



FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

SANDRA CAROLINA NAVARRETE RODRÍGUEZ.

MODELACIÓN FÍSICA DE BIOPELÍCULAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE  
AGUA POTABLE ALIMENTADAS CON CARBONO ORGÁNICO DISUELTO.

Asesorado por:

JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA

02 de Julio de 2012



Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA  
Modelación física de biopelículas en redes de distribución de agua potable  
alimentadas con Carbono Orgánico disuelto.



---

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme culminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida, por darme la fortaleza para seguir adelante en todo momento.

A mis padres y hermanos quienes me apoyaron en todas las decisiones que tomé, nunca dejaron de confiar en mí y a quienes les debo todo lo que soy.

A mi asesor Juan Saldarriaga por su apoyo, disposición e interés en el desarrollo de este proyecto y a Jhon Calvo por su trabajo y colaboración en el desarrollo de este proyecto

## Contenido

1.	Introducción .....	2
1.1	Objetivos .....	4
1.1.1	Objetivo General .....	4
1.1.2	Objetivos específicos.....	4
1.2	Antecedentes .....	5
2.	Marco Teórico.....	6
2.1	Aspectos Microbiológicos.....	6
2.1.1	Definición Biopelículas.....	6
2.1.2	Formación y crecimiento en sistemas de distribución de agua potable.....	6
2.1.2.1	Etapas de formación .....	7
2.1.3	Disponibilidad de nutrientes.....	10
2.1.4	Resistencia a los desinfectantes.....	12
2.1.5	Efecto del material de la tubería en el desarrollo de biopelículas. ....	13
2.1.5.1	Materiales en la red de distribución .....	13
2.2	Aspectos Hidráulicos.....	18
2.2.1	Régimen de Flujo y Número de Reynolds .....	18
2.2.2	Pérdidas de presión por fricción.....	19
2.2.3	Diagrama de Moody.....	21
2.2.4	Pérdidas menores.....	23
3.	Descripción del modelo.....	24
3.1	Proceso de construcción .....	25
3.2	Proceso de recirculación.....	30
3.3	Selección de velocidad de flujo.....	32
4	Procedimiento Experimental .....	33
4.1	Calibración de vertederos.....	33
4.2	Recirculación diaria.....	33
4.3	Determinación del volumen del sistema .....	33
4.4	Cloración del sistema .....	35

---

4.5	Alimentación del sistema .....	36
4.6	Recolección de datos .....	37
4.7	Manipulación de datos .....	39
4.7.1	Análisis Microbiológicos .....	40
5	Resultados y discusión .....	42
5.1	Calibración de vertederos.....	42
5.2	Curva de calibración de cloro.....	44
5.3	Pérdidas por fricción y análisis gráfico por medio del Diagrama de Moody. ....	45
5.3.1	Rugosidad de las tuberías limpias. ....	45
5.3.2	Comportamiento durante recirculación y efecto del desarrollo de la biopelícula sobre el factor de fricción de Darcy Weisbach .....	49
5.4	Aspectos Microbiológicos.....	52
6.	Conclusiones .....	53
7.	Recomendaciones.....	54
8.	Anexos.....	55
9.	Bibliografía .....	56

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de causas de daños en las tuberías según el material (Ávila & Clavijo).....	7
Figura 2. Biopelícula desarrollada en una superficie de acero, analizada con microscopia de epifluorescencia, (Dolan, 2002). .....	9
Figura 3. Formación de biopelículas en tuberías. (Hernández, 2010).....	10
Figura 4. Biomasa presente en cada tipo de tubería (Niquette Patrick, 2000). .....	14
Figura 5. Vista superior del montaje. ....	24
Figura 6. Vista lateral del montaje. ....	24
Figura 7. Estructuras disipadoras de energía.....	25
Figura 8. Instalación de Vertederos.....	26
Figura 9. Ubicación de secciones libres de tubería. ....	26
Figura 10. Adecuación de tubería de PE. ....	27
Figura 11. Corte de testigos.....	27
Figura 12. Instalación de piezómetros.....	28
Figura 13. Instalación de mangueras.....	28
Figura 14. Tablero Piezométrico. ....	29
Figura 15. Sensor diferencial de presión y ubicación de piezómetros. ....	29
Figura 16. Sección inicial del montaje .....	30
Figura 17. Rebose de tanque elevado.....	31
Figura 18. Sección final del montaje.....	31
Figura 19. Proceso de toma de datos.....	37
Figura 20. Formato de recolección de datos.....	38
Figura 21. Proceso de manipulación de datos para analizar las pérdidas por fricción. ....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables importantes en la adhesión celular para la formación de biopelículas, (Dolan, 2002). .....	8
Tabla 2. Nutrientes encontrados en sistemas de distribución de agua potable.....	11
Tabla 3. COT presente en materiales de diferentes tuberías, (Hernández, 2010). .....	14
Tabla 4. Preferencia en formación de biopelículas según el material de la tubería (Keinanen, 2006). .....	16
Tabla 5. Clasificación del régimen de flujo según el número de Reynolds. ....	19
Tabla 6. Tipos de flujo dado el espesor de la subcapa laminar viscosa. ....	20
Tabla 7. Volumen en tanques y vertederos. ....	34
Tabla 8. Volumen en tuberías. ....	34
Tabla 9. Ecuaciones para determinar el desarrollo de la biopelícula. ....	40
Tabla 10. Resultados calibración de vertederos .....	43
Tabla 11. Rugosidad absoluta de materiales (RAS, 2000).....	48
Tabla 12. Comparación de rugosidad absoluta .....	48
Tabla 13. Peso inicial de testigos. ....	55

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Diagrama de Moody. (Hernández, 2010). .....	22
Gráfica 2. Curva de calibración del vertedero de la tubería de PVC.....	42
Gráfica 3. Curva de calibración del vertedero de la tubería de Acero Galvanizado. ....	43
Gráfica 4. Decaimiento de cloro.....	44
Gráfica 5. Determinación experimental de $k_s$ para la tubería de PVC.....	46
Gráfica 6. Determinación experimental de $k_s$ para la tubería de Acero.....	47
Gráfica 7. Comportamiento del crecimiento de biopelícula en la tubería de PVC. ....	50
Gráfica 8. Comportamiento del crecimiento de biopelícula en la tubería de Acero .....	51

---

## 1. Introducción

El deterioro de la calidad de agua potable tras el paso por el sistema de distribución puede deberse a cambios físicos, químicos o microbiológicos que ocurren en ésta y que sumados al decaimiento de desinfectante, pueden generar daños en la salud de la población.

Frente a los cambios microbiológicos, la posibilidad de muchos microorganismos de sobrevivir ante los sistemas de tratamiento de agua en las plantas de potabilización y colonizar la red de distribución de agua potable se ha convertido en un problema de importancia, especialmente en el caso de crecimiento de biopelículas, evento que debe ser analizado dado el riesgo que estas pueden presentar al promover las condiciones propicias para que microorganismos patógenos puedan entrar al sistema y conllevar a serias implicaciones en la salud pública.

La formación de biopelículas en tuberías se encuentra ampliamente documentada y con base en la literatura se ha encontrado que más del 99% de todas las bacterias presentes en el agua viven asociadas de esta manera (Zsuzsa Ludmany, 2006), logrando una organización y adaptación al medio que les permite prolongar su establecimiento en el sistema de distribución de agua potable, especialmente en las paredes de las tubería ya que por medio de la secreción de sustancias logran adherirse eficientemente haciendo que su desprendimiento no se logre fácilmente.

La principal fuente de alimento para la formación de biopelículas, proviene de la materia orgánica que no es removida en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP), presente en el agua debido al contacto de ésta con material vegetal cercano a quebradas y arroyos que abastecen la PTAP.

Adicionalmente, es posible que se dé el ingreso de materia orgánica en pequeñas cantidades debido a fugas o fisuras en las tuberías en los procesos de reparación de tramos de tuberías. Desde un punto de vista hidráulico, la formación de biopelículas en los sistemas de distribución de agua potable genera pérdidas provocadas por la fricción entre el agua y las paredes de la tubería, haciendo que el sistema sea menos eficiente y en casos extremos haciendo necesario el bombeo adicional que representa un gasto de energía no contemplado inicialmente.

En el presente estudio se evalúa la influencia del material de la tubería en la formación de biopelículas mediante el monitoreo del crecimiento de estas por medio de testigos, como también el efecto hidráulico debido a las pérdidas generadas y los cambios en el factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach dado la actividad microbiológica presente.



Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA  
Modelación física de biopelículas en redes de distribución de agua potable  
alimentadas con Carbono Orgánico disuelto.



---

Para cumplir estos objetivos se realizó un montaje en el laboratorio para comparar bajo las mismas condiciones hidráulicas el desarrollo y efecto de la formación de biopelículas en tres tuberías de materiales diferentes (PVC, Polietileno y Acero).



---

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Establecer si existe una relación entre el material de la tubería y la formación y crecimiento de biopelículas por medio del estudio de su efecto hidráulico en tuberías simulando un sistema de distribución de agua potable.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un montaje en el cual se puedan realizar pruebas experimentales para determinar la influencia de los materiales en el desarrollo y crecimiento de biopelículas.
- Determinar las pérdidas de altura piezométrica debido a la fricción generada por la presencia de biopelículas y analizar su comportamiento en el diagrama de Moody.
- Determinar por medio de datos experimentales la rugosidad de las tuberías utilizadas en el montaje a fin de analizar su evolución en el tiempo debido a la presencia de biopelículas en las paredes de cada tubo.
- Establecer cuantitativamente el crecimiento de microorganismos en cada una de las tuberías comparando los resultados obtenidos logrando establecer un “orden de preferencia” por colonizarlas.

## 1.2 Antecedentes

Gracias a varios trabajos de investigación realizados en la Universidad de los Andes, se ha podido realizar avances relacionados con el estudio de la formación y características de las biopelículas presentes en los sistemas de distribución de agua potable.

A continuación se presentan algunas de las conclusiones de las investigaciones realizadas.

- *“Influencia de los materiales de las tuberías en el crecimiento de biopelícula en las redes de distribución de agua a presión (2005)”* presentado por Andrea Vargas Gamarra; concluye que existe un aumento del factor de fricción a medida que crece el espesor de la biopelícula. Adicionalmente afirma que la colonización de microorganismos es mayor en una tubería de polietileno que en una de PVC ya que el tamaño de la biopelícula fue mayor en la primera.
- *“Influencia de la fuente de carbono en el desarrollo de biopelículas y si efecto hidráulico en sistemas de distribución de agua potable (2010)”* presentado por María Ximena Hernández: describe que el crecimiento bacteriano en la tubería depende del material de la misma lo cual afecta directamente las pérdidas de energía generadas en el sistema. Concluye que el aumento en el factor de fricción es mayor en tuberías de CCP, que en tuberías de polietileno y PVC.
- *“Modelación Física de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico disuelto (2011)”* presentado por María Ximena Trujillo: concluye que el crecimiento de biopelículas depende de la velocidad de flujo a causa de la transferencia de masa entre los nutrientes del agua y la biopelícula, con lo cual a medida que la velocidad en el sistema aumenta, el crecimiento de biopelícula en el mismo también. Adicionalmente, encuentra que la variación del factor de fricción frente al Número de Reynolds no se relaciona por medio del diagrama de Moody debido a las propiedades visco-elásticas de la biopelícula que le permite deformarse absorbiendo o liberando energía.

## 2. Marco Teórico

Para cumplir con los objetivos propuestos se hace necesario realizar una revisión bibliográfica acerca de las biopelículas, su formación y crecimiento como también de los principios hidráulicos que se pueden ver afectados debido al desarrollo de estas en las tuberías.

### 2.1 Aspectos Microbiológicos

#### 2.1.1 Definición Biopelículas.

Una biopelícula es un conjunto diverso de microorganismos entre los cuales se pueden encontrar bacterias, hongos, virus, bacilos entre otros, que interactúan y viven asociados para formar una meta-comunidad y que se encuentran protegidos gracias a una matriz polimérica producida por ellas mismas, la cual se adhiere a superficies vivas o inertes, (CIACUA, 2009).

#### 2.1.2 Formación y crecimiento en sistemas de distribución de agua potable.

Aunque los sistemas de distribución de agua potable puedan parecer un ambiente hostil para el crecimiento microbiano debido a las bajas concentraciones de carbono, presencia de desinfectante, generalmente bajas temperaturas y regímenes de flujo que parecen no promover la proliferación bacteriana, el estudio de la formación de biopelícula en este medio se encuentra bien documentado.

El ingreso de los microorganismos al sistema de distribución se puede dar por deficiencias en los sistemas de tratamiento en las plantas de potabilización como también por fluctuaciones en la presión del agua que puede generar ondas negativas de presión o secciones de vacío, haciendo posible la entrada de los mismos debido a posibles fisuras en la red de tuberías, uniones etc., que permiten el paso de infiltración que arrastra tanto microorganismos como sustrato para alimentar y promover la proliferación de los mismos. En la Figura 1 se presentan los porcentajes de ocurrencia de diversas fallas en tuberías, (Ávila & Clavijo).

