

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y
Ambiental

Centro de Investigaciones en
Acueductos y Alcantarillados
CIACUA



Universidad
de los Andes

PAVCO S.A.
Una empresa AMANCO



CÁTEDRA PAVCO

**Comportamiento de Biopelículas luego de Lavados
Sucesivos en Tuberías de Agua a Presión**

**Tesis desarrollada por: Paula Reyes del Toro
(Postgrado en Ingeniería Civil)**

Bogotá, Julio de 2005

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2.2.1	Tesis de Pregrado.....	2
2.2.2	Tesis 1	2
2.2.3	Tesis 2	3
3	JUSTIFICACIÓN	4
4	ANTECEDENTES.....	5
4.1	TESIS DE ESTADO DEL ARTE	5
4.2	MONTAJES FÍSICOS.....	6
5	BIOPELÍCULAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN	9
5.1	GENERALIDADES	9
5.2	PROCESO DE FORMACIÓN	10
5.3	PROCESO DE DESPRENDIMIENTO	12
5.3.1	Mecanismos de Desprendimiento.....	13
5.3.2	Causas del Desprendimiento de Biopelículas	14
5.4	MEDIOS DE CONTROL.....	20
5.4.1	Planta de Tratamiento	20
5.4.2	Desinfectante Residual.....	21
5.4.3	Flushing.....	22
6	HIDRÁULICA DE TUBERÍAS	27
6.1	TIPOS DE FLUJO.....	27
6.2	INTERACCIÓN FLUJO – PARED SÓLIDA.....	28
6.3	CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA.....	30
6.3.1	Pérdidas por Fricción	30
6.3.2	Diagrama de Moody	31
6.3.3	Pérdidas Menores.....	33
7	MONTAJE FÍSICO.....	34
7.1	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE	36
7.1.1	Descripción General.....	36
7.1.2	Medición de la Velocidad de Flujo	37
7.1.3	Medición de las Pérdidas de Energía.....	39
7.1.4	Medición del Crecimiento de Biopelículas	40
7.2	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	46
7.2.1	Período de pruebas.....	46
7.2.2	Medición de los Diferentes Parámetros	47
8	RESULTADOS.....	53
8.1	EVOLUCIÓN DE LA BIOPELÍCULA EN EL TIEMPO	53
8.2	VARIACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA	58
8.2.1	Pérdidas Menores.....	58
8.2.2	Pérdidas por fricción	65
8.3	EFICIENCIA DE LOS LAVADOS	75
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
9.1	Con respecto al montaje.....	79

