

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**INFLUENCIA DEL MATERIAL DE LA TUBERÍA Y LA VELOCIDAD DE  
FLUJO EN EL DESARROLLO DE BIOPELÍCULAS EN SISTEMAS DE  
DISTRIBUCIÓN**

*Sara Gacharná, María Ximena Hernández, María Ximena Trujillo*

Investigadores, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: mx.hernandez41@uniandes.edu.co; sc.gacharna41@uniandes.edu.co; mx.trujillo92@uniandes.edu.co

**RESUMEN:** En un montaje diseñado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes Bogotá, Colombia, se ha estudiado a lo largo de trabajos previos la formación y desarrollo de biopelículas usando fuentes de carbono comerciales para facilitar su crecimiento, tales como el jugo de caña de azúcar. Este estudio busca validar los datos obtenidos anteriormente al alimentar el sistema con fuentes de carbono de difícil asimilación encontradas en los ríos de captación de agua potable para Bogotá- Colombia, como lo son el pasto kikuyo, *Pennisetum clandestinum*, y el humus. Se estudiaron dos sistemas durante 150 días de recirculación, tomando mediciones de biopelícula a partir de unos testigos extraíbles instalados en las tuberías y de lecturas de piezómetros para evaluar las pérdidas por fricción. Finalmente se concluye, que a pesar de utilizar una fuente de carbono de difícil asimilación en ambos montajes se evidenció el desarrollo de biopelícula que provocó que las pérdidas por fricción fueran superiores a las esperadas, lo que se reflejaba en factores de fricción muy altos, variables e incongruentes con el Diagrama de Moody.

**PALABRAS CLAVES:** *Biopelículas, agua potable, Diagrama de Moody, modelo físico.*

## INTRODUCCIÓN

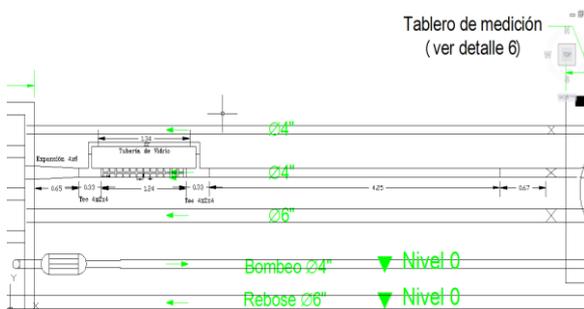
La calidad del agua consumida en las ciudades solía ser medida en la salida de la planta de potabilización. Sin embargo al considerar el deterioro de la calidad del agua a lo largo del sistema de distribución, los riesgos que esto representa para la salud pública y las implicaciones sobre el diseño de la red, ahora se busca cumplir con los objetivos de calidad en los puntos de entrega al consumidor. La presencia de biopelículas en las redes de abastecimiento de agua potable es uno de los factores que contribuye a dicho deterioro del agua, porque permite la formación de productos que pueden afectar su calidad organoléptica y promueven el desarrollo de microorganismos potencialmente patógenos que consiguen sobrevivir al proceso de potabilización. Por lo tanto conocer los factores que afectan su desarrollo permitiría establecer mecanismos de prevención.

Los objetivos del estudio descrito en este artículo fueron: determinar la influencia de la fuente de carbono, el material y la velocidad del flujo, en la formación de biopelículas además de los efectos que éstas representan sobre la hidráulica en los sistemas de distribución de agua potable. La fuente de carbono utilizada fue pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), material vegetal presente en las fuentes de captación de agua potable de Bogotá, Colombia.

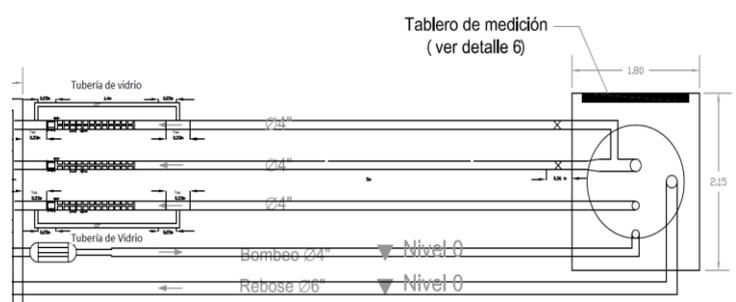
## MODELO FÍSICO

Se construyeron dos modelos físicos. Uno con tres tuberías de diferente material y diámetro (d): polietileno (PE)  $d=0.152$  m, policloruro de vinilo (PVC)  $d=0.108$  m y concreto (CCP)  $d=0.155$  m. En este modelo, paralelo al tubo de PVC se encontraba un tubo de vidrio  $d=0.046$  m conectado a través de dos Tees con reducción de 0.108 a 0.051 m (Figura 1).

