el censo sanitario urbano (Suárez & Ospina, 2005), estos diámetros son los más frecuentes en los sistemas múltiples de plantas de tratamiento de agua de los municipios del departamento del Tolima, razón por la cual se adoptaron para la investigación.

Todos los ensayos hidráulicos se efectuaron con el mismo caudal de entrada al sistema múltiple, con el fin de evaluar experimentalmente el problema, modificando la sección de los laterales. El caudal adoptado fue de 75

cm³/s (0,075 l/s), el cual permite operar adecuadamente el prototipo, con las siguientes condiciones hidráulicas: Ancho solera = 0.045 m, tirante = 0.0714 m, número de Froude = 0.028, perímetro mojado = 0.19 m, radio hidráulico = 0.017 m², velocidad = 0.03 m/s y energía específica = 0.072 m–kg/kg. En la Figura 9 se muestra el modelo a escala en proceso de operación.

Figura 8. Láminas usadas en el modelo experimental (Flórez et al., 2008)



Figura 9: Modelo experimental a escala utilizado en la investigación (Flórez et al., 2008)



El modelo experimental a escala usado para la investigación permitió analizar la distribución de caudal en un sistema múltiple con cuatro laterales de sección circular con igual área, arrojando diferentes valores de flujo para cada uno de ellos, debido a la disminución gradual del tirante en la medida que se entrega caudal. Los resultados obtenidos de las trece pruebas efectuadas a cada lámina

con igual área de lateral (orificio), arrojó los valores promedio de la altura de la lámina de agua que permite calcular el volumen y, por ende, el caudal de agua, a partir de un tiempo de duración de llenado constante de 130 s.

En el Anexo 1 se describen los resultados obtenidos con la lámina del lateral de Ø3,237 cm² de área, equivalente a Ø 8” en la escala del modelo experimental.

La Figura 10 resume gráficamente los resultados del caudal promedio obtenido en cada uno de los cuatro laterales, correspondiente a las cuatro áreas experimentalmente utilizadas, que corresponden a los diámetros: 4”, área 1; 6”, área 2; 8”, área 3; y 10”, área 4. Se puede apreciar cómo, en todos los casos, ingresó un mayor caudal en el primer lateral, y como este va disminuyendo sucesivamente en los siguientes. La distribución de caudal es menos uniforme en la medida en que aumenta el diámetro de los laterales, dada su incidencia en la variación del tirante en el canal.

Los resultados de la altura promedio de lámina de agua obtenida en cada recipiente de medición de volumen de agua que cada lateral depositó, para el caso del orificio de diámetro de 3,237 cm², correspondiente a Ø 8” en escala 1:100, se describe en las Figuras 11 y 12. Este diámetro corresponde al existente en el sistema múltiple de la planta de tratamiento de Cajamarca, luego, la distribución de caudal experimental corresponde al 36,3% en el primero, 30,3% en el segundo, 19,0% en el tercero y 14,4% en el cuarto. La mayor altura de lámina de agua se obtiene en el lateral 1 y disminuye en la medida de entrega de flujo en los demás laterales. Este comportamiento se dio en todos los ensayos efectuados para todas las láminas utilizadas.

La distribución de diseño de caudal para cada lateral en la planta de tratamiento es q=7,5 l/s; luego, cada sedimentador está proyectado para operar con Q=15 l/s. Según la distribución de caudal obtenida experimentalmente, en el primer lateral ingresan q₁=10.89 l/s; q₂=9,09 l/s, en el segundo; q₃=5,70 l/s, en el tercero; y q₄=4.32 l/s, en el cuarto. Luego, en el primer sedimentador ingresa Q₁=19,98 l/s (71,93 m³/h), que corresponde al 66,6% del total, y en el segundo ingresa Q₂=10,02 l/s (36,07 m³/h), equivalente al 33,4 %. Los tiempos de detención obtenidos para los dos sedimentadores, T_{d1}=1,67 h y T_{d2}=3,33 h, permiten deducir que el primero de ellos incumple el mínimo establecido por el Título C del R.A.S. 2000, que corresponde a 2 h.