9.2	Con respecto al crecimiento de la biopelícula en el tiempo.....	79
9.3	Con respecto al comportamiento de las pérdidas de energía	81
9.4	Con respecto a la influencia del diámetro y material de las tuberías en los resultados obtenidos	82
9.5	Con respecto al lavado como control de la biopelícula.	82
9.6	Con respecto a la velocidad de regeneración de la biopelícula.....	83
10	BIBLIOGRAFÍA	84
11	ANEXOS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1 Vertederos del montaje anterior con presencia de algas	6
Figura 4-2 Testigos del proyecto de grado anterior	7
Figura 5-1 Proceso de adhesión de bacterias. Fuente: www.edstrom.com.....	10
Figura 5-2 Distribución de esfuerzos en las biopelículas simuladas	15
Figura 5-3 Desarrollo de la biopelícula en tres fases	17
Figura 5-4 Simulación de sólidos suspendidos	18
Figura 5-5 Cambios en la forma de la biopelícula como función de τ_w . Stoodley <i>et al.</i>	18
Figura 5-6 Lavado convencional. Tomado de: www.epcor.ca.....	23
Figura 5-7 Lavado Unidireccional. Tomado de: www.epcor.ca	24
Figura 6-1 Flujos Laminar y Turbulento en Tuberías.....	28
Figura 6-2 Capa Límite	28
Figura 6-3 Flujos hidráulicamente liso y rugoso	29
Figura 6-4 Diagrama de Moody	32
Figura 7-1 Modelación de biomasa adherida luego de lavados sucesivos.....	35
Figura 7-2 Esquema general del montaje.....	36
Figura 7-3 Tuberías del Montaje	37
Figura 7-4 Aguja Limnimétrica	38
Figura 7-5 Instrumentación de la unión de 4"	39
Figura 7-6 Tablero de medición de piezómetros	40
Figura 7-7 Soportes de los testigos para las cuatro tuberías.....	41
Figura 7-8 Localización de los testigos en el montaje. Muestreador Biaxial de 4"	41
Figura 7-9 Testigos del borde para evaluar crecimiento progresivo de biopelícula.....	42
Figura 7-10 Proceso de colocación del testigo del borde. En este caso para PVC de 4"	42
Figura 7-11 Vista interna del muestreador de PVC de 4" con el testigo del borde colocado	43
Figura 7-12 Testigos desechables de PVC 4"	44
Figura 7-13 Vista externa del testigo colocado	44
Figura 7-14 Vista interna de los testigos colocados	45
Figura 7-15 Muestreador sellado, listo para colocarse como en la Figura 7-8	45
Figura 8-1 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 2.5" en PVC en el testigo del borde	54
Figura 8-2 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 3" en PVC en el testigo del borde.....	54
Figura 8-3 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 4" en PVC en el testigo del borde.....	55
Figura 8-4 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 4" en Biaxial en el testigo del borde	56
Figura 8-5 Gráfica comparativa del crecimiento en las cuatro tuberías	56
Figura 8-6 Comportamiento del coeficiente de pérdidas menores con respecto al número de Reynolds para las cuatro tuberías del montaje durante la fase 1	60
Figura 8-7 Comportamiento del coeficiente de pérdidas menores antes y después del primer lavado para las cuatro tuberías del montaje.	62
Figura 8-8 Comportamiento del coeficiente de pérdidas menores antes y después del segundo lavado para las cuatro tuberías del montaje.....	63
Figura 8-9 Comportamiento del coeficiente de pérdidas menores entre el primer y el segundo lavado para las cuatro tuberías del montaje.....	64

Figura 8-10 Comportamiento del coeficiente de pérdidas menores entre el segundo y el tercer lavado para las cuatro tuberías del montaje	65
Figura 8-11 Diagrama de Moody para la tubería de 2.5" en PVC durante la fase 1	67
Figura 8-12 Diagrama de Moody para la tubería de 3" en PVC durante la fase 1	68
Figura 8-13 Diagrama de Moody para la tubería de 4" en PVC durante la fase 1	68
Figura 8-14 Diagrama de Moody para la tubería de 4" en Biaxial durante la fase 1	68
Figura 8-15 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 2.5" en PVC	70
Figura 8-16 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 3" en PVC	71
Figura 8-17 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 4" en PVC	72
Figura 8-18 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 4" en Biaxial.....	73
Figura 8-19 Límite del flujo hidráulicamente liso con el espesor de la biopelícula.....	75
Figura 8-20 Comportamiento de las biopelículas luego de los primeros tres lavados para las cuatro tuberías analizadas	76
Figura 8-21 Deterioro evidente de la calidad de la biopelícula dentro de la tubería	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 7-1 Ecuaciones de calibración de los vertederos	38
Tabla 7-2 Fechas importantes durante el período de pruebas	47
Tabla 8-1 Tasa de crecimiento y regeneración de biopelículas en las cuatro tuberías del montaje.....	57
Tabla 8-2 Eficiencia de remoción de biopelículas de los diferentes lavados	78

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Datos y curvas de calibración de los vertederos.....	86
ANEXO 2: Bitácora diaria de actividades.....	95
ANEXO 3: Velocidades de recirculación de las tuberías del montaje.....	100
ANEXO 4: Pruebas de piezómetros realizadas durante la experimentación.....	103
ANEXO 5: Pesos de los testigos del borde para las cuatro tuberías.....	118
ANEXO 6: Pesos de los testigos desechables durante los lavados.....	121
ANEXO 7: Tablas de cálculo de la subcapa laminar viscosa con base en la velocidad de recirculación.....	126

1 INTRODUCCIÓN

El lavado de las redes de distribución mediante el uso del agua a presión es un mantenimiento rutinario de las redes, que se utiliza con el fin de controlar la calidad del agua (en términos de olor, sabor, color y presencia de microorganismos) y la hidráulica del flujo, entre otras características. La formación de biopelículas afecta estos dos parámetros porque por un lado, al formarse una capa de biopelícula se alteran las características de la pared interna de las tuberías modificándose su rugosidad y por consiguiente el régimen hidráulico. Por otro lado, la presencia de microorganismos en el agua deteriora la calidad de ésta, haciendo que presente mal olor, un color amarillento, un sabor extraño y hasta pueda llegar a ser perjudicial para la salud.