El segundo modelo físico, tenía tres tuberías de PVC  $d=0.108$  m con diferentes velocidades. Igual que el primer modelo, dos tuberías estaban conectadas a tubos de vidrio a través de Tees con reducción de 0.108 a 0.051 m (Figura 2).

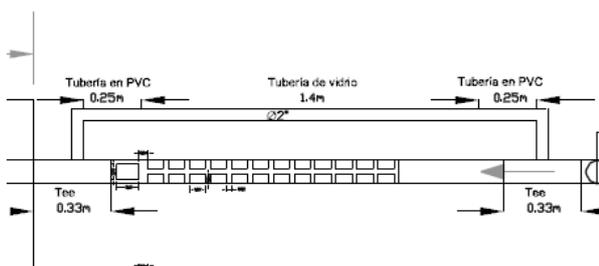


**Figura 1.-** Modelo 1. Tuberías de diferente material.



**Figura 2.-** Modelo 2. Tuberías con velocidad de flujo diferente.

En ambos modelos era necesario determinar el crecimiento de la biopelícula a través de testigos instalados aguas abajo de los piezómetros. La distribución de los testigos se muestra en la Figura 3.



**Figura 3. –** Zona de testigos extraíbles.

Los testigos que están en parejas se llaman testigos de centro, los cuales tienen 4 cm de ancho, 7 cm de largo y cuyo espaciado entre testigos longitudinal y transversalmente es de 1cm. Aguas abajo hay un testigo individual, el cual se denomina de borde; este tiene 4 cm de ancho y 10 cm de largo.

## Aspectos hidráulicos

En ambos modelos, la caída de altura piezométrica se determinó por medio de 8 piezómetros (4 aguas arriba y 4 aguas abajo). Los piezómetros se ubicaron a 1,2 m del codo que une la tubería con el tanque, a fin de medir presión cuando el flujo esté totalmente desarrollado. Los piezómetros aguas abajo se instalaron a 2,766 m de los de aguas arriba (Figura 4).

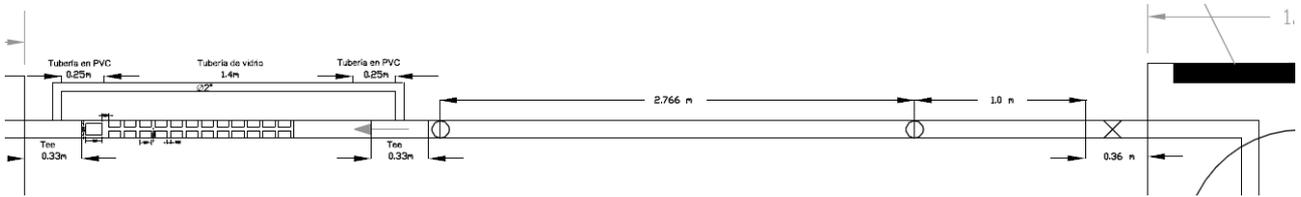


Figura 4. – Localización de piezómetros.

Para calcular las pérdidas por fricción cada semana, se realizaron 10 variaciones de caudal en cada prueba, para de esta manera obtener diferentes valores del número de Reynolds ( $Re$ ), en un intervalo entre 2000 y 80000. Estos valores fueron tomados teniendo en cuenta que se asegure flujo turbulento, y permite ubicar los valores encontrados del factor de fricción ( $f$ ) dentro del Diagrama de Moody utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach [1], lo que a su vez permite conocer la rugosidad relativa de la tubería haciendo uso de la ecuación de Colebrook-White [2], a fin de determinar los efectos de la biopelícula sobre la hidráulica del sistema.

$$H_f = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad [1]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{k_s}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad [2]$$

## Aspectos microbiológicos

En una red de abastecimiento hay dos fases diferenciadas que interactúan entre sí formando un ecosistema particular y dinámico. Por un lado el agua circulante sirve de medio de transporte para los nutrientes y las bacterias, mientras que en la pared de la tubería se presentan fenómenos de fijación bacteriana y formación de película biológica (Knobelsdorf, 1997).

Las biopelículas se caracterizan por ser un conjunto de células rodeadas por una matriz de exopolisacárido (EPS) secretado por estas mismas (Figura 5) (Huq, 2008). La comunidad que hace parte de dicha matriz es bastante diversa pues cualquier microorganismo presente en el agua se puede adherir, es decir, se pueden encontrar bacterias, hongos, protozoos, virus e incluso algunos macro-invertebrados, tales como: nemátodos, gusanos, larvas de insectos, rotíferos y pequeños crustáceos (Vargas, 2004).

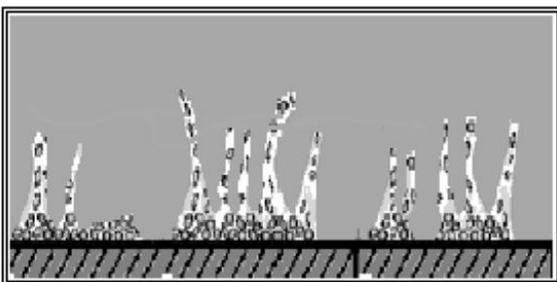


Figura 5.- Modelo estructural de matriz biológica en forma de mosaico heterogéneo.