Figura 10. Caudal de acceso obtenido experimentalmente por cada lateral, para las cuatro diferentes secciones transversales (Flórez et al., 2008)

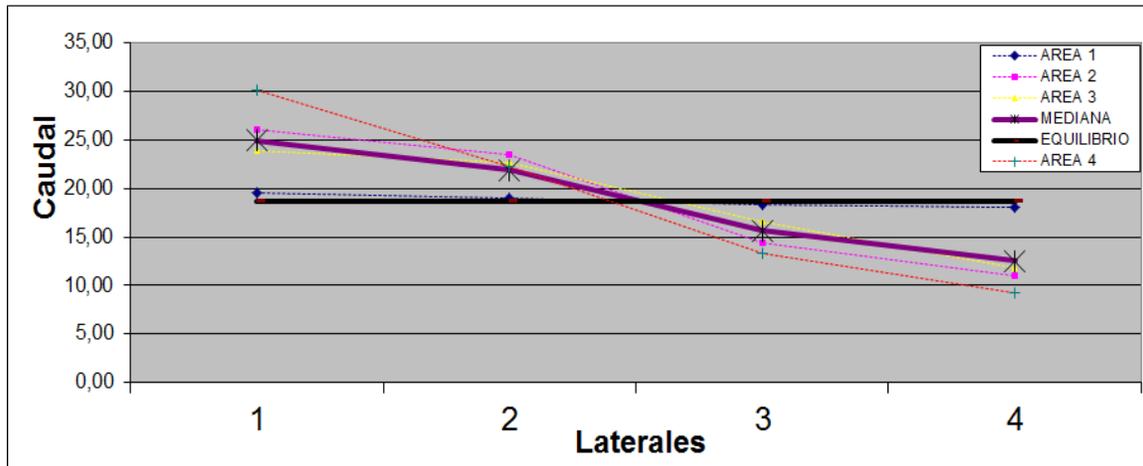


Figura 11: Altura promedio de lámina de agua en recipiente volumétrico del modelo experimental: diámetro de 3,237 cm² (Flórez et al., 2008)

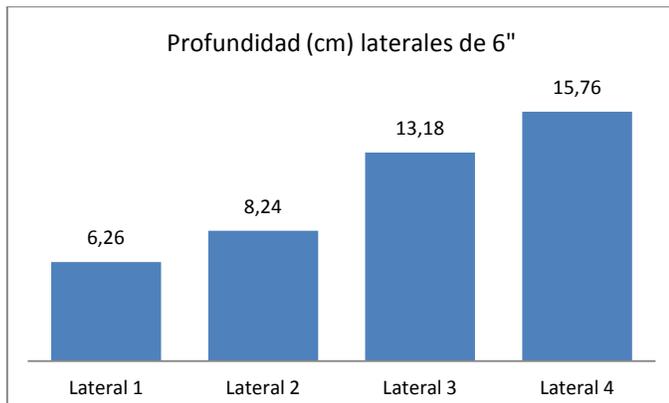
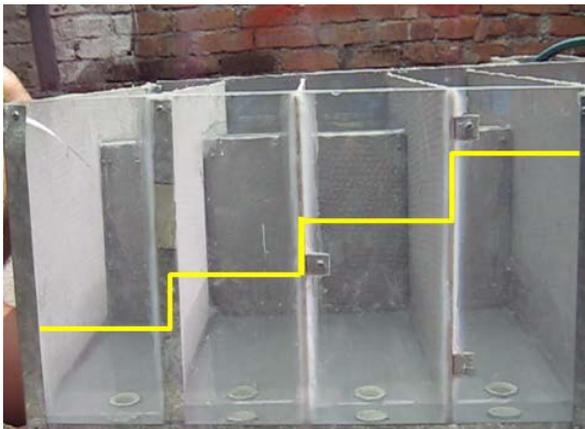


Figura 12: Altura de lámina de agua en recipiente volumétrico del modelo experimental (diámetro de 3,237 cm²). (Flórez et al., 2008)



V. DISCUSIÓN

En la investigación se pretendió que los resultados obtenidos en el modelo físico experimental simularan

aproximadamente la realidad de la estructura hidráulica analizada. Según la Escuela de Ingeniería de Antioquia (2003), muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos. Por lo anterior, es conveniente recurrir al empleo de técnicas experimentales como herramientas en la obtención de soluciones prácticas, aplicadas a problemas de ingeniería. El uso de modelos físicos a escala reducida, llamados simplemente modelos hidráulicos, implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para lo cual debe satisfacer las leyes de similitud geométrica, cinemática y dinámica, que en conjunto relacionan magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas.

Cuando la comparación entre el prototipo y modelo es respecto de un movimiento, como ocurre en la investigación realizada, se establece entonces la similitud cinemática, la cual se cumple cuando la forma de los patrones de flujos homólogos son iguales en cualquier tiempo, es decir, cuando hay similitud en el movimiento de los sistemas. Es por esto que la relación de velocidades entre estos puntos debe ser constante y es denominada escala de velocidades. Es un requisito que se cumpla con la similitud geométrica para que se cumpla la similitud cinemática (EIA, 2003).