Las investigaciones a nivel mundial se han orientado hacia entender los mecanismos y repercusiones de la formación de biopelículas en las redes de distribución de agua potable y diferentes métodos de controlarla, tales como el uso de desinfectantes y un mejor tratamiento en la planta de potabilización. Sin embargo, no se ha estudiado a fondo el efecto del lavado con agua a presión o flushing sobre el crecimiento de las biopelículas, y el comportamiento de éstas luego de lavados sucesivos.

La presente investigación pretende analizar el efecto hidráulico de las biopelículas, y cómo éste cambia a través del tiempo, manteniendo controlada la formación de biopelículas mediante lavados sucesivos, con una velocidad que garantice el desprendimiento de la biomasa adherida, mediante un aumento en el esfuerzo cortante. De esta forma, se pretende analizar si los lavados con agua a presión o flushing, son una herramienta efectiva para el mantenimiento rutinario de las redes de distribución, analizada desde el punto de vista de la hidráulica. A futuro, las investigaciones podrían ser encaminadas hacia evaluar el efecto del lavado en tuberías de agua potable, es decir, conectadas todo el tiempo a la red del acueducto, y su impacto sobre la calidad del agua.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la velocidad de regeneración de las biopelículas y su comportamiento luego de lavados sucesivos, mediante un montaje que permita el crecimiento de las biopelículas dentro de las tuberías y la medición de estas, sin alterar en la medida de lo posible su entorno ni su crecimiento.

Adicionalmente, determinar el efecto hidráulico de este comportamiento, evaluado a través de las pérdidas de energía en cada una de las tuberías del montaje: Pérdidas por fricción en los tramos de tubería, y pérdidas menores en accesorios.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 Tesis de Pregrado

- Conocer la dinámica de las biopelículas dentro de los sistemas de distribución de agua potable: Los procesos de crecimiento, desprendimiento y regeneración, luego de un aumento en el esfuerzo cortante causado por una mayor velocidad de flujo.
- Realizar una revisión bibliográfica sobre el estado del arte del lavado de redes de distribución de agua potable, las metodologías existentes y sus ventajas y desventajas.

2.2.2 Tesis 1

- Adaptar el montaje de laboratorio existente con el fin de modificar algunos de los parámetros evaluados previamente, y de esta forma, cumplir los objetivos que se proponen para tesis 2 durante el período de experimentación.

- Investigar sobre las diferentes técnicas microbiológicas e hidráulicas, para medir de manera objetiva, el espesor o densidad de las biopelículas presentes en el montaje.
- Solucionar algunos de los problemas que se presentaron en el montaje anterior, para lograr que los resultados experimentales sean más representativos.

2.2.3 Tesis 2

- Evaluar el comportamiento de las biopelículas en el tiempo y su regeneración luego de lavados sucesivos en tuberías de agua a presión.
- Evaluar el efecto hidráulico del crecimiento de biopelículas y su desprendimiento en tuberías de PVC de diferentes diámetros y tuberías biaxial de 4 pulgadas.
- Realizar comparaciones entre la formación de biopelículas y el efecto hidráulico de éstas en los diferentes diámetros utilizados en el montaje.
- Estimar el espesor de la biopelícula promedio mediante técnicas microbiológicas o físicas, con el fin de hacer comparativos los resultados entre los diferentes materiales y diámetros.

3 JUSTIFICACIÓN

En el tema de biopelículas y el lavado de redes mediante un aumento en la velocidad del agua, no sólo es necesario realizar una revisión bibliográfica de las investigaciones a nivel mundial y las prácticas que realizan diferentes empresas de acueducto de los países desarrollados, sino que es necesario hacer investigación propia bajo las condiciones en las que funcionan los sistemas de acueducto colombianos. No se trata de adaptar e implementar procesos de los países desarrollados, sino evaluar su aplicabilidad en un país como Colombia a través de la experimentación.