El desarrollo del material extracelular de las biopelículas que les permite adherirse a las superficies, resulta de un proceso de comunicación intercelular a través de moléculas mensajeras y la autoinducción de las células a la secreción de EPS (Huq, 2008).

Se terminan formando arquitecturas tridimensionales y complejas que funcionan como un mecanismo de defensa de las bacterias a los compuestos tóxicos, los antibióticos, el estrés térmico y la depredación (Huq, 2008).

## Aproximación cuantitativa

La aproximación cuantitativa del desarrollo de biopelícula en el montaje consiste en determinar el espesor de la misma a partir del peso de biomasa de testigos de borde y de centro. Con el peso de los testigos de centro, se determinó el espesor promedio de la biopelícula ( $\bar{E}$ ). Mientras que con el peso de los testigos de borde se estimó la velocidad inicial de crecimiento ( $Vel_0$ ), la velocidad de desarrollo ( $Vel$ ) y el espesor máximo de la biopelícula ( $E_{m\acute{a}x}$ ). Las ecuaciones utilizadas se muestran a continuación.

$$\bar{E} [\mu\text{m}] = \frac{\left(\frac{\text{Peso}_{i+1} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A}\right) \cdot 10^9 + \left(\frac{\text{Peso}_{i+2} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A}\right) \cdot 10^9}{2} \quad [3]$$

$$Vel_0 [\mu\text{m}/\text{día}] = \frac{\text{Espesor}_0}{\text{N}^\circ \text{ de días}} \quad [4]$$

$$Vel [\mu\text{m}/\text{día}] = \frac{(E_{j+1} - E_j)}{\Delta \text{ días}} \quad [5]$$

$$E_{m\acute{a}x} [\mu\text{m}] = \frac{\text{Peso}_{\text{final}} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A} \quad [6]$$

## Aproximación cualitativa

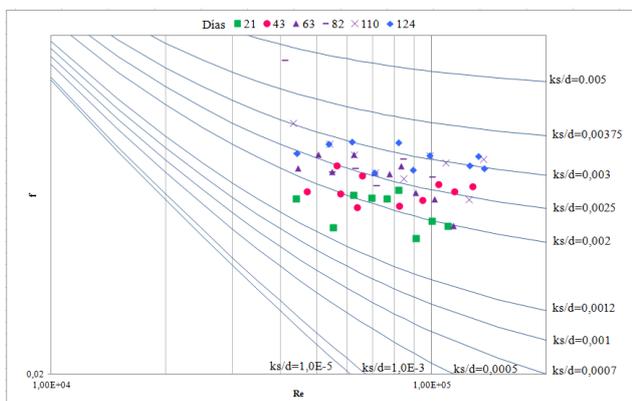
La aproximación cualitativa consiste en la identificación de los microorganismos presentes en la biopelícula por medio del Método Tradicional/ Kit de Diagnóstico.

## RESULTADOS

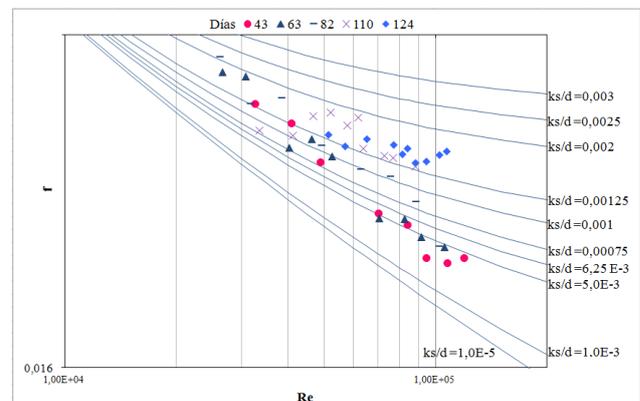
### Modelo 1. Tuberías de diferente material

El objetivo principal de este modelo se fundamentaba en el uso de una fuente de carbono de difícil asimilación, como nutrientes, en lugar de las fuentes sintéticas de carbono usadas para este tipo de estudios tales como el jugo de caña de azúcar u otros disponibles en el mercado; todo esto, justificados en el hecho de que era más probable que fuera el humus y el pasto kikuyo los que contaminaran las redes y no otras fuentes. Sin embargo el utilizar humus afectó la magnitud y variación de las mediciones de pérdidas por fricción como se muestra a continuación.