Las cargas superficiales obtenidas en el modelo experimental de 35.96 m³/(m².día) para el primero y 18.04 m³/(m².día) para el segundo, difieren del valor de diseño de 27 m³/(m².día); el primero de ellos incumple el valor máximo establecido por el Título C del R.A.S. 2000, que indica 30 m³/(m².día).

Esquemáticamente se resumen los resultados de evaluación de los sedimentadores de la planta de tratamiento de Cajamarca en la Figura 13. En ella, en la primera planta se resumen los parámetros de diseño y en la segunda, los obtenidos experimentalmente.

La velocidad de paso del agua por cada lateral de entrada a los sedimentadores, se obtiene con la sección del lateral correspondiente a una compuerta Ø8", cuya área es 0,0324 m², por donde en el diseño se asumió que pasa un caudal de 7,5 l/s, la velocidad teórica es 0,23 m/s, que es inferior a la del canal de entrada del sistema múltiple (0,30 m/s, como se describió, lo cual garantiza que no se rompe el *floc* previamente formado en el floculador; pero, de acuerdo con la distribución de flujo obtenida experimentalmente, en el primer lateral pasa el mayor caudal (10,98 l/s), que arroja una velocidad de 0,34 m/s, superior a la velocidad del canal; pero es posible que en estas condiciones no se afecte el *floc* formado, por ser relativamente baja.

cuestión, en el primero de ellos ocurrirá una menor carga de sedimentos retenidos y, por ende, un mayor tiempo entre lavado y lavado, en comparación con el segundo. La distribución de flujo a la entrada de los dos sedimentadores corresponde a dos compuertas circulares laterales por donde pasa diferente caudal, que corresponde a un dispositivo hidráulico que no distribuye uniformemente el caudal en la sección transversal, como lo establece el Título C del R.A.S. 2000.

Asumiendo que la eficiencia inicial de retención de diseño de cada sedimentador fue de 100%, con sus dimensiones y caudal de diseño se obtiene que la velocidad de sedimentación [Vs] es de 0.027 cm/s. Para el primero de ellos, cuya velocidad de sedimentación crítica [Vsc] obtenida experimentalmente fue de 0.036 cm/s, se obtiene que su eficiencia de remoción según la ecuación (3), fue del 75%, mientras, que para el segundo, cuya Vsc fue de 0.018 cm/s, fue del 100%.

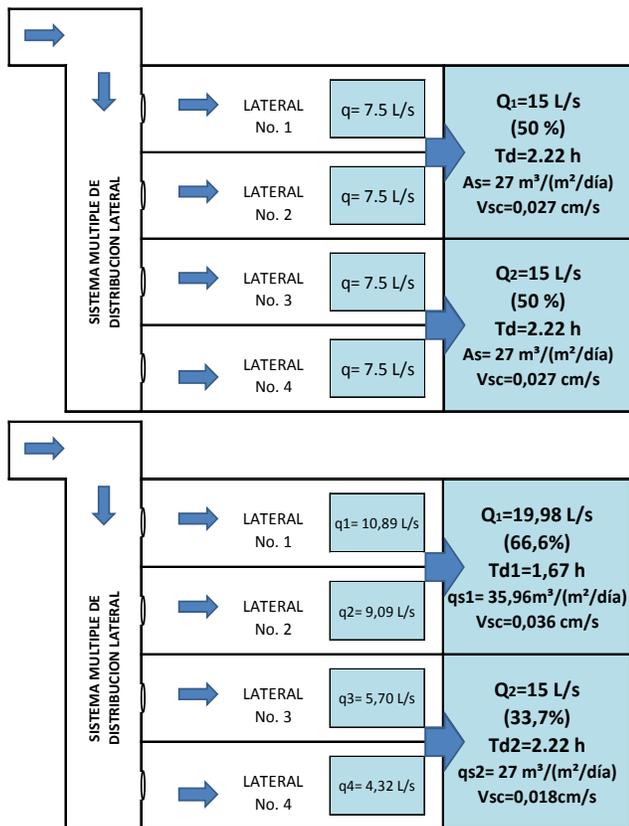
VI. CONCLUSIONES

El problema de distribución de caudal en sistemas con múltiples laterales de igual sección transversal no ha recibido la debida atención, por tanto, persiste su uso en diversas estructuras hidráulicas, especialmente en plantas de potabilización de agua, en las cuales puede ocasionar detrimento en la calidad final del proceso. En el tratamiento del agua se requiere de la adecuada operación hidráulica de sus unidades para cumplir con el caudal, el tiempo de retención, la velocidad y los demás parámetros técnicos necesarios para obtener agua apta para consumo humano.