Por otro lado, la mayoría de las investigaciones de biopelículas a nivel mundial se llevan a cabo en modelos a micro – escala, ya que microbiológicamente es más factible lograr un entendimiento completo de la dinámica de las biopelículas en modelos pequeños, controlados bajo condiciones de laboratorio. Sin embargo, los resultados a los que llegan estos investigadores no pueden ser aplicados directamente al caso de biopelículas en las redes de distribución, debido a que las condiciones reales son totalmente diferentes a las condiciones de laboratorio. Por esta razón, se plantea una investigación con tuberías de PVC en diámetros comerciales, dentro de un montaje a escala real en donde se pueden observar los fenómenos que podrían ocurrir en las redes reales. Es necesario tener en cuenta que este montaje es adecuado para el nivel de precisión que se requiere en la toma de datos y para el nivel tecnológico con el que se cuenta.

Por último, es evidente que un proceso de investigación debe estar en constante actualización, con el fin de depurar los errores cometidos anteriormente, perfeccionar las técnicas de medición y confrontar los resultados obtenidos. De esta forma, a pesar de que el Ing. Luis Fernando Muñoz estuvo trabajando su proyecto de grado en el mismo tema^[9], es justificable el desarrollo de esta investigación ya que se realiza una crítica constructiva a los procesos de medición y análisis, y se propone una nueva metodología.

4 ANTECEDENTES

La Universidad de los Andes, ha venido realizando diferentes investigaciones relacionadas con el tema del lavado de redes de distribución y con el crecimiento de biopelículas dentro de tuberías presurizadas. Algunas de ellas han sido revisiones bibliográficas o estados del arte, mientras que otras han estado encaminadas hacia la experimentación física mediante montajes de laboratorio que permitan determinar el efecto de las biopelículas en diferentes materiales, y las velocidades, frecuencias y duraciones de los lavados para controlar su crecimiento.

Estas investigaciones, sirven de preámbulo para el presente proyecto, ya que por un lado se cuenta con un avance significativo en el estado del arte y la revisión bibliográfica que se requiere; y por el otro, se cuenta con datos experimentales que pueden ser utilizados en una primera fase, con el fin de hacer una revisión crítica sobre la forma en la que se toman los datos, la forma en la que se procesan, y los resultados que se han obtenido hasta el momento.

4.1 TESIS DE ESTADO DEL ARTE

Parte del desarrollo del presente proyecto de grado, es una revisión del estado del arte del lavado de redes de distribución a nivel mundial, y todo lo referente a la formación, crecimiento y desprendimiento de biopelículas y en general todo lo relacionado con los procesos que se desarrollan dentro de las tuberías de las redes de distribución. Esta investigación fue realizada como requisito de grado de ingeniería civil de la Universidad de los Andes, por el mismo autor, y se titula: *Aspectos Hidráulicos para el Lavado de Redes de Distribución de Agua Potable*.^[14]

Adicionalmente, se han desarrollados otras investigaciones acerca de biopelículas en agua potable, como la desarrollada por Andrea Vargas Gamarra titulada: *Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelículas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable. Estado del arte*^[18], que profundiza el tema de los factores que afectan el desarrollo de los microorganismos como son los nutrientes, el nivel de desinfectante residual, la temperatura, entre otros.

4.2 MONTAJES FÍSICOS

Como se explicó anteriormente, el presente proyecto continúa la investigación iniciada por el Ing. Luis Fernando Muñoz en el tema de velocidades de lavado de biopelículas. Algunos aspectos de esta investigación fueron modificados con el fin de mejorar la aproximación de los resultados a lo que sucede en la vida real.

El principal problema que se presentó durante el desarrollo de la tesis anterior fue la presencia de algas como se esquematiza en la Figura 4-1. El agua presentaba una coloración verde debido a estos microorganismos.