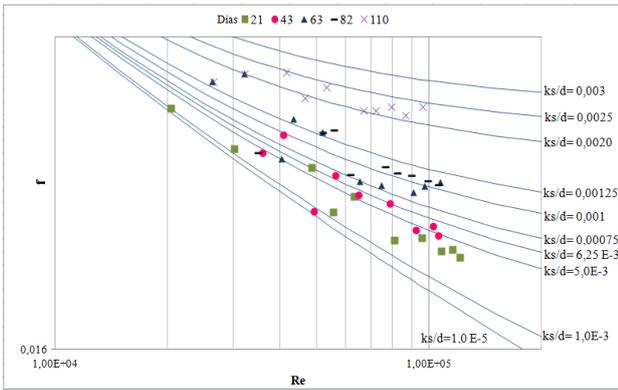
### Efecto de biopelícula sobre factor de fricción



**Figura 6.-** Diagrama Moody de para la tubería de CCP.



**Figura 7.-** Diagrama Moody de para la tubería de PVC.



**Figura 8.-** Diagrama Moody de para la tubería de PE.

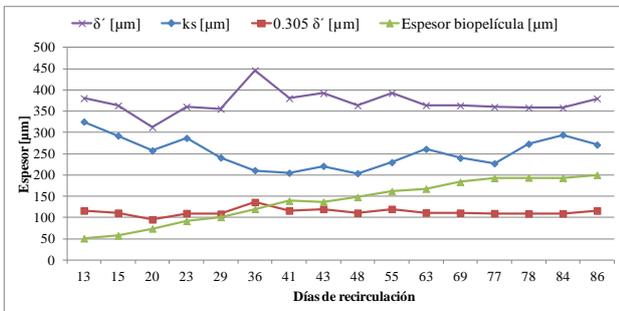
En general para los tres materiales, se observa que los valores de  $f$  son superiores a lo esperado y varían considerablemente. Lo que se atribuye a una pérdida de energía generada por la biopelícula y por la formación de lechos móviles de humus observados en el tubo de vidrio.

Lo que sucede con las pérdidas de energía por fricción en tuberías con resuspensión de sólidos generando depósitos estacionarios es, que se presentan dos límites (las paredes de la tubería y la cima del lecho) lo cual implica dos valores diferentes de la rugosidad hidráulica (Matausek,sf).

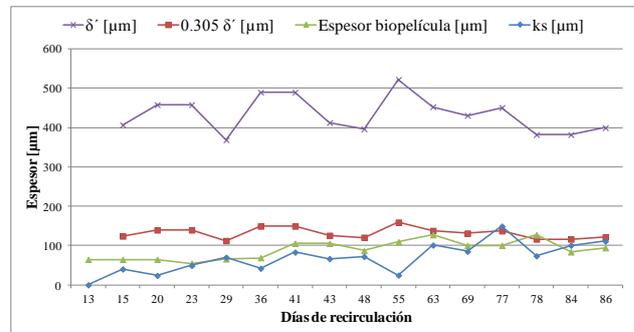
El resultado del fenómeno anterior es la deformación del perfil de velocidad en la vertical de la sección transversal y el desplazamiento del eje hidrodinámico hacia la parte superior de la tubería. De modo que la distribución no simétrica de la velocidad y la concentración de sólidos a través del área de descarga tienen un profundo efecto en el límite de fricción afectando las pérdidas y por lo tanto alterando el factor de fricción.

Por otro lado al comparar los resultados obtenidos para cada una de las tuberías se aprecia que la tubería de mayor rugosidad absoluta (CCP) obtuvo los mayores factores de fricción seguida por la de PE y en último lugar PVC.

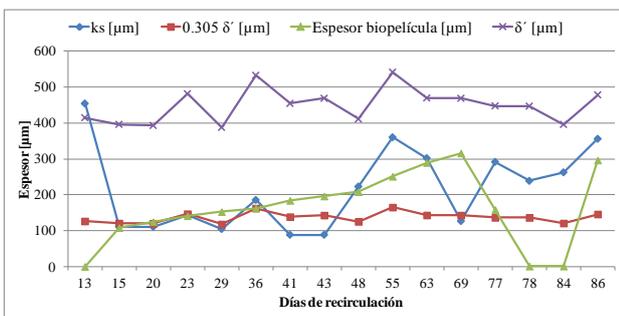
### Comparación entre la rugosidad absoluta, el espesor de la biopelícula y la subcapa laminar viscosa



**Figura 9.-** Comparación entre  $k_s$ ,  $E_{prom}$  y  $\delta'$  para el tubo de CCP.



**Figura 10.-** Comparación entre  $k_s$ ,  $E_{prom}$  y  $\delta'$  para el tubo de PVC.



**Figura 11.-** Comparación entre  $k_s$ ,  $E_{prom}$  y  $\delta'$  para el tubo de PE.

Al observar las anteriores figuras se determina que el régimen de flujo la mayor parte del tiempo se mantuvo en flujo turbulento hidráulicamente liso (FTHL) para las tuberías de CCP y PVC, a excepción de algunos días de recirculación en donde se presentó flujo turbulento transicional (FTT). Mientras que la tubería de PE siempre estuvo por encima de  $0.305 \delta'$ , por lo que el flujo fue FTT.