	Acero galvan.	Otros aceros	Hierro fundido	Hierro dúctil	Polietileno	PVC
<b>Rotura</b>	2%	3%	20%	18%	7%	11%
<b>Defecto del material</b>	–	–	1%	–	–	30%
<b>Corrosión</b>	89%	94%	16%	60%	7%	
<b>Fallas de instalación</b>	–	–	1%	18%	43%	4%
<b>Otros</b>	–	–	1%	4%	14%	4%
<b>Inexplicable</b>	9%	3%	61%	–	29%	51%

Figura 1. Porcentaje de causas de daños en las tuberías según el material (Ávila & Clavijo).

Adicionalmente, varios compuestos se encuentran diferencialmente disponibles a los microorganismos para su uso como fuente de energía. Aquel que está principalmente asociado con el crecimiento bacteriano, conocido como Carbono Orgánico Disuelto Biodegradable (COBD) usado principalmente para procesos metabólicos y otro utilizado para la generación de biomasa conocido como Carbono Orgánico Asimilable (COA) (Reynolds). Aún así, se sabe que existe otro tipo de nutrientes como nitrógeno, fósforo o algunas trazas de metales que pueden contribuir al desarrollo y proliferación de los microorganismos.

El número y nivel de actividad celular presente en las biopelículas es dependiente de la fuente de carbono de la cual se alimentan; adicionalmente se encuentra que existe una relación entre esta, el tipo de tubería y la formación de la biopelícula que complica el entendimiento de la dinámica de crecimiento, (A. Camper, 1999).

#### 2.1.2.1 Etapas de formación

El establecimiento y desarrollo de biopelículas en las paredes de las tuberías se puede explicar en varias etapas las cuales serán explicadas a continuación, (Hernández, 2010).

##### Primera Etapa: Acondicionamiento de la superficie

En esta, se neutralizan las posibles cargas que puedan tener los compuestos orgánicos presentes en el agua que se depositan en las paredes de las tuberías para facilitar el posterior acercamiento de los microorganismos.

## Segunda Etapa: Adhesión de bacterias pioneras

En la Tabla 1 se presentan las variables más importantes en la adhesión celular de microorganismos para la formación de biopelículas; en esta es posible notar la importancia de las propiedades del fluido en su formación como también las características de las células pioneras para poder llegar a establecerse en las paredes de las tuberías.

Frente a las características del fluido, las bacterias libres que se encuentran en el agua pueden acercarse a la zona límite, donde la velocidad de flujo tiende a cero y establecerse en las paredes de la tubería por medio de fuerzas electrostáticas y físicas, favorecida por su estructura celular (cilios o fimbrias). Posterior a esto, comienza la elaboración de estructuras más complejas que promoverán la fijación.

Tabla 1. Variables importantes en la adhesión celular para la formación de biopelículas, (Dolan, 2002).

Propiedades del sustrato	Propiedades del fluido	Propiedades de las células
Textura o rugosidad	Velocidad	Hidrofobicidad de la superficie celular
	pH	Fimbrias y flagelos
Hidrofobicidad	Temperatura	
	Cationes	Sustancias poliméricas extracelulares (EPS)
	Presencia de agentes antimicrobianos	

## Tercera Etapa: Formación de las sustancias poliméricas extracelulares (EPS)

La formación de EPS (por sus siglas en inglés) facilita la fijación de los microorganismos a las paredes de la tubería ya que son polímeros de tipo adhesivo.

Las EPS se encuentran altamente hidratadas ya que pueden incorporar grandes cantidades de agua en su estructura por medio de enlaces de hidrógeno; ante esto vale la pena resaltar que pueden ser hidrofóbicas e hidrofílicas, que su composición determina su estructura (rígida, deformable, soluble) y que ésta varía dependiendo del tipo de microorganismo que la genere y de la disponibilidad de nutrientes del medio, (Dolan, 2002).

De la misma forma, la diversidad de microorganismos en las biopelículas puede presentarse gracias a la matriz de las EPS que además de servir para aislar los microorganismos del medio, también sirve para separar micro colonias de diferentes organismos celulares por medio de canales de agua. En la Figura 2, es posible observar una

biopelícula de *P. aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae* y *Flavobacterium* spp. que se ha desarrollado en una superficie de acero en un sistema de agua potable en un laboratorio. La Figura 2 muestra claramente dichos canales en los cuales se permite la difusión de nutrientes, oxígeno y agentes anti microbianos.

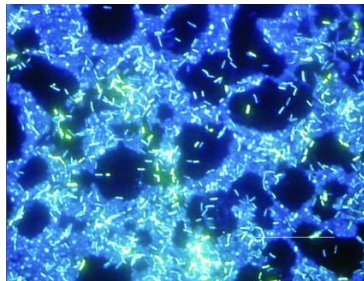


Figura 2. Biopelícula desarrollada en una superficie de acero, analizada con microscopia de epifluorescencia, (Dolan, 2002).

#### **Cuarta Etapa: Desarrollo, reproducción y colonización de microorganismos secundarios**

Tras la acumulación de nutrientes los microorganismos empiezan a reproducirse, aumentando proporcionalmente la matriz de EPS y el área cubierta por la biopelícula, promoviendo la adhesión de más microorganismos y la secreción de sustancias poliméricas la cual se hace bastante elevada, encontrando que las EPS pueden llegar a alcanzar del 50 al 90% del carbono orgánico presente en las biopelículas, (Dolan, 2002).

Las relaciones simbióticas se complejizan debido al ingreso de nuevos microorganismos que encuentran en los residuos de los colonizadores pioneros, una fuente de sustrato para desarrollarse.

#### **Quinta Etapa: Desprendimiento y nueva colonización**

A medida que la biopelícula se hace madura va ganando espesor e incrementa el esfuerzo cortante por contacto con el fluido, posibilitando que células pioneras se desprendan y colonicen aguas abajo nuevas secciones de tubería para comenzar el ciclo anteriormente descrito.

En la Figura 3 se presenta un esquema que resume las etapas anteriores.

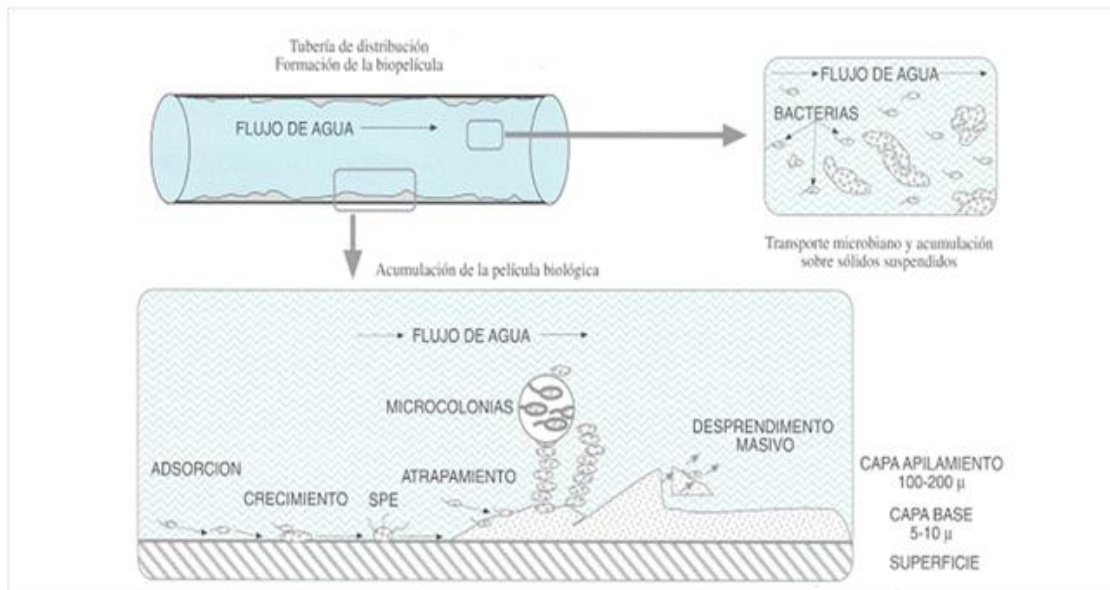


Figura 3. Formación de biopelículas en tuberías. (Hernández, 2010)

### 2.1.3 Disponibilidad de nutrientes

Tal como se mencionó anteriormente, una mínima cantidad de nutrientes en el agua puede promover la formación, crecimiento y desarrollo de microorganismos, cuyo ciclo puede continuar hasta la formación de biopelículas altamente resistentes a condiciones extremas.

El requerimiento de nutrientes para el desarrollo y multiplicación de microorganismos está ligado a la disponibilidad de carbono, fósforo y nitrógeno. En casos donde dichos nutrientes se encuentren limitados, los microorganismos pueden entrar en un estado de latencia reduciendo su actividad metabólica y requiriendo cantidades mínimas de estos para poder sobrevivir, esperando encontrar las condiciones apropiadas para su desarrollo y reproducirse.

En la Tabla 2 se pueden apreciar diversos tipos de nutrientes que intervienen en el crecimiento de microorganismos en sistemas de distribución de agua potable, como su posible fuente de entrada al mismo, (Donoso, 2009).

Tabla 2. Nutrientes encontrados en sistemas de distribución de agua potable.

Nutrientes	Fuentes
Carbón Orgánico	Ácidos húmico y fúlvico propios del agua
	Plastificantes y solventes
	Plásticos reforzados con fibra de vidrio
	Lubricantes de bombas y equipos
	Subproductos microbianos
	Polvo
Nitrógeno	Ácidos húmico y fúlvico propios del agua
	Nitratos y nitritos del agua
	Subproductos microbianos
	Polvo
Fosforo	Fosfatos del agua
	Subproductos microbianos
	Polvo
Azufre	Sulfatos del agua
	Acido sulfúrico (proveniente del pre tratamiento)
	Surfactantes
	Polvo
Metales y trazas	Elementos metálicos y sales del agua
	Plásticos reforzados con fibra de vidrio
	Componentes de acero inoxidable
	Químicos adicionados en el tratamiento
	Polvo

De la tabla anterior es posible notar que existen varias fuentes de nutrientes que pueden llegar a contribuir a la formación de biopelículas, por lo cual su limitación y estudio se hacen complejos y más teniendo en cuenta la adaptabilidad de los microorganismos debido al desarrollo de estados de latencia.



---

### 2.1.4 Resistencia a los desinfectantes

Gracias a las EPS secretadas por las biopelículas, las comunidades microbianas pueden no solo encontrar un medio de establecimiento, alimento y defensa frente a cambios térmicos y micro-ambientales, sino también adoptar cierta resistencia frente a la concentración de desinfectante que queda remanente tras la salida de las plantas de potabilización, propiciando un ambiente óptimo para el establecimiento y desarrollo de patógenos que pueden generar problemas en la salud de la población.

La concentración de cloro residual en los sistemas de distribución de agua potable es un requerimiento generado con base en el Decreto 1575 y la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual establece que el sistema debe mantener una concentración de cloro residual de 0.3 a 2 mg/L en cualquier punto de la red, con lo cual se garantiza la desinfección de microorganismos en el agua sin afectaciones a la salud humana. A pesar de esto, debido a que la masa de EPS secretada es considerable frente a la población microbiana presente, esta sirve de barrera para los microorganismos que se encuentran más cercanos a la pared del tubo, haciendo que los agentes antimicrobianos no sean efectivos.

Además de la protección lograda por las EPS, los microorganismos con el tiempo también pueden desarrollar cierta resistencia o capacidad de adaptación reflejada en cambios a nivel celular como lo es el cambio en el contenido de lípidos, lipo-polisacaridos, purinas y hasta de la membrana citoplasmática, así pues, los microorganismos que se encuentran más cerca de la pared del tubo están más seguros que los que se encuentran en contacto directo con el agua, con lo cual aunque algunos de estos mueran, mandan señales de alerta a los microorganismos vecinos para que estos puedan generar una respuesta ante el estrés del medio y sobrevivir haciéndose más resistentes.

A pesar de lo anterior, existen estudios orientados a investigar si la dosis de desinfectante remanente en el sistema de distribución es suficiente para evitar el crecimiento de biopelículas en el mismo, encontrando que no se puede limitar únicamente a un tratamiento con desinfectante para controlar el crecimiento de las mismas en el sistema de distribución, sino que es necesario encontrar una forma de remover la materia orgánica de una manera más eficiente, (J Chandy, 2001).