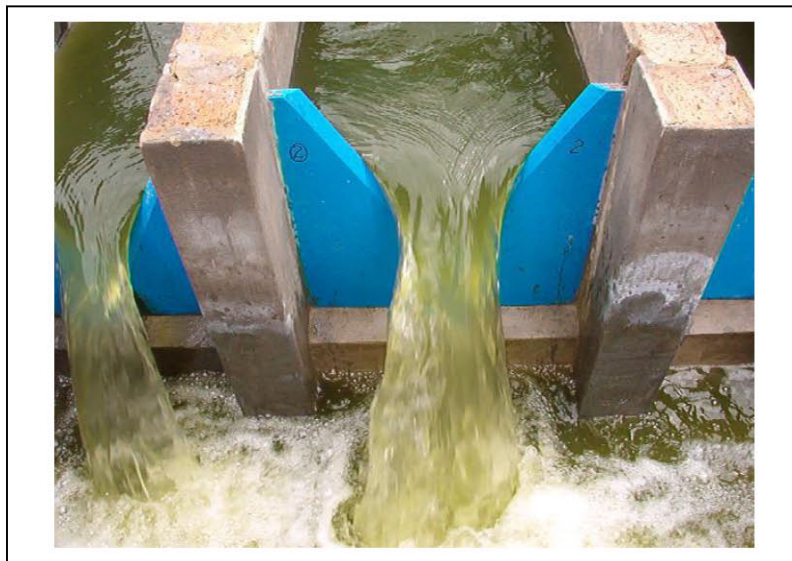


Figura 4-1 Vertederos del montaje anterior con presencia de algas

Las algas pueden de cierta forma invalidar los resultados que se obtienen mediante experimentación, ya que éstas consumen los nutrientes que se agregan al agua para promover el crecimiento de las bacterias, y en algunos casos se adhieren a la superficie interna de la tubería, alterando las lecturas de cantidad de bacterias adheridas como se puede ver en la Figura 4-2. En esta figura, los testigos, utilizados para medir el crecimiento de bacterias, presentan una coloración verde característica de las algas. Por esta razón, los resultados obtenidos pueden no ocurrir sin la presencia de algas, ya que el proceso de adhesión, crecimiento y desprendimiento depende de la morfología de los organismos involucrados.



Figura 4-2 Testigos del proyecto de grado anterior

Dado que se tiene como antecedente el problema descrito anteriormente, todos los tanques del montaje fueron tapados con plástico negro con el fin de prevenir la incidencia directa del sol que es el factor más determinante en el crecimiento de las algas. De esta forma, se pretende mantener la calidad del agua por más tiempo.

Adicionalmente, los testigos de la investigación anterior se localizaron en la parte inferior de la tubería. Esta decisión no es objetiva, ya que al estar el agua en reposo, gran cantidad de sedimentos se depositan en el fondo de la tubería, adhiriéndose a la biopelícula en formación, e invalidando las tasas de crecimiento de bacterias y el espesor de la biopelícula alcanzado. Por esta razón, los testigos de esta investigación fueron localizados en la parte superior de las tuberías, en donde no se adhiere material adicional por procesos de sedimentación.

Otro problema que se detecta en el desarrollo de la investigación anterior es que los ciclos de lavado son de diferente duración. Esto no permite realizar comparaciones entre los diferentes diámetros de tubería ya que los procesos siguientes al lavado varían de acuerdo con la frecuencia entre dos lavados. Así mismo, las velocidades de formación y lavado fueron diferentes también, incluso entre los lavados de una misma tubería. Si la velocidad de lavado varía, no es posible realizar comparaciones entre la eficiencia de uno u otro lavados, pues esta eficiencia se encuentra íntimamente relacionada con la velocidad del flujo.

A pesar de todos los problemas detectados y descritos anteriormente, algunos aspectos de la investigación anterior serán tenidos en cuenta para utilizarlos en el desarrollo del presente proyecto. Estos aspectos se sintetizan a continuación:

- La velocidad de formación de biopelícula que mostró los mejores resultados fue 0.49 m/s, por lo que se utilizó una velocidad de 0.5 m/s durante los períodos de formación de biopelículas del presente proyecto en todas las tuberías.
- Los lavados más efectivos se realizaron a velocidades comprendidas entre 2 y 2.5 m/s, por lo cual la velocidad de lavado se fijó en 2.5 m/s
- La duración es directamente proporcional a la cantidad de biopelícula desprendida; es decir, entre más dure un lavado, más efectivo es, y más biopelícula se desprende. Sin embargo, no se utilizará la mayor efectividad del lavado, que fue de 60 minutos, sino que se utilizará una duración fijada en 20 minutos.