Los sistemas múltiples que no realizan una adecuada distribución de caudal, pueden llevar a la ineficiencia de la estructura hidráulica, en especial aquellas que requieren rigurosos procesos en su operación, como es el caso de plantas de tratamiento de agua para consumo humano.

Las plantas de tratamiento de agua para consumo humano existentes en el departamento del Tolima, fueron diseñadas y construidas con sistemas convencionales que incluyen sistemas múltiples de distribución de flujo con laterales de igual sección, en las cuales se presenta una entrega de caudales que no corresponde a lo diseñado, sin que se hayan llevado a cabo las correcciones necesarias, lo que puede estar incidiendo en la calidad del agua para consumo humano. De ahí la importancia de que la operación de la sedimentación ocurra en forma eficiente,

Figura 13: Esquema de valores de diseño y obtenidos experimentalmente, correspondientes a los dos sedimentadores de la planta de tratamiento de Cajamarca (Tolima, Colombia)



Dada la distribución de caudal obtenida experimentalmente, adoptado a los sedimentadores en

lo cual, para el caso de Cajamarca, está sujeto a la distribución y el control de caudal que se disponga, cuya principal característica tiene que ver con la operación del sistema múltiple de distribución lateral a la entrada, el cual experimentalmente es ineficiente hidráulicamente.

Debido a la inequitativa distribución de caudal, el primer sedimentador de la planta de tratamiento de Cajamarca presenta menor eficiencia de remoción, lo que permite que algunas partículas puedan superar la filtración y estén presentes en el agua para consumo humano, algunas de ellas con incidencia en la salud de las personas. Entre dichas partículas pueden estar algunos microorganismos resistentes al efecto oxidante del cloro – usado en esta planta de tratamiento para la desinfección–, residuales de aluminio proveniente del coagulante utilizado –para este caso sulfato de aluminio–, o materia orgánica natural que entra en contacto con el cloro generando subproductos –entre ellos trihalometanos THM y ácidos haloacéticos–. Según Rodríguez, Rodríguez, Serodes, y Sadiq (2007), la exposición de la población a los THM representa un riesgo de salud pública, ya que se consideran potencialmente cancerígenos para el ser humano. Los efectos de los subproductos de la desinfección sobre la salud han sido identificados en estudios toxicológicos y epidemiológicos. Los estudios toxicológicos analizan el efecto sobre los animales de laboratorio expuestos a dosis diferentes de un producto específico. Los datos obtenidos son extrapolados para el caso de humanos, lo que permite establecer dosis asociadas a riesgos significantes para la salud humana. Los estudios epidemiológicos tienen la ventaja, en relación con los anteriores, de evaluar el riesgo asociado a la exposición a los THM a partir de observaciones efectuadas con humanos.

La solución del sistema múltiple requiere continuar su investigándose sobre diversas variables: número de laterales –para este caso se analizó con cuatro– y orificios no circulares.