---

### **2.1.5 Efecto del material de la tubería en el desarrollo de biopelículas.**

Las características de los materiales de las tuberías tienen gran influencia en las densidades de bacterias que se fijan a sus paredes. La rugosidad por ejemplo, ha sido identificada como un factor importante que afecta el establecimiento de microorganismos en las tuberías. La estabilidad, relacionada con la corrosión, puede promover espacios de establecimiento de microorganismos, tanto así como para que la biopelícula se convierta en una barrera para evitar corrosiones mayores en las tuberías y por último, la composición química del material puede llegar a afectar la composición microbiológica presente en la biopelícula formada.

#### **2.1.5.1 Materiales en la red de distribución**

El sistema de distribución de agua potable en Bogotá cuenta con tuberías antiguas fabricadas especialmente en materiales como asbesto-cemento y en hierro fundido. Del primero, se estima que existen cerca a 2000 km de tubería y del segundo aproximadamente 500 km (Ávila & Clavijo). Para el caso de redes en instalaciones domésticas, los materiales comúnmente usados para las construcciones fueron acero galvanizado y cobre, los cuales tienen una tendencia a ser reemplazados por materiales plásticos, principalmente porque son más económicos y ayudan a prolongar su vida útil. Con base en lo anterior, se hace necesario detallar no solo las propiedades los materiales en la red, sino también estudiar la posible contribución de nutrientes por parte de los mismos que promueven el establecimiento y crecimiento de biopelículas, (Niquette Patrick, 2000).

En un experimento que pretendía evaluar la contribución de sustrato en forma de carbono orgánico total de alguno de los materiales de las tuberías a los microorganismos, se encontraron los resultados de la Tabla 3, (Hernández, 2010).

Tabla 3. COT presente en materiales de diferentes tuberías, (Hernández, 2010).

Material	COT (mg/L)
Vidrio	2.78±0.4
Cobre	4.15±0.17
Polibutileno	4.46±0.15
PVC	5.42±0.11
Polipropileno	5.98±1.56
Polietileno	179±0.82
Etileno-propileno	157±0.84
Látex	320±19.4

Tal como se observa, se encuentra que el material que menos COT aporta es el vidrio, por lo tanto se espera que en este tipo de tuberías el crecimiento de biopelículas no sea muy elevado, caso contrario de lo que ocurriría con el látex.

De manera similar en un estudio realizado (Niquette Patrick, 2000), se evaluó el impacto de los materiales de las tuberías en la densidad de biomasa en un sistema de distribución de agua potable, encontrando los resultados presentados en la Figura 4.

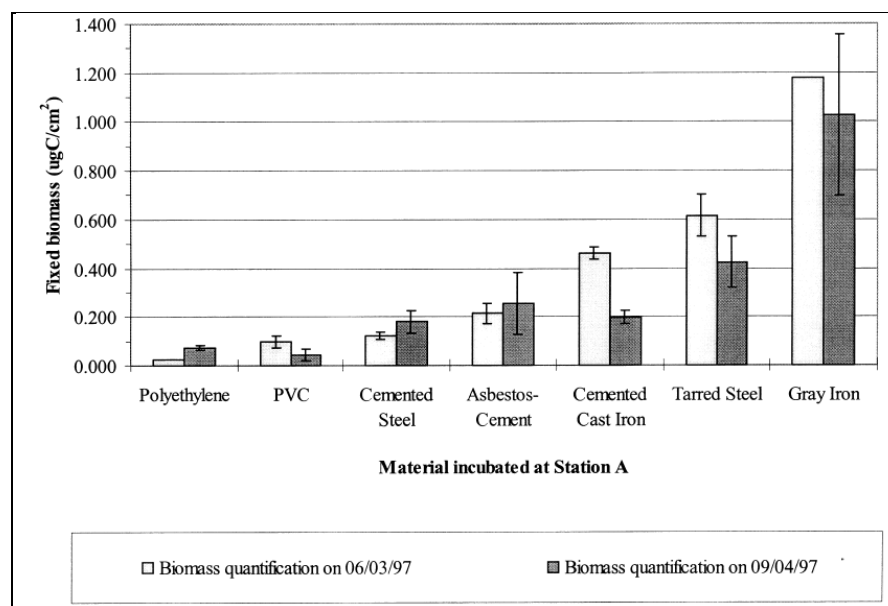


Figura 4. Biomasa presente en cada tipo de tubería (Niquette Patrick, 2000).

En esta, es posible notar que existe una marcada preferencia de crecimiento microbiológico en tuberías de hierro, acero, y asbesto-cemento comparado con aquellas basadas en materiales plásticos como PVC y polietileno.

A continuación se describen algunas de las características de materiales usados para la fabricación de tuberías, (Gamarra, 2005).

- **Asbesto-cemento:** Son estudiadas debido a que su uso fue común en sistemas de distribución desde 1920. Estas tuberías construidas con concreto (80%) y reforzadas con fibras de asbesto (20%) por lo cual dentro de su composición es posible encontrar cal e hidróxido de calcio que con el paso del tiempo se lavan debido al transporte de agua debilitando la tubería y generando posibles fallas de la misma, permitiendo el ingreso de material orgánico y promoviendo el desarrollo de biopelículas, (Dunling Wang, 2010).
- **Hierro:** Estimula el crecimiento de microorganismos debido a problemas de corrosión y formación de hendiduras, facilitando el establecimiento de biopelículas en las mismas. En contacto con cloro forma hidróxidos disminuyendo la presencia de cloro libre en el agua y haciendo más fácil la proliferación de microorganismos, por lo que es considerado un material donde existe mayor densidad de biopelículas, posiblemente debido a la acumulación de nutrientes, rugosidad y mayor demanda de desinfectante.  
 Vale la pena recordar que la generación de biopelículas también está afectada por la rugosidad de las paredes de la tubería, encontrando que las más rugosas tienen mayor número de microorganismos comparadas con las superficies lisas o pulidas, (Keinanen, 2006).
- **Cobre:** La formación de biopelículas en este tipo de material es lenta y no posee gran variedad de microorganismos, por lo cual es poco densa. Este fenómeno se cree que ocurre debido a que los iones de cobre pueden inhibir la presencia de algunos nutrientes que son necesarios para el crecimiento de algunos tipos de bacterias.
- **Polietileno:** material termoplástico, ampliamente usado debido a su resistencia química, resistencia a la corrosión y bajo precio. Tiene la capacidad de albergar varios microorganismos debido a que aporta suficientes nutrientes para que se dé la formación rápida de biopelículas. Aun así comparado con otro tipo de materiales, la colonización de microorganismos no es alta.

- PVC: cuenta con alta resistencia mecánica y a los ácidos; se ha comprobado que este tipo de material alberga menos cantidad de microorganismos comparado con los que pueden albergar materiales como el hierro. Aun así, en su superficie se desarrolla mayor densidad de biopelícula comparado con la encontrada en superficies de acero inoxidable soportando la idea que los microorganismos colonizan con mayor facilidad las superficies hidrofóbicas, (Donoso, 2009).

Las biopelículas formadas son de crecimiento lento pero cuentan con gran densidad y diversidad.

En varias investigaciones dicha relación se estudió, encontrando una preferencia de formación de biopelículas presentada en Tabla 4, (Keinanen, 2006).

Tabla 4. Preferencia en formación de biopelículas según el material de la tubería (Keinanen, 2006).

Preferencia de formación	Año de estudio		
	1994	1999	2000
1	Látex	Hierro Fundido	Hierro gris
2	Etileno-propileno	Polietileno	Cemento
3	Polietileno	PVC	Acero al carbón
4	Acero Suave		PVC
5	PVC		Polietileno
6	PVCc*		
7	Polipropileno		
8	Acero Inoxidable		
9	Vidrio		

\*Dentro de la línea de materiales de PVC, se encuentra una clasificación que depende la terminación y uso del producto, encontrando el PVCc (Poli cloruro de vinilo clorado) especialmente usado para transportar líquidos con temperaturas de operación por encima de los 100°C.

---

De la Tabla anterior es necesario resaltar que aunque todos los estudios no se realizaron con los mismos materiales, en cada uno de ellos se establece un orden de preferencia de formación de biopelícula.

Adicionalmente y para los fines de este estudio, se encuentra que el polietileno en la mayoría de casos promueve de manera más marcada la formación de microorganismos comparado con el PVC y acero al carbón. Estos resultados serán validados experimentalmente por medio de un montaje que será presentado posteriormente ya que de manera general, se puede establecer que el tipo de material de tubería es un factor determinante en el desarrollo de biopelículas en las paredes de las mismas.

## 2.2 Aspectos Hidráulicos

### 2.2.1 Régimen de Flujo y Número de Reynolds

Tal como se presentó en la Tabla 1, el establecimiento y desarrollo de la biopelícula está afectado por el flujo al interior de la tubería debido a las condiciones físicas y químicas presentes en el mismo, como también a la velocidad de transferencia de masa entre nutrientes-microorganismos.

El estudio de la clasificación del régimen de flujo en tuberías, trajo consigo el desarrollo del número de Reynolds, por medio del cual es posible asociar las fuerzas viscosas con las fuerzas inerciales en un fluido en movimiento:

$$Re = \frac{v * d}{\nu}$$

(Ecuación 1)

Tal como se observa en la Ecuación 1, el Número de Reynolds es función de la viscosidad cinemática ( $\nu$ ), la velocidad ( $v$ ) y el diámetro de la tubería ( $d$ ); por medio de éste es posible determinar el comportamiento de las partículas en el interior del fluido.

Así pues, según el número de Reynolds, el flujo se puede clasificar en:

**Flujo laminar:** las fuerzas viscosas predominan sobre las inerciales y por lo tanto no existe intercambio molecular. En este se supone que el fluido se mueve en capas dispuestas una sobre otras.

**Flujo en transición:** etapa intermedia entre el laminar y el turbulento, que se presenta según las condiciones del experimento.

**Flujo turbulento:** las fuerzas inerciales predominan sobre las viscosas y existe mezcla entre capas promoviendo el intercambio molecular, adicionalmente no existe velocidad permanente por lo cual se habla de velocidad promedio, (Hernández, 2010).

En la Tabla 5 se presenta dicha la clasificación.

Tabla 5. Clasificación del régimen de flujo según el número de Reynolds.

Tipo de Flujo	Rango
Laminar	$Re < 2200$
Transición	$2200 < Re < 4500$
Turbulento	$Re > 4500$

### 2.2.2 Pérdidas de presión por fricción

Las pérdidas por fricción en flujos turbulentos en movimiento que se presentan por la interacción fluido-pared, son explicadas por medio de la teoría de longitud de mezcla de Prandlt, la cual establece que existe un esfuerzo de corte causado por la viscosidad del fluido y su roce con las paredes de la tubería.

La anterior fuerza de presión es la responsable de las pérdidas por fricción en tuberías y se representa mediante la Ecuación 2.

$$\tau_0 = \frac{d}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{H_f}{l}$$

(Ecuación 2)

donde  $\tau_0$  es el esfuerzo cortante,  $d$  es el diámetro de la tubería,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $H_f$  es la pérdida de presión piezométrica y  $l$  es la longitud en la que se produce dicha pérdida, (Saldarriaga, 2007).

Adicionalmente, en el flujo turbulento la presencia de la pared de la tubería impide que las partículas vibren libremente, es decir, la velocidad de las partículas se aproxima a cero impidiendo la mezcla de las capas de flujo donde se forma una zona laminar denominada subcapa laminar viscosa.

El espesor de la subcapa laminar es el que establece la diferencia entre los flujos lisos y los flujos rugosos y se determina por medio de la Ecuación 3.

$$\delta' = 11,6 \cdot \frac{v}{u_*}$$

(Ecuación 3)



donde  $\delta'$  es el espesor de la subcapa laminar viscosa,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $u_*$  es la velocidad de corte que equivale a  $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ .

Los rangos que determinan si el flujo es liso o rugoso dependiendo de la magnitud del espesor de la subcapa y el coeficiente de rugosidad  $k_s$  se determinan en la Tabla 3, (Saldarriaga, 2007).

Tabla 6. Tipos de flujo dado el espesor de la subcapa laminar viscosa.

Tipo de Flujo	Rango
Liso	$k_s \leq 0,305\delta'$
Transición	$0,305\delta' < k_s \leq 6,1\delta'$
Rugoso	$k_s \geq 6,1\delta'$

Adicionalmente, por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach es posible describir las pérdidas por fricción en función de la velocidad, el diámetro de la tubería y el tipo de material como se muestra en la Ecuación 4.

$$H_f = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

(Ecuación 4)

donde  $H_f$  son las pérdidas de presión calculadas por medio de la diferencia de alturas leídas entre piezómetros instalados en la tubería,  $f$  es el factor de fricción,  $l$  es la longitud de la tubería en la que se presenta la pérdida,  $d$  es el diámetro de la tubería,  $v$  es la velocidad del flujo y  $g$  es la aceleración de la gravedad, (Saldarriaga, 2007).

De la Ecuación 4, todos los parámetros son conocidos a excepción del factor de fricción, reordenando términos se tiene:

$$f = \frac{2 \cdot g \cdot d \cdot H_f}{l \cdot v^2}$$

(Ecuación 5)

Adicionalmente la rugosidad puede ser calculada por medio de la Ecuación 6.