5 BIOPELÍCULAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

El presente capítulo, es una adaptación de la investigación realizada por el mismo autor como requisito de grado de Ingeniero Civil de la Universidad de los Andes^[14]. Para esta investigación, sólo se tomó la información más relevante: Lo referente a la formación y desprendimiento de las biopelículas, y algunas generalidades sobre el lavado de redes de distribución.

5.1 GENERALIDADES

A pesar del tratamiento de potabilización y desinfección del agua antes de ser distribuida a los usuarios, existen microorganismos que son capaces de sobrevivir en el sistema y colonizar las paredes de las tuberías creando lo que se conoce como biopelícula. Las razones por las cuales se incrementa el número de bacterias dentro de la red, no han sido entendidas en su totalidad, aunque han sido estudiados en detalle dos factores importantes:

El primer factor ha sido analizado como una falla mecánica. Las bacterias que se encuentran en el exterior pueden entrar a la red por diferentes medios como reservas de agua al aire libre, grietas o agujeros en las tuberías antiguas, o reparaciones de algún tramo de éstas.

El segundo factor se debe al crecimiento de las bacterias presentes en el agua potable, que encuentran en este medio oligotrófico, los nutrientes necesarios para su desarrollo. La multiplicación de microorganismos y el posterior crecimiento de la biopelícula, genera problemas en la calidad del agua, mal olor y sabor y problemas asociados con la corrosión en tuberías metálicas.

Las biopelículas son estructuras heterogéneas que crecen en ambientes acuosos, y que se encuentran formadas por agrupaciones de células bacterianas que se mantienen unidas dentro de una matriz extracelular de polímeros, y separadas mediante espacios y canales intersticiales (Costerton *et al.*, 1995; deBeer y Stoodley, 1995).^[2] En las paredes internas de las tuberías se pueden encontrar biopelículas continuas, es decir las que colonizaron la totalidad de la superficie

disponible, aunque en su mayoría, las biopelículas se encuentran en forma de parches a lo largo de dicha superficie.

Los microorganismos presentes en las biopelículas, tienen la ventaja de adaptarse fácilmente a las condiciones de bajos nutrientes y baja temperatura, características fundamentales del agua de los sistemas de distribución. Algunos de ellos pueden ser patógenos a los humanos y causantes de infecciones y enfermedades como los coliformes; otros son patógenos oportunistas o secundarios, que causan enfermedades bajo ciertas circunstancias y sobre los individuos propensos a ellos o con un sistema inmune deficiente. A pesar de lo anterior, por lo general los microorganismos presentes en los sistemas de distribución son inofensivos, aunque generen problemas de mal olor, sabor y aspecto del agua.

5.2 PROCESO DE FORMACIÓN

El proceso de formación de las biopelículas inicia con la adhesión de una pequeña cantidad de bacterias a la superficie de la tubería. Luego de que la bacteria identifica la superficie, se fija a ésta y comienza a secretar la sustancia polimérica extracelular, con el fin de progresar de un estado de fijación reversible, en el que las bacterias son fácilmente removidas, a un estado de adhesión irreversible, en donde las fuerzas de cohesión son mucho mayores y éstas evitan que se desprenda fácilmente la colonia que se está formando. Ver Figura 5-1.

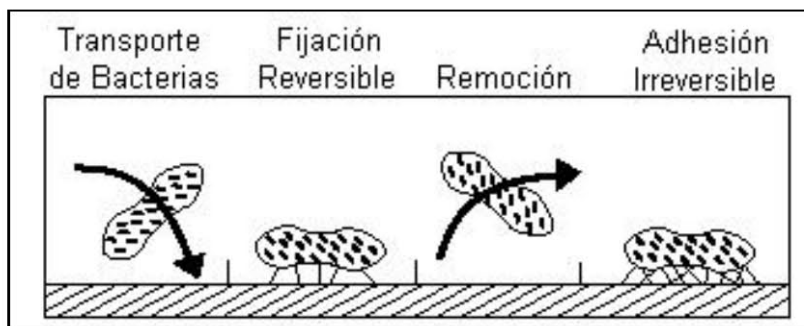


Figura 5-1 Proceso de adhesión de bacterias.