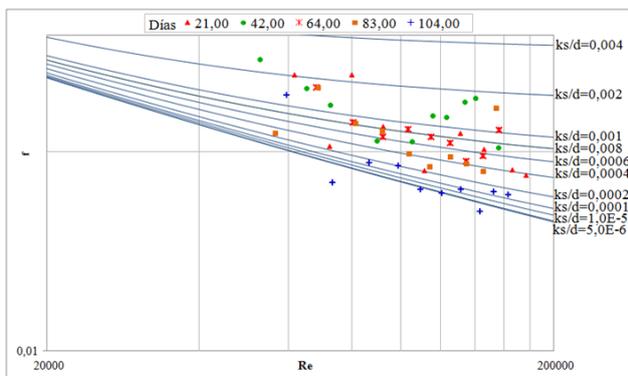
Por otro lado, se observa que a medida que la rugosidad de la tubería tiende a aumentar, el  $k_s$  también lo hace, por el contrario la subcapa laminar viscosa muestra una leve tendencia a disminuir.

Finalmente, se puede apreciar que en ninguno de los 3 casos la rugosidad o el espesor de la biopelícula sobrepasaran el espesor de la subcapa laminar viscosa, lo cual corrobora que el máximo espesor que puede alcanzar la biopelícula está determinado por ésta.

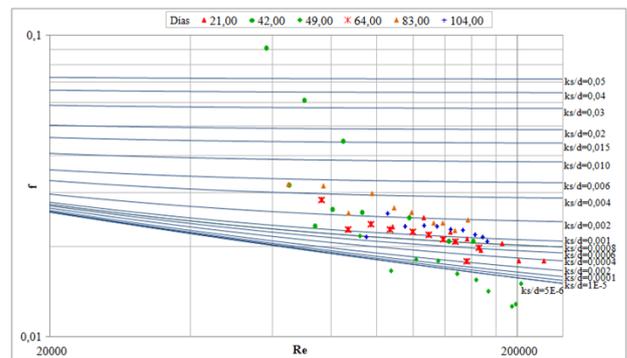
## Modelo 2. Tuberías con velocidad diferente

El objetivo general de este modelo consistía en evaluar la influencia de la velocidad del flujo en el desarrollo de la biopelícula y el efecto de ésta sobre el factor de fricción de Darcy-Weisbach, mediante un modelo físico alimentado únicamente con pasto, ya que se tuvieron en cuenta los inconvenientes que se presentaron en el Modelo 1 provocados por el humus.

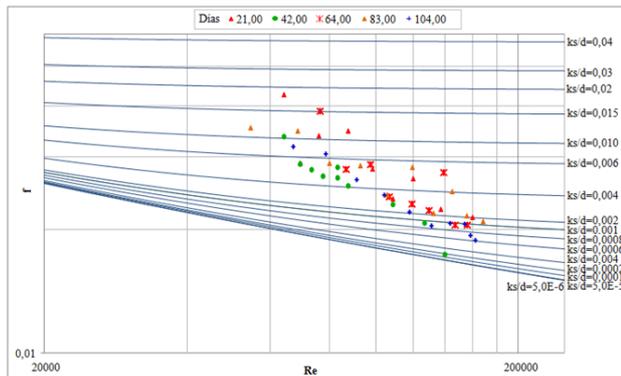
### Efecto de biopelícula sobre factor de fricción



**Figura 12.-** Diagrama Moody de para la tubería con  $v=1$  m/s.



**Figura 13.-** Diagrama Moody de para la tubería con  $v=1.5$  m/s.



**Figura 14.-** Diagrama Moody de para la tubería con  $v=3$  m/s.

En las figuras anteriores, se puede apreciar que el factor de fricción independientemente de la velocidad de flujo no sigue la forma convencional del Diagrama de Moody; su magnitud es mayor que lo esperado y varía sin ninguna tendencia clara en el tiempo.

A su vez se aprecian algunos puntos que están por fuera del rango de validez de la ecuación de Colebrook-White en las tuberías de  $v=1$  y  $1.5$  m/s, lo que equivale a factores de fricción muy bajos correspondientes a rugosidades relativas muy bajas.

En este caso, la incongruencia del factor de fricción en las tuberías con biopelículas con respecto al Diagrama de Moody, se debe a las propiedades visco-elásticas de la biopelícula, que le permiten deformarse y absorber o liberar energía del flujo (Picologlou, 1980). De modo que cuando ésta absorbe energía, se incrementan las pérdidas haciendo que la magnitud del factor de fricción aumente. Contrariamente cuando ésta libera energía, se reducen las pérdidas a tal punto que se obtienen factores de fricción demasiado bajos equivalentes a rugosidades relativas extremadamente pequeñas.