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

(Ecuación 6)

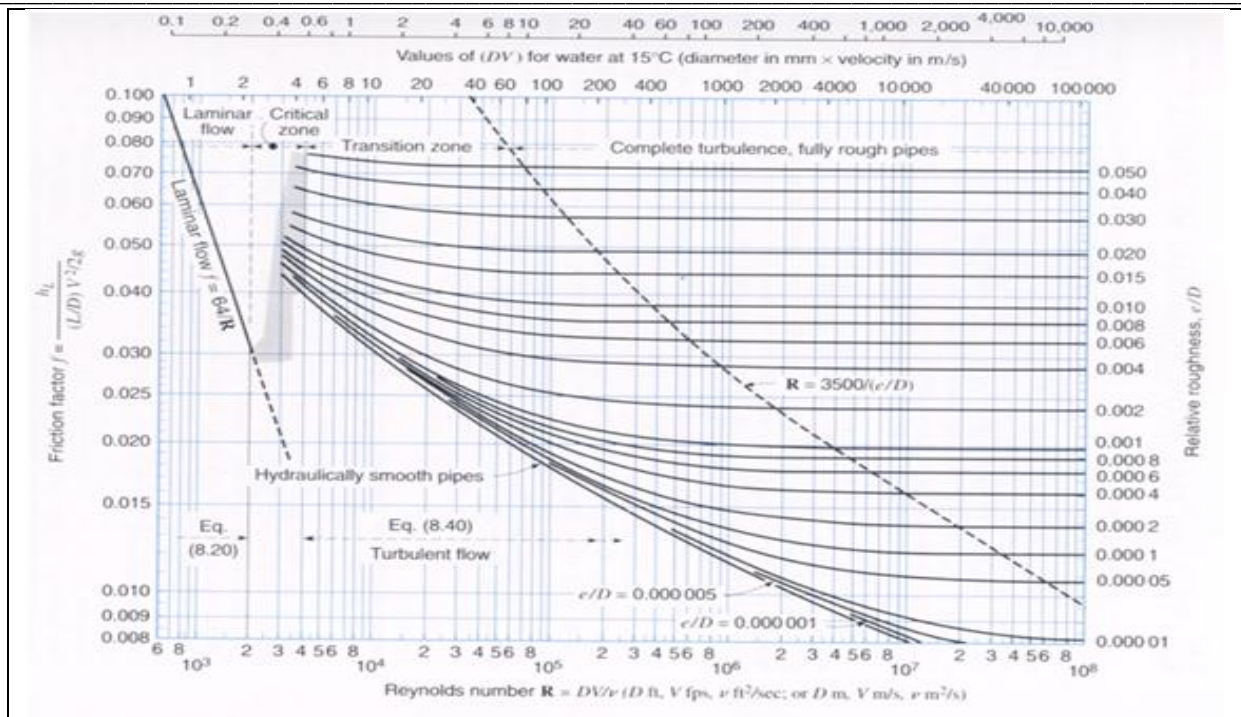
donde  $f$  es el factor de fricción,  $\text{Re}$  es el número de Reynolds y  $k_s/d$  es la rugosidad relativa de la tubería.

La Ecuación 6 es conocida como la forma implícita de Colebrook–White (1939) y se basa en los estudios realizados por Prandtl y von Karman de los cuales se estableció que para definir el factor de fricción en la zona de transición debían realizar una combinación entre las ecuaciones que describen el flujo liso (hallada con rugosidades absolutas igual a cero) y el rugoso (hallada con rugosidades exageradamente mayores a las comerciales), encontrando que el comportamiento se podía describir por medio de la ecuación anteriormente descrita.

### 2.2.3 Diagrama de Moody

El diagrama de Moody es el resultado de los estudios realizados por el ingeniero Lewis Moody en el año 1944 y es una manera gráfica de representar para cada tipo de flujo, la relación de las pérdidas por fricción para tuberías reales con la rugosidad relativa de la tubería y el número de Reynolds.

En la Gráfica 1 es posible apreciar lo que ocurre para cada una de las clasificaciones de flujo presentadas en la Tabla 5.



Gráfica 1. Diagrama de Moody. (Hernández, 2010).

Tal como se observa, cuando el flujo es laminar, el factor de fricción es dependiente únicamente del número de Reynolds y no se ve afectado por la rugosidad relativa.

En el proceso de transición, cuando el Reynolds es cercano a 2200 las curvas se aproximan asintóticamente al comportamiento del flujo hidráulicamente liso; a medida que el caudal se incrementa, las curvas dejan de ser función de Reynolds y pasan a ser dependientes de la rugosidad relativa únicamente.

Finalmente, cuando el flujo es completamente turbulento el factor de fricción es dependiente de la rugosidad relativa; ante esto es necesario recordar que la clasificación de régimen para flujo de agua en tuberías es mayoritariamente transicional.

---

### 2.2.4 Pérdidas menores

Las pérdidas menores asociadas con los accesorios del sistema como lo son reducciones, expansiones, codos y válvulas están descritas por la Ecuación 7:

$$\sum h_m = \left( \sum k_m \right) \frac{v^2}{2g}$$

(Ecuación 7)

donde:

$h_m$  = pérdidas menores.

$k_m$  = coeficiente de resistencia, que depende de los accesorios.

$v$  = velocidad.

En el presente estudio, las pérdidas no serán tenidas en cuenta en este caso por ser consideradas mucho más pequeñas que las generadas por la fricción en la longitud de tubería y debido a que no se cuenta con muchos accesorios en el modelo.

### 3. Descripción del modelo

Para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación, se construyó un montaje en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes.

Las diferentes vistas del modelo realizadas en AutoCad™ se presentan en las Figuras 5 y 6.

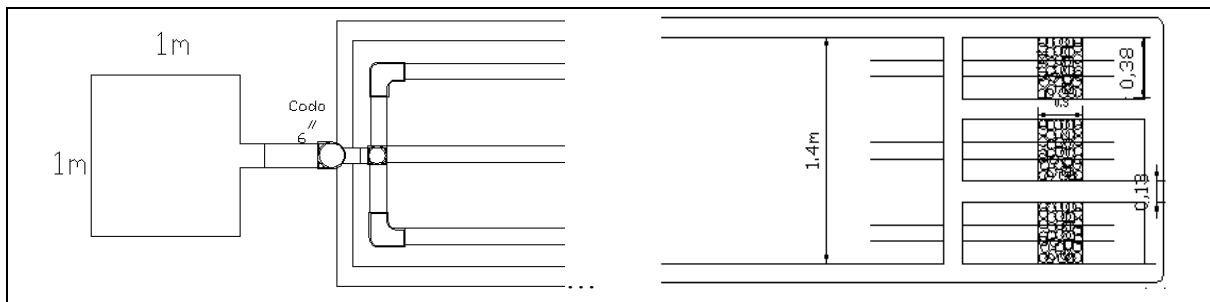


Figura 5. Vista superior del montaje.

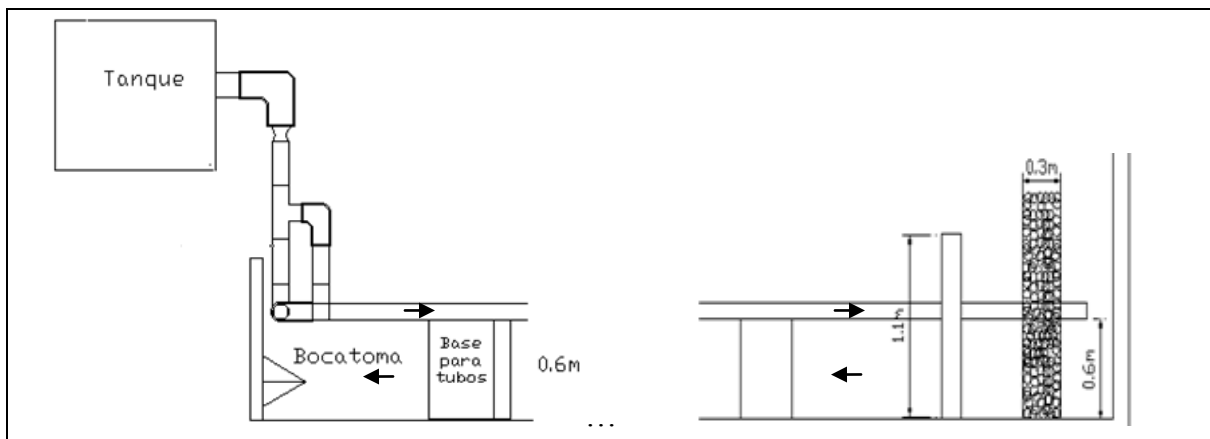


Figura 6. Vista lateral del montaje.

Tal como se indica en la Figura 6, el sistema de recirculación se logra por medio de la captación de agua por parte de la bocatoma ubicada en la parte izquierda del montaje. La dirección del agua está representada por la orientación de las flechas.

### 3.1 Proceso de construcción

El proceso de construcción del montaje inicia con la instalación de las estructuras disipadoras de energía, las cuales se colocan en cada uno de los canales donde se ubicarán los vertederos. Tal como se aprecia en la Figura 7, cada estructura está comprendida por una malla metálica en la cual se dispondrán piedras de río que servirán para disminuir la energía de llegada del agua desde la parte inicial del montaje.



Figura 7. Estructuras disipadoras de energía.

Como se muestra en la Figura 8, se instalan los vertederos triangulares en dirección normal al flujo y se pegan con silicona para evitar fugas de agua. Cada vertedero está construido con láminas de acrílico transparente con apertura de  $60^\circ$  debido a la facilidad y precisión que proporcionan en el análisis de datos.

Nota: En el Procedimiento experimental (Capítulo 4) será explicado el proceso de recolección de datos.



Figura 8. Instalación de Vertederos.

Posteriormente, se procede a pegar los accesorios que permitirán la alimentación desde el tanque de almacenamiento hacia cada una de las tuberías, la instalación de las válvulas por medio de niples y su ajuste con las secciones libres de tubería tal como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Ubicación de secciones libres de tubería.

Nota: La sección de tubería de polietileno no fue instalada debido a que estaba torcida formando un arco, razón por la cual fue necesario dejarla cerca de dos meses amarrada a estructuras resistentes para poder dejarla lo más recta posible e instalarla en el montaje, dicho inconveniente se puede observar en la Figura 10.

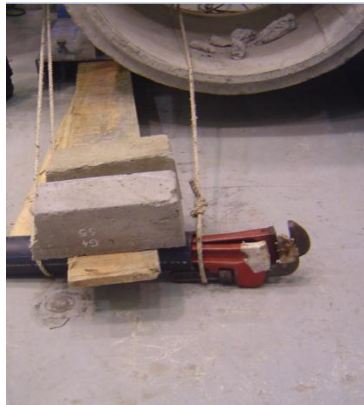


Figura 10. Adecuación de tubería de PE.

Para evaluar los aspectos microbiológicos cada tubería cuenta con 24 testigos de borde con dimensiones de 4 cm de ancho y 7 cm de largo y un testigo de cabeza de 10 cm de ancho y 10 cm de largo; estos se encuentran situados en la parte superior de la tubería como se observa en la Figura 11.



Figura 11. Corte de testigos.

Para la adecuación de testigos, se hizo necesario usar secciones de tubo o “sobre testigos” que permitieron el amarre a la tubería instalada, los cuales fueron sellados con neopreno y abrazaderas para evitar fugas y permitir su posterior extracción para evaluar el crecimiento de la biopelícula y el espesor generado con el paso del tiempo.



Finalmente, para analizar las pérdidas de presión provocadas por la presencia de los microorganismos y el cambio de la rugosidad de las paredes de la tubería, se instalan 10 piezómetros, 8 orientados a 45° del eje de cada tubo y 2 en la parte baja de los mismos.

Cada tubería es perforada tal como se presenta en la Figura 12.



Figura 12. Instalación de piezómetros.

Se realizan 4 perforaciones aguas arriba y 4 aguas abajo de la dirección del flujo (Ver Figura 13), la separación entre estos dos puntos en todos los casos es de 210 cm debido a las limitaciones de espacio.

Para concluir, se ubican las mangueras en cada perforación para permitir el flujo de agua por cada una de ellas y se procede a ajustarlas en un tablero piezométrico en el cual se leerán los cambios de altura de la columna de agua que representarán las pérdidas por rugosidad en la tubería tal como se aprecia en las Figuras 13 y 14.



Figura 13. Instalación de mangueras.



Figura 14. Tablero Piezométrico.