VII. REFERENCIAS

- American Water Works Association [AWWA]. (2001). *Self-assessment for treatment plant optimization*. Denver, CO: AWWA.
- Cadavid, J. (2007). *Hidráulica de canales*. Medellín, Colombia: Universidad EAFIT
- Canepa, L. (1996). *Control de operación de la planta de filtración rápida CALANA*. Lima, Perú: CEPIS/OPS/ANAESAPA
- Canepa, L. (2005). *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Corcho F., Duque J. (2005). *Acueductos: teoría y diseño*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
- Di Bernardo, L. & Di Bernardo. A. (2005). *Métodos e técnicas de tratamiento de agua* [2ª ed.]. São Carlos: Brasil: Rima.
- Escuela de Ingeniería de Antioquia. (2003). *Modelación hidráulica* [en línea]. Recuperado de <http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/articulopagppal.html>
- Flórez, J., Rengifo, H., & Ospina, O. (2008). *Sistema múltiple de distribución lateral de flujo SIMULA* [Tesis]. Universidad Cooperativa de Colombia: Ibagué.
- González, M., Hernández C., & Kaehler J. (1991). Determinación de aluminio en el agua potable de Valencia y localidades cercanas.
- Khouri, E. (2004). *Apuntes de hidráulica para explotaciones forestales*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
- Marcó R., Azario L., Metzler C., & Gracia M. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de fuentes superficiales. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4, 72-82.
- Molano, L. *Las semillas de Moringa Olifeira Lam. Como alternativa de coagulante natural para purificación del agua* [Tesis]. Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga, Colombia.
- Pérez, J. (1992). *Análisis de flujos y factores que determinan los períodos de retención*. Lima, Perú: CEPIS/OPS.
- Resolución 1096 de 2000 [Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia]. (2000, noviembre 29). *Diario Oficial No. 44.242*, Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional.
- Resolución 2115 de 2007. (2007, julio 4). *Diario Oficial No. 46679*. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional
- Richter, C. (1992). *Criterios de diseño para floculadores y decantadores*. Lima, Perú: OPS/OMS-HN.
- Rodríguez, M.J., Rodríguez, G., Serodes, J., & Sadiq, R. (2007). Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación. *Interciencia*, 32(11), 749-756.
- Suárez, A. & Ospina, O. (2005). *Censo sanitario urbano del departamento del Tolima* [Tesis]. Universidad Cooperativa de Colombia: Ibagué.
- Suay, L. & Ballester, F. (2002). Revisión de los estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer. *Revista Española de Salud Pública*, 76(6), 645-658
- Unión Europea (1998, diciembre 5). *Diario oficial de las Comunidades Europeas*, (pp. L 330/32).
- United States Environmental Protection Agency [USEPA]. (1998). *Optimizing water treatment plant performance using the composite correction program* [EPA/625/6-91/027]. Washington, DC: USEPA.
- Universidad Nacional Abierta y a Distancia [UNAD]. (2013). *Diseño de plantas potabilizadoras*. Bogotá, Colombia: UNAD.
- World Health Organization [WHO]. (2006). *Guidelines for drinking water quality: First addendum to third edition. Volume 1, recommendations*. Ginebra, Suiza: WHO.

CURRÍCULOS

Hugo Fernando Rengifo Hernández. Ingeniero Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Ibagué.

Jorge Andrés Flórez Sánchez. Ingeniero Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Ibagué.

Oscar Efrén Ospina Zúñiga. Coordinador del Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Ibagué. Ingeniero Civil.

Anexo 1. Resultados del ensayo realizado con lámina de laterales con Ø 3,237 cm² (Flórez et al., 2008)

ENSAYO	TIEMPO(seg)	PROFUNDIDAD LAT 1(cm)	PROFUNDIDAD LAT 2(cm)	PROFUNDIDAD LAT 3(cm)	PROFUNDIDAD LAT 4(cm)
1	130	15,5	13	8,2	6,1
2	130	15	12,8	7,8	6,8
3	130	15,7	13,4	8,6	6,7
4	130	16	12,5	8,6	6,3
5	130	14,9	12,3	8,5	6,5
6	130	15,3	13,3	8,3	5,7
7	130	15	12,5	8	5,8
8	130	16,3	13,5	8,4	6,4
9	130	16,5	13,5	8,2	6,2
10	130	16,4	13	8	6,3
11	130	16,5	13,5	8	6
12	130	15,8	14	8	6,3
13	130	16	14	8,5	6,5

ensayo	1		2		3		4		5	
	prof	volumen								
lateral 1	15,5	3682,8	15	3560,04	15,7	3731,904	16	3805,56	14,9	3535,488
lateral 2	13	3136,5	12,8	3086,316	13,4	3236,868	12,5	3011,04	12,3	2960,856
lateral 3	8,2	1856,316	7,8	1759,884	8,6	1952,748	8,6	1952,748	8,5	1928,64
lateral 4	6,1	1393,728	6,8	1567,944	6,7	1543,056	6,3	1443,504	6,5	1493,28

volumen en cm³

ensayo	6		7		8		9		10	
	prof	volumen								
lateral 1	15,3	3633,696	15	3560,04	16,3	3879,216	16,5	3928,32	16,4	3903,768
lateral 2	13,3	3211,776	12,5	3011,04	13,5	3261,96	13,5	3261,96	13	3136,5
lateral 3	8,3	1880,424	8	1808,1	8,4	1904,532	8,2	1856,316	8	1808,1
lateral 4	5,7	1294,176	5,8	1319,064	6,4	1468,392	6,2	1418,616	6,3	1443,504

volumen en cm³

ensayo	11		12		13	
	prof	volumen	prof	volumen	prof	volumen
lateral 1	16,5	3928,32	15,8	3756,456	16	3805,56
lateral 2	13,5	3261,96	14	3367,42	14	3367,42
lateral 3	8	1808,1	8	1808,1	8,5	1928,64
lateral 4	6	1368,84	6,3	1443,504	6,5	1493,28