## Comparación entre la rugosidad absoluta, el espesor de la biopelícula y la subcapa laminar viscosa

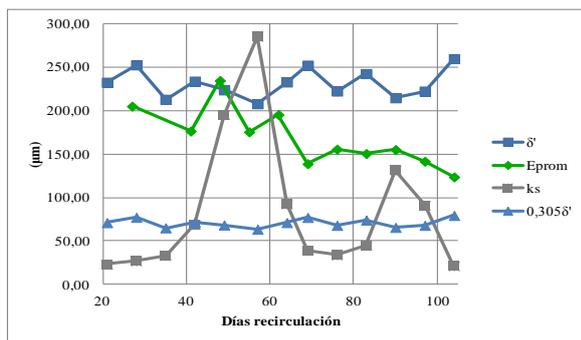


Figura 15.- Comparación entre  $k_s$ ,  $E_{prom}$  y  $\delta'$  para el tubo  $v=1$  m/s.

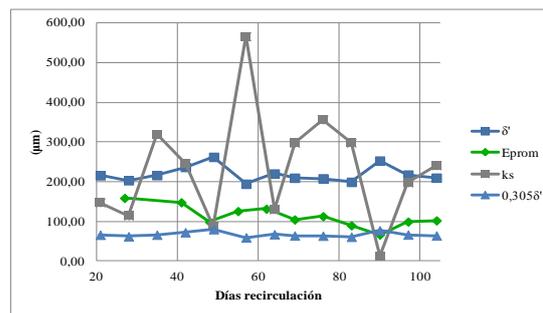


Figura 16.- Comparación entre  $k_s$ ,  $E_{prom}$  y  $\delta'$  para el tubo  $v=1.5$  m/s.

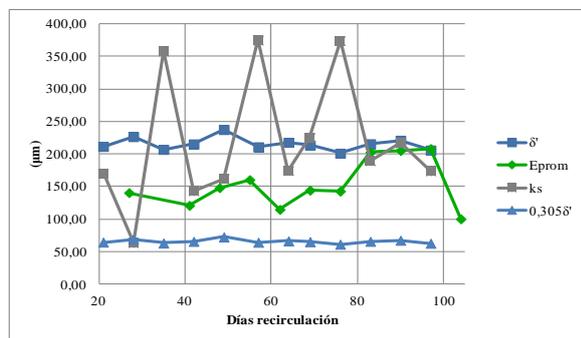


Figura 17.- Comparación entre  $k_s$ ,  $E_{prom}$  y  $\delta'$  para el tubo  $v=3$  m/s.

En la Figura 15, para la tubería con velocidad de flujo de 1m/s ( $v=1$ m/s) se evidencia que el espesor de la biopelícula hace que el  $k_s$  varíe en el tiempo de una forma no común. Para este caso se observa que la rugosidad tiene un pico considerablemente alto, luego desciende y más adelante se forma un pico menor, fenómeno que coincide con una disminución intencional en la disponibilidad del sustrato en el sistema.

En cuanto a la tubería con  $v=1.5$  m/s, se aprecia que el espesor de biopelícula es menor que la de  $v=1$  m/s; al parecer dicha disminución hizo que la rugosidad se comportara diferente, pues aumenta el número de picos y sus magnitudes son variables (Figura 16). Para el caso de  $v=3$  m/s se puede apreciar que el comportamiento de la rugosidad nuevamente cambia (Figura 17), aumentando la cantidad de picos y aumentando su magnitud en comparación la tubería  $v=1$  m/s.

Al comparar la rugosidad con el espesor de la subcapa laminar viscosa en todas las tuberías se puede ver que el flujo es turbulento hidráulicamente liso, aunque en algunos casos tiende al flujo turbulento transicional consecuencia de la forma de la rugosidad.

### Efecto de la velocidad de flujo sobre la velocidad de crecimiento de la biopelícula

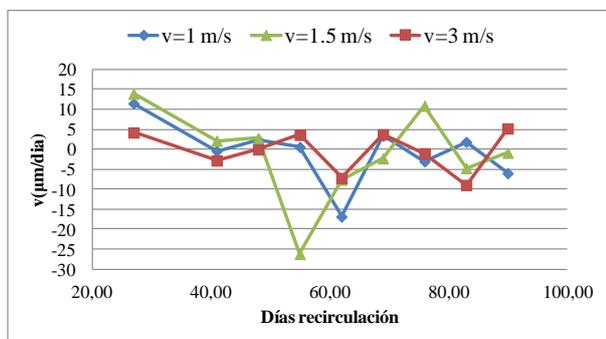


Figura 18.- Evolución del espesor de la biopelícula.

En la Figura 18, se evidencia que la velocidad del flujo afecta la velocidad a la que se desarrolla la biopelícula en la tubería, aunque la relación entre ellas no presenta ninguna tendencia clara. Esto se debe a que la biomasa es un sistema complejo y dinámico cuyo desarrollo depende de otros factores además de la velocidad del flujo (Vargas, 2004).