Para el caso de los piezómetros que se encuentran en la parte baja de cada tubería, la conexión se realiza directamente a un sensor diferencial de presión presentado en la Figura 15 donde se destaca por medio de flechas de color azul y rojo, la conexión del piezómetro que se encuentra aguas abajo y aguas arriba respectivamente. La lectura del cambio de presión reportada se presenta en mili bares (mbar); dicho valor es convertido a metros de columna de agua y comparado con las pérdidas de presión encontradas por medio de la lectura en el tablero piezométrico.



Figura 15. Sensor diferencial de presión y ubicación de piezómetros.

### 3.2 Proceso de recirculación

En la Figura 16 se puede observar la parte inicial del modelo donde se encuentra el tanque elevado, encargado de suministrar la altura piezométrica suficiente a cada tubería para generar los caudales y velocidades de interés del estudio; dicho tanque es alimentado gracias a la acción de una motobomba, cuando el tanque llega a determinada capacidad, rebosa, manteniendo un volumen constante, (Ver Figura 17).

Adicionalmente, se observa que la alimentación está regulada por la manipulación de tres válvulas tipo cortina de 4" (una para cada tubería).



Figura 16. Sección inicial del montaje

La parte media del modelo cuenta únicamente con secciones de tubería libre y dos soportes metálicos, los cuales permiten descansar los tubos que se encuentran elevados 60 cm del suelo a fin de permitir la captación de agua de la bomba (bocatoma) y establecer el sistema de recirculación por 8 horas para aproximar el estudio a lo que ocurre en un sistema de distribución de agua potable.

El largo total de la tubería es de 5 m en todos los casos (PVC, Acero y Polietileno).



Figura 17. Rebose de tanque elevado.

Por último, en la Figura 18 se observa la parte final del modelo donde se encuentran los vertederos triangulares, en los que se realiza el aforo del caudal y por medio de los cuales el agua retorna al tanque de almacenamiento para continuar con el proceso de recirculación.



Figura 18. Sección final del montaje.

---

Para promover el crecimiento de la biopelícula, el sistema es alimentado cada 8 días con pasto, el cual contiene carbono, nitrógeno y fósforo, nutrientes importantes para el desarrollo de microorganismos como se explicó anteriormente.

Para evitar el crecimiento de algas, se limita el proceso fotosintético manteniendo el laboratorio con el mínimo posible de luz.

### **3.3 Selección de velocidad de flujo**

A fin de determinar el efecto del material de las tuberías en el crecimiento de biopelículas, se espera que las condiciones en estas se mantengan similares para no generar variaciones que sean reflejadas en resultados alterados.

Para este caso, se establece una velocidad de 1 m/s para las tres tuberías, verificando que se garantice flujo turbulento y se observan los resultados.

El valor de velocidad se estableció teniendo en cuenta que a mayores velocidades es posible que la biopelícula se resuspenda haciendo más complejo su análisis debido a que no queda adherida a la superficie de la tubería; dicho evento se quiere descartar por completo (al menos en etapas tempranas).

## 4 Procedimiento Experimental

### 4.1 Calibración de vertederos

Para determinar el caudal que pasa por cada una de las tuberías es necesario realizar el proceso de calibración de cada uno de los vertederos registrando las alturas de la lámina de agua generada para cada caudal.

Las alturas serán leídas con ayuda de un limnómetro y los caudales serán reportados por un caudalímetro.

Se espera que el comportamiento tenga una tendencia potencial tal como se muestra en la Ecuación 7.

$$Q = CH^n$$

(Ecuación 7)

donde los valores de  $C$  y  $n$  se determinan por medio de los datos experimentales y su correspondiente ajuste potencial.

### 4.2 Recirculación diaria

El montaje propuesto fue construido de forma tal que fuera factible la recirculación diaria por 8 horas a fin de simular las condiciones presentes en un sistema de distribución de agua potable.

### 4.3 Determinación del volumen del sistema

En la determinación del volumen del sistema se tiene en cuenta:

El tanque de almacenamiento.

La piscina de almacenamiento del agua de recirculación.

Los vertederos.

Las tuberías.

A continuación se presentan los cálculos correspondientes para conocer el volumen total del sistema:

Para los tanques y vertederos:  $Vol = Alto * Ancho * Largo$

Para las tuberías:  $V = \frac{\pi * Diámetro^2}{4} * Largo$

De lo anterior es posible encontrar los resultados de las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Volumen en tanques y vertederos.

<b>Dimensión</b>	<b>Tanque elevado</b>	<b>Tanque de recirculación</b>	<b>Vertederos</b>
Alto[m]	0.83	0.60	1.16
Ancho [m]	1.60	1.40	0.38
Largo [m]	1.19	5.70	1.50
<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>1.58</b>	<b>4.79</b>	<b>1.96</b>

Tabla 8. Volumen en tuberías.

<b>Dimensiones</b>	<b>Tubería</b>
Diámetro [m]	0.1016
Longitud [m]	5
<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	<b>0.12</b>

Sumando los resultados de las Tablas 7 y 8 se tiene que el volumen total del sistema es de 8.4 m<sup>3</sup>.

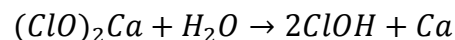
#### 4.4 Cloración del sistema

Nuevamente, a fin de mantener las condiciones del sistema lo más cerca posible a las encontradas en un sistema de distribución de agua potable, se requiere que la concentración de cloro residual en el sistema esté establecida tal como lo indica la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social, correspondiente a valores entre 0.3 y 2 mg/L.

En este caso y con base en investigaciones similares llevadas a cabo en la Universidad de los Andes, se establece que para este montaje se espera mantener el cloro residual un valor de 0.5 mg/L.

Para esto se utiliza hipoclorito de calcio granular HTH ya que en otras investigaciones ha presentado buen comportamiento y fácil disolución en agua, (Hernández, 2010).

Debido a que el hipoclorito de calcio es sólido, al agregar agua se produce la siguiente reacción:



de la cual es posible notar que por cada mol de hipoclorito de calcio  $(ClO)_2Ca$  (144g) se producen dos moles de Acido hipocloroso  $ClOH$  (52g) por lo tanto:

$$\frac{144g (ClO)_2Ca}{1 mol(ClO)_2Ca} * \frac{1 mol(ClO)_2C}{2 mol ClOH} * \frac{1 mol ClOH}{52 g ClOH} = 1.38 \frac{g (ClO)_2Ca}{g ClOH}$$

Teniendo en cuenta que el volumen de agua en el sistema es de 8.4 m<sup>3</sup> y la concentración de cloro residual establecida para mantener en el sistema será de 0.5 mg/L, se tiene:

$$8400L * 0,5 \frac{mg ClOH}{L} * \frac{1g ClOH}{1000mgClOH} = 4.2 g de ClOH$$



Por tanto:

$$4.2 \text{ g-ClOH} * 1.38 \frac{\text{g (ClO)}_2\text{Ca}}{\text{g-ClOH}} = 5.79 \text{ g (ClO)}_2\text{Ca}$$

La cantidad diaria que se debe alimentar al sistema será de 6 g aproximadamente.

Nota: En el proceso experimental se generará una curva de calibración de cloro para evaluar por cuánto tiempo los 6 g de hipoclorito de calcio garantiza una concentración remanente de cloro que cumpla con la legislación Colombiana.

#### 4.5 Alimentación del sistema

Para la determinación de la fuente de carbono que servirá como alimento al sistema se tuvo en cuenta cuáles podrían ser los contaminantes típicos de una red de distribución que contribuyen a la formación y crecimiento de biopelículas; encontrando que el agua que abastece las PTAP, está en permanente contacto con material orgánico vegetal, como hojas o arbustos, por lo cual contiene carbono orgánico que al no ser retirado en el proceso de tratamiento, servirá como alimento para contribuir al desarrollo de las biopelículas.

Por dicha razón, en este caso la alimentación al sistema se realizará por medio de *Pennisetum clandestinum* o pasto Kikuyo a fin de establecer las condiciones del modelo lo más cercanas posibles a las encontradas en un sistema de distribución de agua potable.

Los cálculos relacionados con la cantidad de materia orgánica que debe ser ingresada al sistema no se encuentran referenciados por otros autores por lo cual se alimentará cada ocho días promoviendo su distribución uniforme a lo largo de las tuberías, de la misma manera que se realizó en el montaje propuesto por (Hernández, 2010).

#### 4.6 Recolección de datos

El procedimiento para la toma de datos para cada una de las tuberías se presenta resumido en la Figura 19.

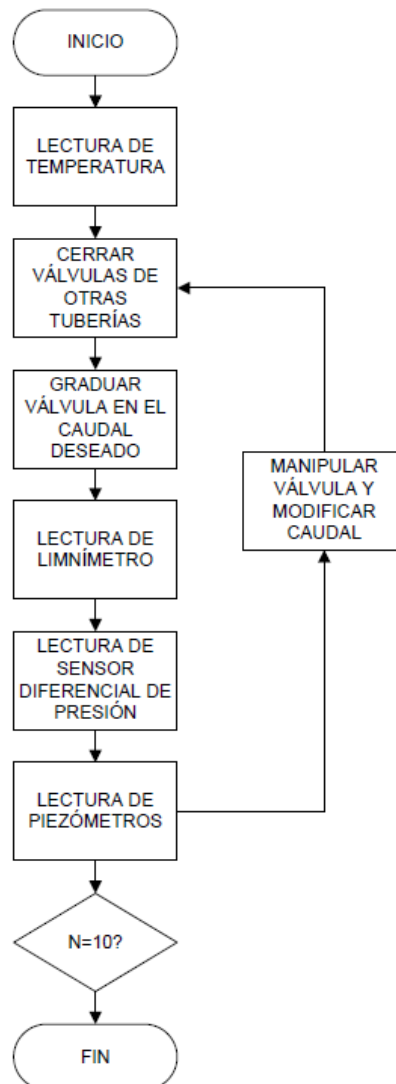


Figura 19. Proceso de toma de datos.

A continuación se muestra el formato de recolección de datos:

Fecha	n	dP sensor	Lectura Aguas arriba [cm]				Lectura Aguas abajo [cm]			
			P1 (High)	P2 (High)	P3 (High)	P4 (High)	P1 (Low)	P2 (Low)	P3 (Low)	P4 (Low)
	1									
T°	2									
	.									
	.									
Cloro (mg/L)	.									
	10									

Figura 20. Formato de recolección de datos.

Nota: En caso que se desee realizar análisis de testigos se debe apagar la recirculación del montaje y desocupar cada una de las tuberías, para posteriormente retirar abrazaderas y realizar el análisis microbiológico de los testigos.

#### 4.7 Manipulación de datos

La manipulación de datos para conocer el efecto hidráulico del crecimiento de biopelículas en cada una de las tuberías de manera gráfica por medio del análisis del diagrama de Moody se resume en la Figura 21.

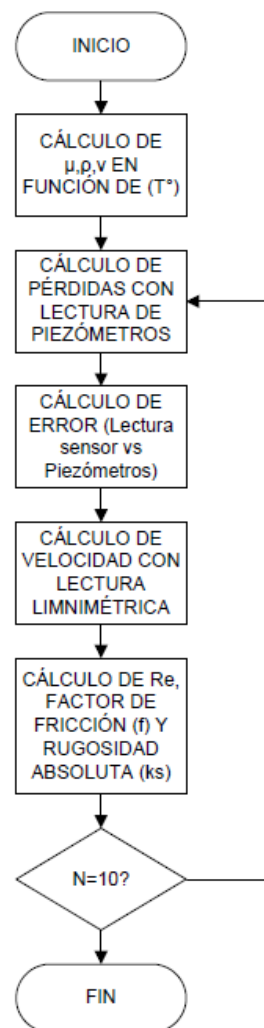


Figura 21. Proceso de manipulación de datos para analizar las pérdidas por fricción.

#### 4.7.1 Análisis Microbiológicos

Para analizar el desarrollo y formación de biopelícula se requiere la extracción de testigos, para determinar el espesor de la misma. En la Tabla 9 se muestran las ecuaciones necesarias para determinar cualitativamente el desarrollo de la biopelícula tal como ha sido calculado por otros autores, (Hernández, 2010).

Tabla 9. Ecuaciones para determinar el desarrollo de la biopelícula.

Testigos de Centro	
Espesor promedio ( $\bar{E}$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	$\bar{E} = \frac{\text{Espesor}_{i+1} + \text{Espesor}_{i+2}}{2}$ $\text{Biomasa}_{i+1} = \left( \frac{\text{Peso}_{i+1} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A} \right) \cdot 10^9$ $\text{Biomasa}_{i+2} = \left( \frac{\text{Peso}_{i+2} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A} \right) \cdot 10^9$
Testigos de borde	
Velocidad inicial ( $\text{Vel}_0$ ) [ $\mu\text{m}/\text{día}$ ]	$\text{Vel}_0 = \frac{\text{Espesor}_0}{\text{N}^\circ \text{ de días}}$
Velocidad de desarrollo ( $\text{Vel}$ ) [ $\mu\text{m}/\text{día}$ ]	$\text{Vel} = \frac{(E_{j+1} - E_j)}{\Delta \text{ días}}$
Espesor Máximo ( $E_{\text{máx}}$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	$E_{\text{máx}} = \frac{\text{Peso}_{\text{final}} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A}$

donde:

$\text{Espesor}_{i+1}$  : corresponde al espesor del testigo impar.

---

Espesor<sub>*i+2*</sub> : corresponde al testigo par o vecino.

$A [m^2]$ : es el área de la testigo, obtenida al multiplicar el largo por el ancho del mismo.

$Peso_0 [g]$ : es el peso del testigo inicial, es decir sin el crecimiento de biopelícula. (Ver Anexo 1.)

$Peso_{final} [g]$ : Corresponde a la última medición del peso realizada en el proceso de toma de datos del proyecto.

$E_j$ : es el espesor de la biopelícula según los datos encontrados en la última medición

$E_{j+1}$ : es el espesor de la biopelícula encontrado en la medición actual.

$\Delta$  días: es la diferencia de días entre  $j+1$  y  $j$  que se recomienda sea 7.

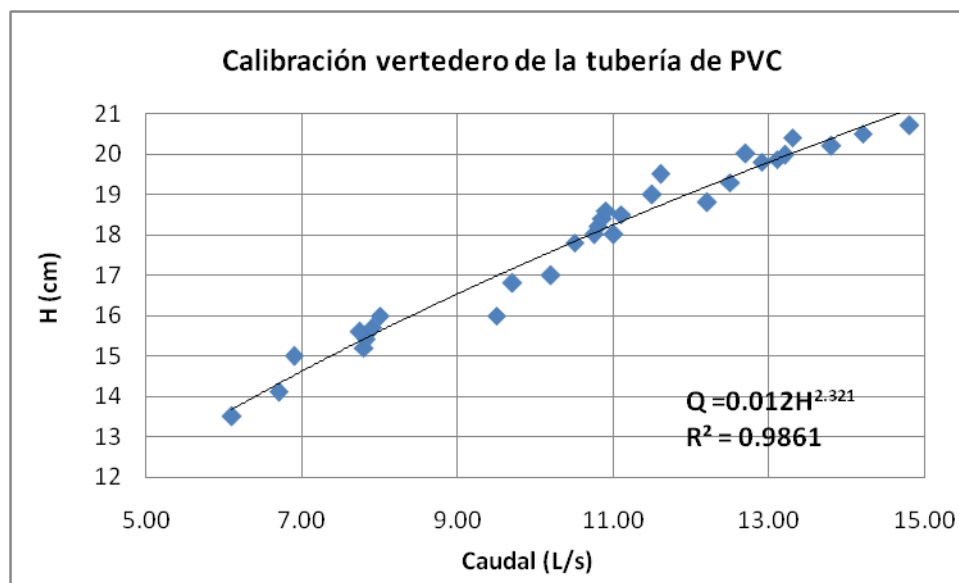
## 5 Resultados y discusión

### 5.1 Calibración de vertederos.

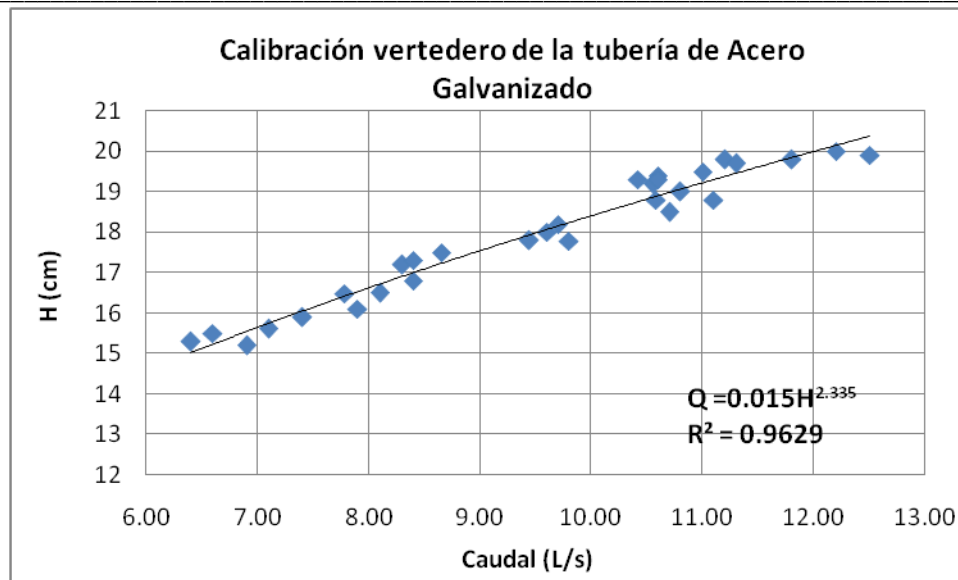
El caudal y por tanto la velocidad constituyen uno de los aspectos más importantes para el análisis hidráulico ya que con estos se podrán evaluar las pérdidas provocadas por la fricción presente en las tuberías.

Para el aforo de cada uno de los verederos se procede tal como se indico previamente en la Figura 21, de dicho procedimiento se obtiene la curva de calibración de cada uno de los vertederos en función de la altura de la cresta de agua formada por encima del mismo. Las ecuaciones encontradas servirán para calcular el caudal que pasa por cada una de las tuberías.

Tal como se indica en las Gráficas 2 y 3, de la regresión potencial de los datos es posible encontrar los valores de C y n de la Ecuación 7.



Gráfica 2. Curva de calibración del vertedero de la tubería de PVC.



Gráfica 3. Curva de calibración del vertedero de la tubería de Acero Galvanizado.

Los resultados de las gráficas anteriores se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados calibración de vertederos

Vertedero	$H_o$ (cm)	Ecuación de $Q$ (L/s), $H_L$ (cm)	Rango de velocidades (m/s)
Tubería de PVC	16.89	$Q = 0.0127 (H_L - H_o)^{2.3211}$	0.68-1.83
Tubería de Acero Galvanizado	16.92	$Q = 0.015 (H_L - H_o)^{2.2335}$	0.82-1.54

Es necesario resaltar que la aplicación de las ecuaciones presentadas en la Tabla 10, están sujetas al rango de velocidades indicado, por tanto en caso que el estudio del efecto hidráulico por crecimiento de biopelículas en tuberías requiera cambiar la velocidad del agua, (por ejemplo en caso que se desee el desprendimiento de la biopelícula) será necesario realizar nuevamente la calibración de los vertederos para el nuevo rango de velocidades.

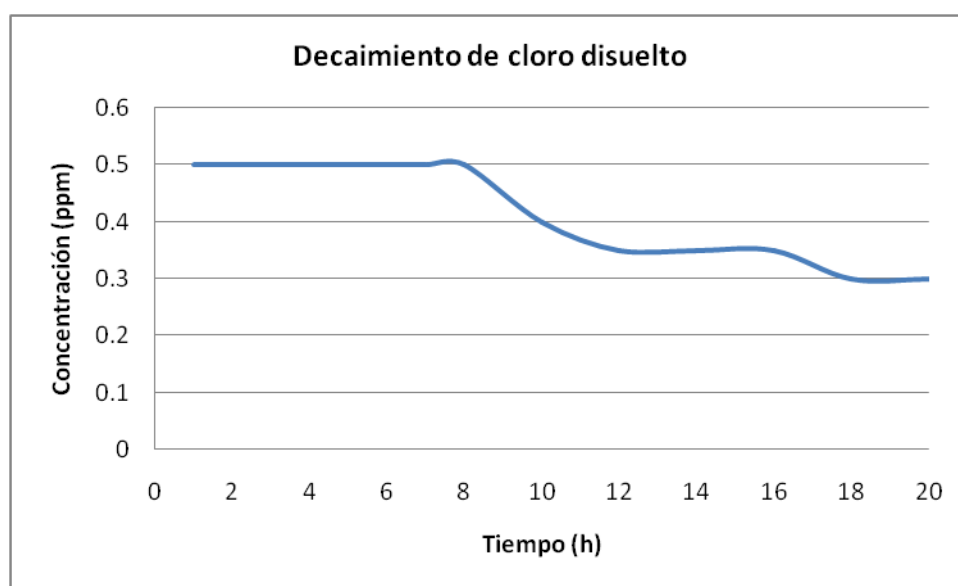
Con los valores anteriores es posible realizar las mediciones necesarias para el cálculo de las pérdidas por fricción en las tuberías.



## 5.2 Curva de calibración de cloro.

Para conocer si la dosis de cloro ingresado al sistema y calculado en la Sección 4.4 es suficiente y permanece por lo menos por un día, se realiza una calibración de la concentración de cloro disuelto en el agua para un periodo de 20 horas.

Para esto se monitorea cada hora la concentración de cloro de una muestra de agua del sistema, encontrando los resultados de la Gráfica 4.



Gráfica 4. Decaimiento de cloro.

Tal como se observa en la Gráfica 4, luego de agregar 6 g de Hipoclorito de Calcio al sistema, se obtiene una concentración de cloro de 0.5 mg/L que permanece por ocho horas.

Después de este tiempo, el cloro remanente permanece en una concentración de 0.35 hasta que después de 20 horas llega a un valor de 0.3 mg/L. Los resultados anteriores indican que para simular el comportamiento en una red de distribución de agua potable, es necesario clorar diariamente el sistema con la cantidad indicada anteriormente.

De no realizar este procedimiento, no se cumpliría la concentración de cloro remanente según lo establecido por la regulación legal, lo que desencadenaría un aumento en el crecimiento de los microorganismos y formación acelerada de biopelícula.

---

### 5.3 Pérdidas por fricción y análisis gráfico por medio del Diagrama de Moody.

#### 5.3.1 Rugosidad de las tuberías limpias.

Antes de iniciar con el análisis del efecto hidráulico de la formación de biopelículas en tuberías, se establecerá la rugosidad de las mismas en el momento de arranque del montaje. Este proceso se realiza a fin de evaluar la evolución de la colonización y desarrollo de la biopelícula comparado con el estado inicial de las tuberías.

Para esto se llena el montaje con agua limpia y se permite la recirculación, se recolectan 10 datos de altura limnimétrica y se lee en el tablero piezométrico el cambio de altura que refleja las pérdidas de presión entre el punto aguas arriba y aguas abajo, procedimiento que se encuentra detallado en la Figura 19.

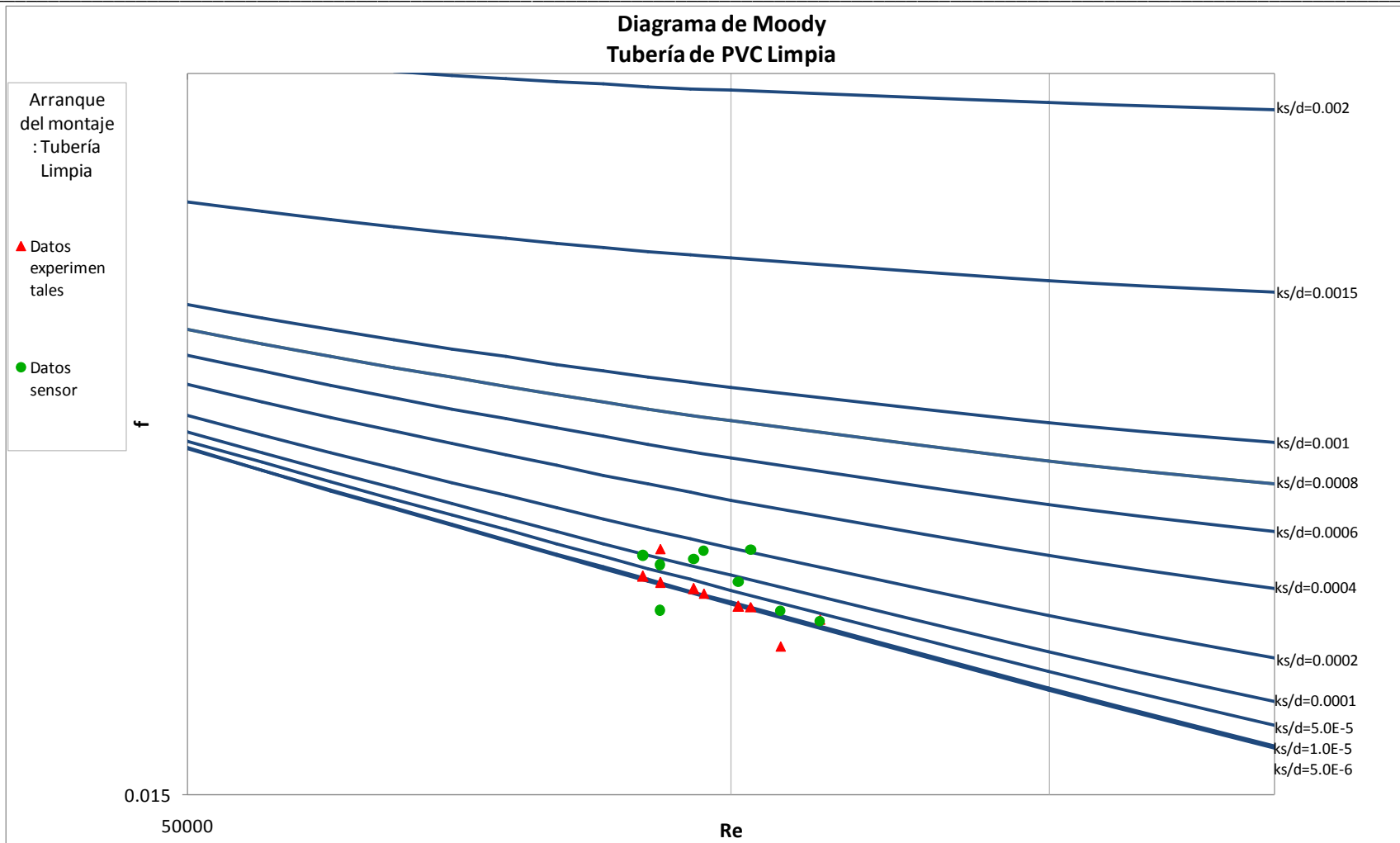
Los datos encontrados pueden ser analizados por medio de la representación gráfica del Diagrama de Moody que se muestra en las Gráficas 5 y 6 para el PVC y el acero galvanizado respectivamente.