Los primeros puntos de cada serie representan la velocidad inicial de desarrollo de la biopelícula. Se observa que la tubería con  $v=1,5$  m/s fue la que presentó un mayor crecimiento inicial, mientras que en la de  $v=3$  m/s el desarrollo de biomasa fue el menor, lo que se puede atribuir a la mayor dificultad que enfrentan los microorganismos pioneros para adherirse a un material liso con velocidades altas.

No obstante, a lo largo del tiempo, se aprecia que la velocidad de crecimiento de biomasa más alta es la de  $v=3$  m/s, es decir, si bien a la biomasa le tomó más tiempo desarrollarse en un principio, más adelante fue la que creció a una mayor tasa. A su vez es la que tiene una menor velocidad de decrecimiento, pues tanto la serie de  $v=1$  m/s como la de  $v=1,5$  m/s muestran una caída en el crecimiento severa cerca a los 55 días de recirculación cuando se suspendió intencionalmente la alimentación del sistema. Lo anterior, se debe a la mayor disponibilidad de nutrientes consecuencia del aumento de la transferencia de masa entre el flujo y la biopelícula (Lehtola, 2006).

### **Identificación**

La identificación de las especies llevada a cabo por el LEMA (Laboratorio de Ecología y Microbiología Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia) se hizo con el método de aislamiento e identificación de bacterias en un medio NO puro. El procedimiento fue realizado a muestras tomadas de testigos de centro y borde de cada tubería en diferentes dos épocas del período de recirculación (67 y 92 días).

- Primer período (67 días)
  - *Bacillus pasteurii*: Bacteria en forma de barra, gram positiva, aerobia, infiltrada en depósitos naturales de suelos húmedos y pantanosos. Es capaz de sintetizar calcita, una forma cristalina y estable del carbonato cálcico, a partir de arena. No produce enfermedades.
  - *Staphylococcus capitis*: Coco gram positivo, aerobio componente de la flora de la piel del cuero cabelludo y la frente. Produce infecciones del tracto urinario, también infecciones relacionadas con catéteres tales como: Bacterimia (Bacterias en la sangre), Cellulitis (Infección de la piel) e infección derivada del líquido cefalorraquídeo.
  - *Bacillus subtilis*: Bacteria en forma de barra, gram positiva, aerobia o aerobia facultativa, formadora de esporas resistentes a la temperatura, la radiación y los desinfectantes. En situaciones extremas recurre al canibalismo. Produce enfermedades neoplásicas: neumonía y bacterimia mortal, Septicemia (Letal en pacientes inmunosuprimidos), infección del tejido necrótico axilar en pacientes con cáncer de seno. Infecciones derivadas de prótesis de mama y ventrículos arteriales, meningitis después de una herida en la cabeza y colangitis asociada con el riñón y el hígado. También puede producir mastitis en bovinos y aborto en ovinos.
- Segundo período (92 días)
  - *Bacillus circulans*: Bacteria gram positiva, aerobia, formadora de esporas, mótil, encontrada normalmente en el suelo. Asociado con septicemia, abscesos e infecciones en heridas.
  - *Bacillus licheniformis*: Bacteria motil, formadora de esporas, aerobia facultativa. Se trata de un organismo del suelo no patógeno que se asocia principalmente con las plantas y materiales vegetales. Es utilizada por la industria para producir proteasas y amilasas con el fin de mejorar la eficiencia de los detergentes.

Al observar los resultados obtenidos, se aprecia que las bacterias identificadas son en general formadoras de esporas resistentes al déficit de nutrientes y a los desinfectantes. Estas normalmente no son patógenas para los seres humanos; sin embargo pueden estar asociadas con enfermedades e infecciones, que en su mayoría son letales para la población vulnerable tal como los ancianos, niños y pacientes inmunosuprimidos (patógenos oportunistas).

## CONCLUSIONES

Uno de los objetivos principales de este estudio era modelar físicamente el desarrollo y crecimiento de las biopelículas en sistemas de distribución de agua potable, por lo que se alimentó el sistema con una fuente de carbono de difícil asimilación. Como conclusión se obtuvo que aún utilizando una fuente de carbono presente en el agua de captación para la potabilización, se obtuvo evidencia de la presencia de bacterias en las paredes internas de las tuberías.

En cuanto a la influencia del material de la tubería sobre el desarrollo y crecimiento de biopelículas, si se tiene en cuenta que las condiciones ambientales e hidráulicas en las que se desarrolló el experimento fueron similares para las tuberías de diferente material, se puede concluir que las diferencias de espesor obtenidas en los tres materiales son consecuencia directa del material de la tubería, pero no hay una relación directa entre la rugosidad y el espesor de la biopelícula.