En estas, se presenta de manera comparativa los resultados experimentales encontrados al realizar la lectura piezométrica de la pérdida de presión frente a los datos arrojados por el sensor diferencial de presión luego de ser manipulados como se indica en la Figura 21.

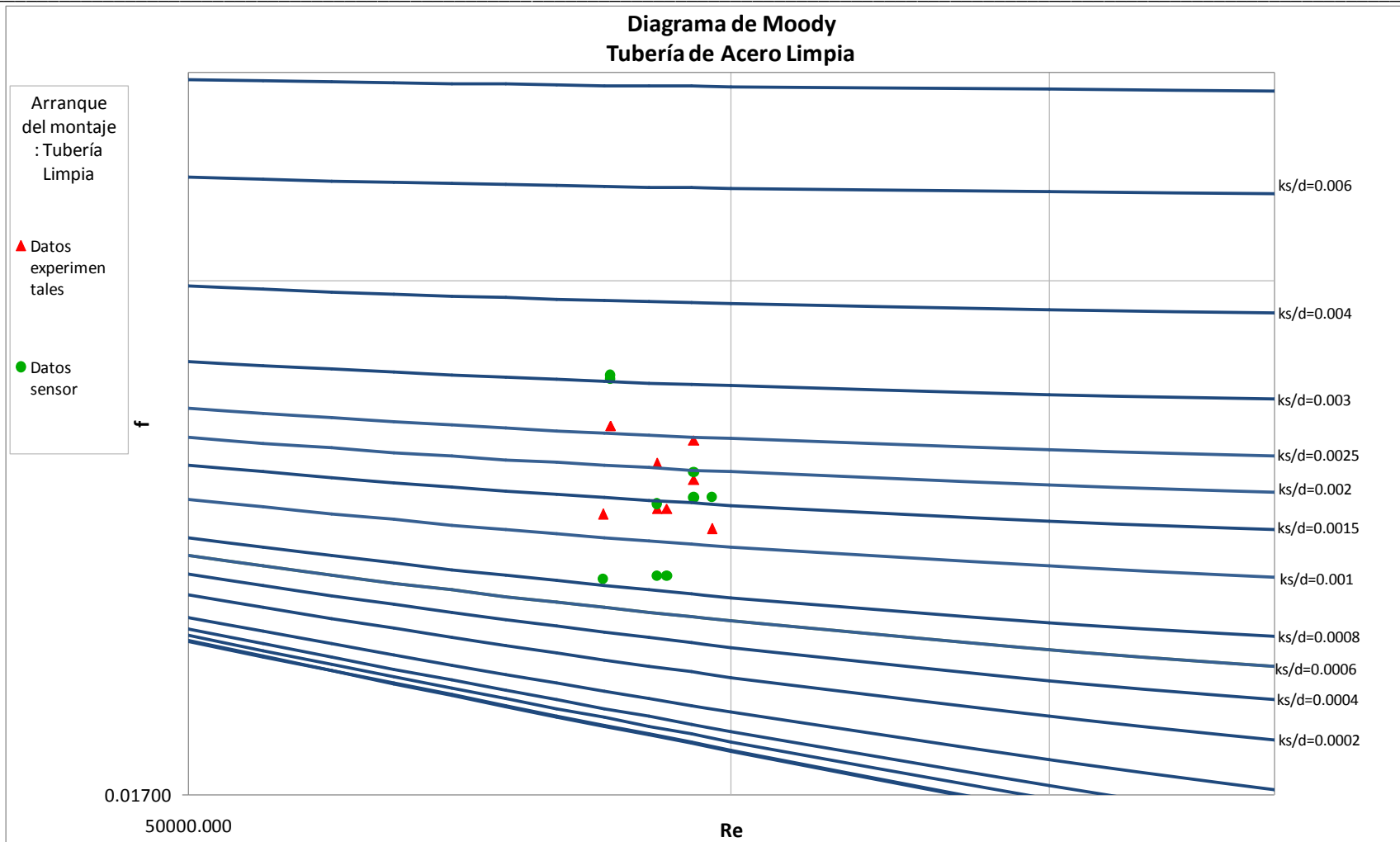
Como se puede observar en la Gráfica 5, aunque existe variación en el comportamiento de los datos, estos se localizan en un rango de rugosidad relativa entre  $5E-6$  y  $1E-5$  con un porcentaje de error máximo de 5.3% comparado con los datos hallados por medio del sensor.

De manera similar, en la Gráfica 6 es posible notar que los datos experimentales ubican la rugosidad relativa de la tubería de acero galvanizado entre 0.0015 y 0.0025 con un error máximo de 9% frente a los resultados encontrados por medio el sensor.

Adicionalmente los resultados de las Gráficas 5 y 6 pueden ser contrastados frente a los valores teóricos de rugosidad de los materiales de los que están construidas las tuberías.



Gráfica 5. Determinación experimental de  $k_s$  para la tubería de PVC.



Gráfica 6. Determinación experimental de  $k_s$  para la tubería de Acero.

Tal como se observa en la Tabla 11, el RAS presenta para diferentes materiales el valor de la rugosidad absoluta.

Tabla 11. Rugosidad absoluta de materiales (RAS, 2000)

Material	Rugosidad absoluta $k_s$ (mm)
Acero bridado	0.9-9
Acero comercial	0.45
Acero galvanizado	0.15
Concreto	0.3-3
Concreto bituminoso	0.25
CCP	0.12
Hierro forjado	0.06
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil (1)	0.25
Hierro galvanizado	0.15
Hierro dulce asfaltado	0.12
GRP	0.030
Poliétileno	0.007
PVC	0.0015

(1) cuando la tubería de hierro dúctil esté revestida internamente, se debe tomar el valor de rugosidad absoluta del material de revestimiento.

Para este caso la rugosidad absoluta promedio de las tuberías limpias se presenta en la Tabla 12 con el porcentaje de error comparado con el valor de la rugosidad presentado por el RAS.

Tabla 12. Comparación de rugosidad absoluta

Material	Rugosidad absoluta		Error
	Experimental	Teórica	
PVC	0.00182	0.0015	21.1%
Acero Galvanizado	0.199	0.15	32.5%

Al comparar los resultados encontrados experimentalmente con los teóricos, es posible notar que se presenta un error de 21.09% para el PVC y de 32% para el acero galvanizado, los cuales pueden estar asociados posiblemente con la acumulación de error en el proceso de cálculo de la rugosidad, desde la lectura limnimétrica y piezométrica, hasta el error debido a la aproximación de datos en las ecuaciones utilizadas para el cálculo.

De manera similar, se puede establecer que el acero galvanizado presenta un error mayor, relacionado probablemente con la naturaleza de sus paredes internas, que tienen protuberancias que pueden afectar su rugosidad significativamente, caso muy diferente al encontrado con la tubería de PVC en la que sus paredes se encuentran uniformemente distribuidas sin protuberancias relevantes observables.

Los valores anteriores servirán como referencia para evaluar la evolución del factor de fricción y la rugosidad a medida que se genera el crecimiento de la biopelícula.

### 5.3.2 Comportamiento durante recirculación y efecto del desarrollo de la biopelícula sobre el factor de fricción de Darcy Weisbach

A continuación se muestran las gráficas del Diagrama de Moody para las tuberías de PVC y acero galvanizado correspondientes al análisis de datos recolectados durante 15 días de recirculación, donde se tomaron mediciones cada cuatro días.

En la Gráfica 7 es posible notar que para el caso del PVC el comportamiento del factor de fricción y la rugosidad relativa tienden a aumentar a medida que va pasando el tiempo y que con los datos encontrados los valores de  $k_s/d$  no han estado por encima de 0.0004.

Adicionalmente, conocido el espesor de la subcapa laminar  $\delta'$  se puede encontrar que desde el día cero hasta el día 15, el régimen de flujo ha pasado de ser turbulento hidráulicamente liso a comportarse como flujo turbulento de transición, lo que puede indicar que probablemente se ha comenzado el proceso de colonización de la biopelícula en las paredes de la tubería.

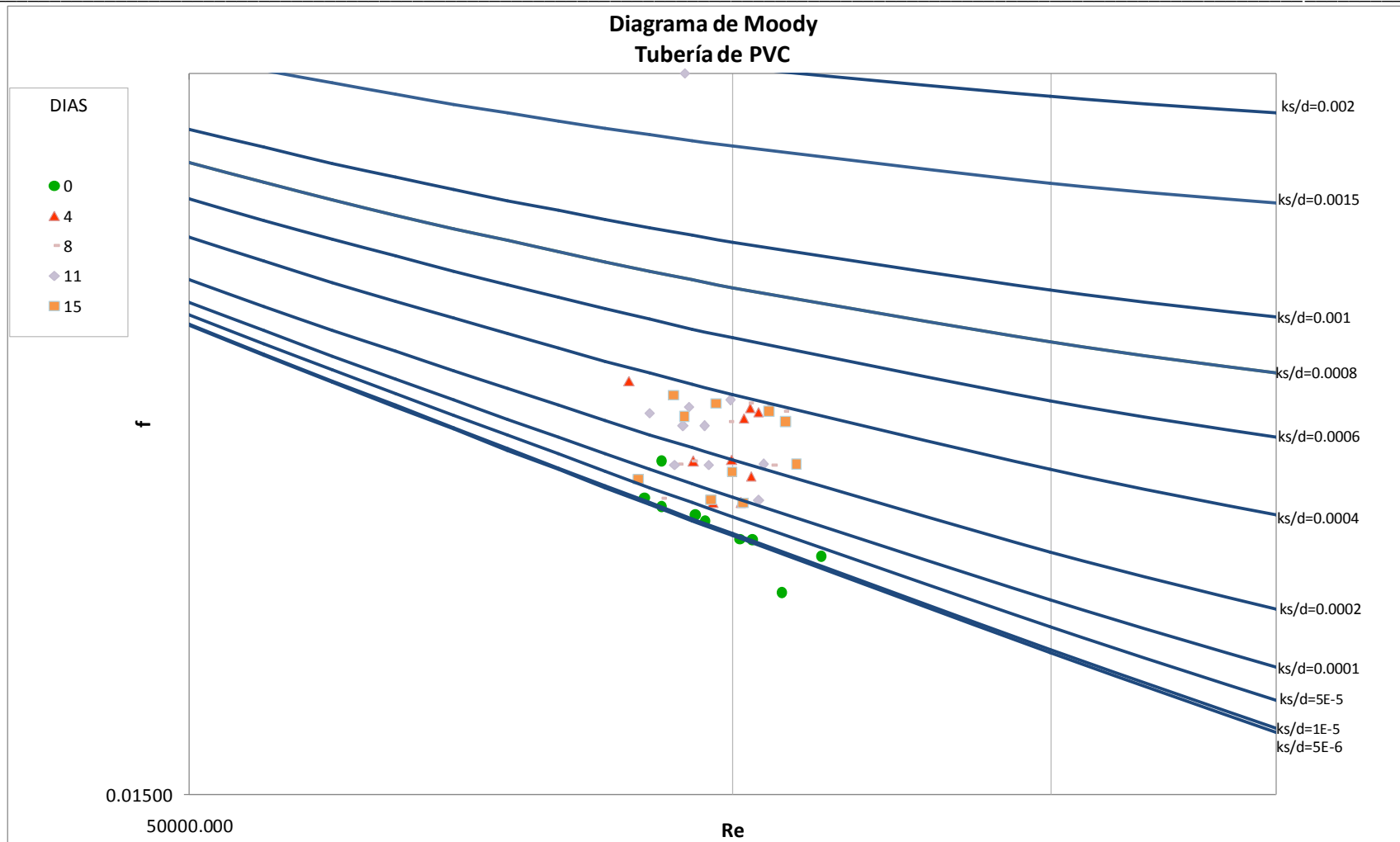
Ante esto será necesario esperar a que la recirculación continúe y la biopelícula se desarrolle completamente, para observar si luego de esto se presenta alguna tendencia más clara, ya que la recirculación sólo se ha producido por 15 días.