En lo que respecta a la influencia de la velocidad de flujo sobre la velocidad de crecimiento de la biopelícula, se concluye que a medida que aumenta la velocidad del flujo la velocidad inicial de desarrollo disminuye y aumenta la velocidad de crecimiento de la biopelícula. La disminución en la velocidad inicial se debe a que los microorganismos pioneros se les dificulta adherirse a una tubería de material liso con flujo turbulento. Por otro lado, la velocidad de desarrollo aumenta, porque se incrementa la transferencia de masa entre el flujo y la biopelícula, por lo que los microorganismos que la conforman tienen un mayor contacto con nutrientes limitantes de crecimiento.

Otro de los objetivos era determinar el efecto de la biopelícula sobre la hidráulica del sistema de distribución. Con respecto a esto se concluye que el principal efecto hidráulico de la biopelícula, en las tuberías de distribución de agua potable, es el aumento del valor del coeficiente de rugosidad absoluta, el cual depende de la velocidad del flujo en la tubería y la cantidad de sustrato disponible.

Por otro lado, la identificación de especies realizada para el Modelo 2 muestra que las especies de bacterias encontradas en el montaje son formadoras de esporas resistentes a la temperatura, el déficit de nutrientes y al uso de desinfectantes. Por lo tanto son microorganismos que representan un alto riesgo para la población vulnerable y a su vez un reto para su remoción en la red.

Finalmente, este estudio demuestra que todas las tuberías sin importar su material o el caudal que transporten son susceptibles a la formación de biopelícula, debido a que está compuesta de una diversidad de microorganismos resistentes y persistentes. Sin embargo al considerar que su principal efecto depende en parte de la disponibilidad de sustrato, se sugiere que una manera de prevenir la formación de biopelícula en los sistemas de distribución de agua potable sea minimizar la entrada de materia orgánica biodegradable a la red de distribución y manteniendo la concentración recomendada de desinfectante, lo que sugiere mantener la eficiencia de los procesos de potabilización.

## Referencias Bibliográficas

**Knobelsdorf Juliana, Mujeriego Rafael.** Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: Una revisión bibliográfica. *Ingeniería del Agua*. Barcelona : Universidad Politécnica de Cataluña, 1997. Vol. 4, 2.

**Lambert Martin Francis, Jhon Eduards Ryan Wilson, Howie Sean James, De Gilio Bernard Benjamin, Quinn Shane Pearse.** The impact of biofilm Development on Pipe Roughness and Velocity Profile. Great Rivers : World Environmental and Water Resources Congress 2009. ASCE, 2009.

**Vargas, Andrea.** Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelícula en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable. Estado del Arte. Bogotá : Universidad de los Andes, 2004.

**de Victorica Almeida, Jorge L.** Formación de biopelículas y su impacto en los sistemas de conducción de agua. Mexico D.F. : Instituto de Ingeniería, UNAM.

**Lehtola Markku J., Laxander Michaela, Miettinen Ikka T., Hirvonen Arja, Vartiainen Terttu, Martikainen Pertti J.** The effects of changing water flow velocity on the formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes. *Science Direct*. Kuopio : Elsevier, 2006.

**Huq Anwar, Whitehouse A. Chris, Grim Christopher J, Alam Munirul, Colwell Rita R.** Biofilm in water, its role and impact in human disease transmission. *Current Opinion in Biotechnology*. s.l. : Elsevier, 2008.

**Moritz Miriam M., Flemming Hans-Curt, Wingender Jost.** Integration of *Pseudomonas aeruginosa* and *Legionella pneumophila* in drinking water biofilms on domestic plumbing materials. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. Duisburg : Elsevier , 2010.

**Percival SL, Knapp JS, Wales DS y Edyvean RGJ.** The effect of turbulent flow and surface roughness on biofilm formation in drinking water. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. Chester, UK : Society for Industrial Microbiology, 1999.

**Saldarriaga, Juan.** *Hidráulica de Tuberías: abastecimiento de aguas, redes, riegos*. Bogotá : AlfaOmega, 2007. ISBN: 978-958-682-680-8

**Martin Francis Lambert, Ryan Wilson John Eduards, Sean James Howie, Benjamin Bernard De Gilio and Shane Pearse Quinn.** The Impact of Biofilm Development on Pipe Roughness and Velocity Profile. *World Environmental and Water Resources Congress 2009*. Great Rivers : ASCE, 2009.

**Hernández, María Ximena.** Tesis II. *Influencia de la fuente de carbono en el desarrollo de biopelículas y su efecto hidráulico en sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá : Universidad de los Andes, 2010.

**Picologlou, Basil F, Zilver, Nicholas y Characklis, William G.** *Biofilm Growth and Hydraulic Performance*. N° 5, 1980, Vol. 106.

**Donoso, Angela María.** «Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable.» Tesis, Universidad de los Andes., Bogotá, Colombia., 2009.