De manera similar, el comportamiento de los datos recolectados en la tubería de acero galvanizado se encuentra representados en el Diagrama de Moody de la Gráfica 8.

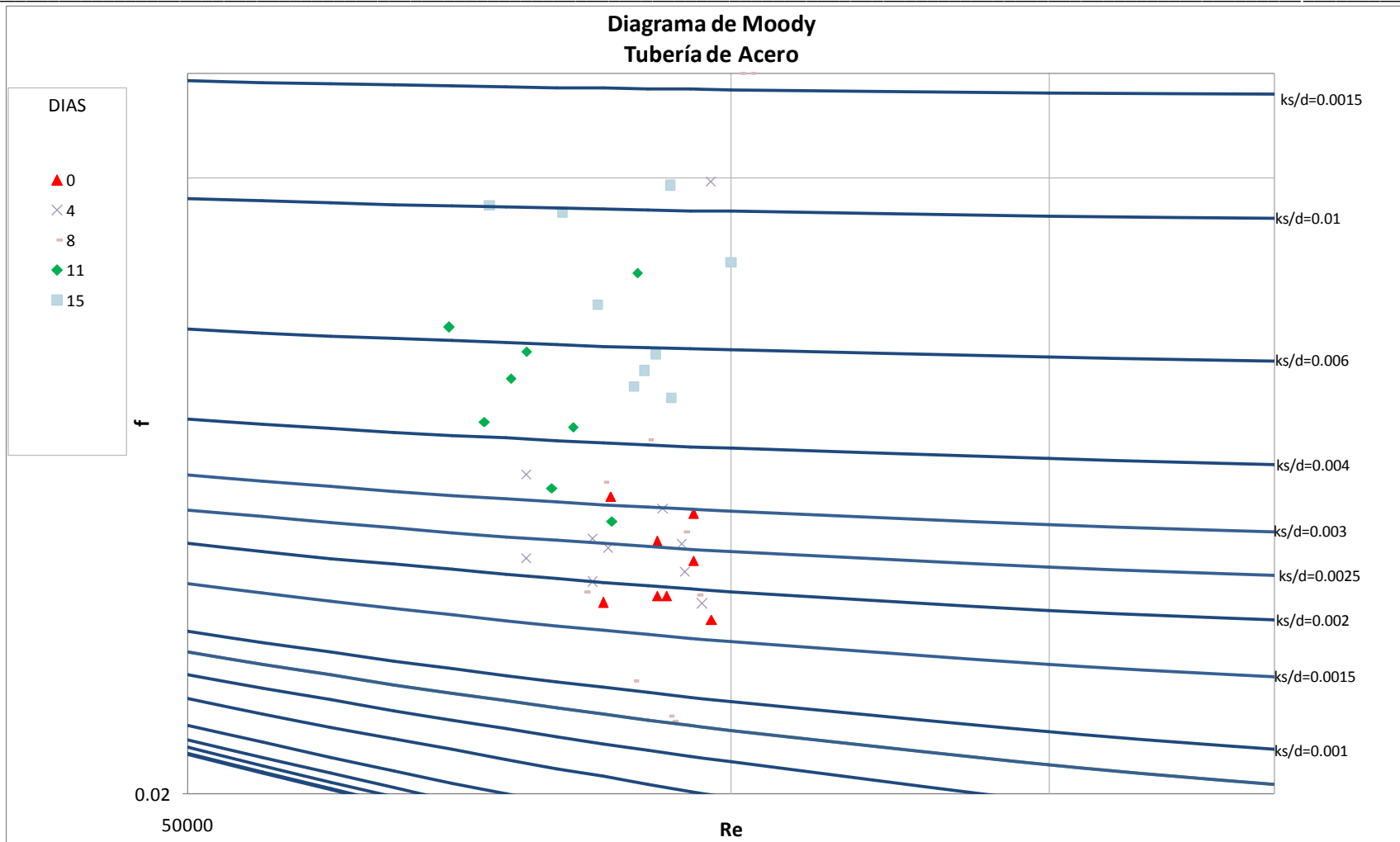
Los datos presentados, demuestran un comportamiento similar al encontrado en la tubería de PVC, pues se observa que los datos tiene una tendencia a aumentar a medida que pasa el tiempo.

En este caso, la máxima rugosidad relativa alcanzada durante el tiempo de recirculación se encuentra alrededor de 0.01 pero la mayor densidad de datos se encuentra cerca a valores de  $k_s/d$  de 0.006.

Adicionalmente, para la tubería de acero galvanizado no se puede comparar el cambio de régimen de flujo por medio de la subcapa laminar, pues desde el arranque del sistema, se contaba con flujo turbulento hidráulicamente rugoso.



Gráfica 7. Comportamiento del crecimiento de biopelícula en la tubería de PVC.



Gráfica 8. Comportamiento del crecimiento de biopelícula en la tubería de Acero



#### 5.4 Aspectos Microbiológicos.

Los resultados de los aspectos microbiológicos no pudieron ser estudiados debido a que el tiempo de recirculación no fue suficiente para permitir la colonización y crecimiento de la biopelícula en las paredes de la tubería.

Aun así, los resultados esperados están orientados a la comparación y análisis de los valores de la rugosidad absoluta  $k_s$ , el espesor de la biopelícula  $E_i$  y el espesor de la subcapa laminar viscosa  $\delta'$  y su relación con el sustrato ingresado al sistema y el desarrollo de la biopelícula en las paredes de las tuberías.

Para determinar si el crecimiento de la biopelícula afecta significativamente la rugosidad de las paredes de la tubería, será necesario registrar los cambios en el tiempo del  $k_s$  y de la subcapa laminar como se presentó anteriormente, como también registrar el peso de los testigos para conocer con base en el peso inicial del testigo, el espesor de la biopelícula, tal como se presentó en la Figura 22.

Ante esto, tal como se presenta Hernández (2010), en su proyecto de grado: “Modelación de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico biodegradable” el principal efecto hidráulico de la biopelícula en las tuberías de distribución de agua potable es el aumento del valor de coeficiente de rugosidad absoluta, donde la magnitud del aumento depende de la velocidad del flujo en la tubería, que en este caso se mantuvo constante en las dos tuberías para determinar el efecto del material de la tubería.

De los resultados encontrados con los pocos días de recirculación, es posible inferir que el desarrollo de la biopelícula será más acelerado para el caso de la tubería de acero galvanizado que para el PVC. Este efecto puede deberse a que las protuberancias e irregularidades de las paredes de la tubería de acero promueven el establecimiento de las biopelículas en dichos lugares para su posterior crecimiento, generando un micro ambiente con las condiciones apropiadas, (aisladas de la turbulencia del flujo y protegidas del cloro que no alcanza a llegar a dichos lugares) estableciendo un lugar en el que su desarrollo es óptimo.

---

## 6. Conclusiones

- La formación de biopelículas en los sistemas de distribución de agua potable puede ser limitada minimizando la entrada de materia orgánica biodegradable a la red de distribución y manteniendo la concentración de cloro en los niveles establecidos en la legislación Colombiana.
- Fue posible determinar por medio de trabajo en el laboratorio y de datos experimentales, la rugosidad en tuberías construidas en PVC y acero galvanizado, encontrando resultados que se acercan a los teóricos con un porcentaje de errores tolerable. Las diferencias encontradas pueden estar asociadas probablemente con la acumulación de error debido a las lecturas limnimétricas y piezométricas por parte del observador y/o a errores de redondeo en el procedimiento de cálculo.
- A fin de establecer el cambio en el factor de fricción y la rugosidad en las tuberías debido al crecimiento de biopelícula, es necesario continuar con la recolección y análisis de datos, ya que como lo comenta (Gamarra, 2005), es a partir del día 60 de recirculación que se puede establecer una tendencia del factor de fricción debido al establecimiento de la biopelícula en las paredes de la tubería.  
A pesar de esto, con los datos encontrados es posible notar que el crecimiento de la biopelícula será más acelerado en la tubería de acero galvanizado que en la tubería de PVC, confirmando que el tipo de material de las tuberías es un factor relevante para promover el desarrollo de la biopelícula.

---

## 7. Recomendaciones

Se recomienda que para los casos en los que el montaje cuente con tuberías de polietileno, la tubería no se encuentre doblada, ya que el proceso de desdoble es bastante complicado por lo que este material cuenta con una rigidez elevada.

Adicionalmente, es deseable continuar con la alimentación de pasto al sistema para promover el crecimiento de la biopelícula ya que con los trabajos de otros autores, se ha encontrado que el crecimiento de la biopelícula está altamente afectado por la disponibilidad de nutrientes en el agua.

De la misma manera, se recomienda cumplir con la adición de cloro diaria al sistema para generar las condiciones lo más cercanas a un sistema de distribución de agua potable. En este caso, no es posible evitar la cloración diaria ya que al adicionar mayores cantidades de cloro, además de desviar las condiciones con las estipuladas legalmente para un sistema de acueducto, también se podrían estar viendo comprometidos los microorganismos pues podrían estar muriendo debido al exceso de este compuesto químico.

## 8. Anexos

### Anexo 1. Peso inicial de testigos

Tabla 13. Peso inicial de testigos.

No testigo	Tubería Acero	Tubería PVC
1	95.632	36.180
2	96.770	36.514
3	89.509	36.607
4	91.693	37.098
5	91.413	36.112
6	96.745	36.710
7	91.575	36.057
8	99.734	37.317
9	88.765	37.678
10	90.751	37.324
11	89.537	37.360
12	91.718	36.786
13	90.676	36.816
14	94.378	37.039
15	89.813	36.893
16	89.484	37.222
17	87.121	37.987
18	92.161	38.118
19	90.492	36.889
20	98.256	36.987
21	89.984	36.668
22	98.340	36.069
23	86.457	33.868
24	94.830	36.653
T.Cabeza	223.420	76.606

## 9. Bibliografía

A. Camper, M. B. (1999). Development and structure of drinking water biofilms and techniques for their study. *Journal of Applied Microbiology Symposium Supplement* , 1s-12s.

Ávila, H., & Clavijo, W. Renovación y rehabilitación de redes de distribución de agua potable y de alcantarillado. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.

CIACUA. (2009). *Investigación sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas en las redes matrices de acueducto*. Bogota.

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

Dolan, R. (2002). Biofilms: Microbial life on surfaces: Biofilm structure. *Emerging Infectious Diseases* .

Donoso, A. (2009). *Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable*. Bogotá.

Dunling Wang, R. C. (2010). Bacteriological challenges to asbestos cement water distribution pipelines. *Journal of environmental sciences* , 1203-1208.

Francisco, M. L. (s.f). Velocidad de desprendimiento de la biopelícula en tuberías de distribución de agua potable. Bogotá: Universidad de los Andes.

Gamarra, A. V. (2005). *Influencia de los materiales de las tuberías en el crecimiento de biopelículas en las redes de distribución de agua a presión*. Bogotá.

Hernández, M. X. (2010). *Modelación de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico biodegradable*. Bogota.

Huq Anwar, W. A (2008). Biofilm in water, its role and impact in human disease transmission. *Current Opinion in Biotechnology*. Elsevier.

J Chandy, M. A. (2001). Determination of nutrients limiting biofilm formation and the subsequent impact on disinfectant decay. *Water Research* , 2677-2682.

Keinanen, M. (2006). Functions of drinking water pipe materials, reason or result of water quality? *8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*. Cincinnati .

---

Lethola Markku J.,L. M. (2006). The effects of changing water flow velocity in formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes. *Science Direct*. Kuopio: Elsevier.

Martin Francis Lambert, R. W. (2009). The Impact of Biofilm Development on Pipe Roughness and Velocity Profile. *World Environmental and Water Resources Congress 2009* . Great Rivers: ASCE.

Niquette Patrick, P. S. (2000). Impacts of pipe materials on densities of fixed bacterial biomass in a drinking water distribution system. *Water Research* , 1951-1956.

Reynolds, K. (s.f.). La vida en el sistema de distribución: Monitoreando los potenciales de formación de biopelículas. *Agua Latinoamerica* .

Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías: abastecimiento de aguas, redes, riegos*. Bogotá: Alfaomega.

Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías: abastecimiento de aguas, redes, riegos*. Bogotá: AlfaOmega.

Zsuzsa Ludmany, M. B. (2006). Evaluation of biofilms occurring in drinking distribution systems of Balantofured. *Chemicals as intentional and accidental global environmental threats* , 501-507.