Fuente: www.edstrom.com

A medida que se van acumulando los nutrientes en la sustancia polimérica extracelular (SPE), las bacterias pioneras que ya se encuentran firmemente adheridas a la pared interna de la tubería, comienzan a reproducirse y el espesor de la biopelícula comienza a aumentar.

Como un proceso paralelo al descrito anteriormente, la matriz de SPE atrae algunas bacterias que se encuentran suspendidas en el flujo de agua, que se conocen como colonizadoras secundarias. Estas bacterias se adhieren a la biopelícula ya formada y extraen de la matriz de SPE los nutrientes necesarios para su propio metabolismo.

La biopelícula madura se convierte entonces en una comunidad en donde sobreviven diferentes especies. En general, se desarrollan dos capas: Una capa de biopelícula anaerobia en contacto con la superficie de la tubería, sobre la cual descansa una capa de biopelícula aerobia en contacto con el agua.

Se especula que el espesor total de la biopelícula se forma dentro de la subcapa laminar viscosa que se genera en el flujo de agua. Cuando el espesor de la biopelícula empieza a aumentar, su superficie sale de esta capa en donde el flujo es laminar y por lo tanto el esfuerzo cortante es muy bajo, y entra en la zona de flujo turbulento en donde, por efecto de un aumento en el esfuerzo cortante, es desprendida y tiene la posibilidad de colonizar algún sitio aguas abajo o ser transportada por el flujo de agua. Es por esta razón que se supone que el espesor base de la biopelícula coincide con el espesor de la subcapa laminar, cuando ésta se encuentra en su estado maduro.

Es posible distinguir cuatro fases en la evolución de las biopelículas a través del tiempo (Picioeanu *et al.* 2001)^[8]: En la primera fase no existe limitación de sustrato debido a que la biopelícula es de poco espesor. Gracias a esto, el crecimiento de los microorganismos ocurre a una tasa cercana a la tasa máxima. Esta fase se conoce como la fase de crecimiento exponencial.

Luego, la biopelícula entra en una fase de retardo, en donde ésta aumenta de espesor, pero comienza a existir limitación de sustrato en las capas más profundas. El crecimiento por lo tanto sólo es posible en aquellas capas cercanas a la interfaz biopelícula – agua en donde se encuentran

los nutrientes necesarios para el desarrollo. En esta fase el crecimiento deja de ser exponencial como en la fase I, y pasa a ser lineal.

En la fase III, la tasa de crecimiento se reduce considerablemente pues cuando la biopelícula aumenta de espesor, el intercambio de nutrientes en las capas internas es limitado.

En las tres fases anteriores, el crecimiento es balanceado con un proceso de desprendimiento por erosión superficial.

Cuando se ha alcanzado un espesor determinado, el cual se estima igual al espesor de la subcapa laminar del flujo, la biopelícula entra en una cuarta fase: Se encuentra expuesta al desprendimiento en masa o “sloughing”, en donde se producen desprendimientos de grandes “parches” de biopelícula.

Por lo general, la evolución de las biopelículas en el tiempo se encuentra ligada con la interacción entre la producción de biomasa y la fuerza de desprendimiento. La biomasa que se forma inicialmente en la superficie de la biopelícula, tiene una tasa de crecimiento rápida así como una tasa de producción de SPE alta. De esta forma, se genera el crecimiento exponencial mencionado, pero la estructura que se forma tiene una baja densidad. Cuando el crecimiento se encuentra controlado por las fuerzas de desprendimiento, como en las fases III y IV, los nutrientes logran penetrar hasta la base de la biopelícula y promueven nuevamente el crecimiento de biomasa en estas capas internas. Como resultado de esta dinámica, se concluye que la densidad de la biopelícula aumenta a medida que aumentan las fuerzas de desprendimiento.

5.3 PROCESO DE DESPRENDIMIENTO

El desprendimiento de biopelículas es el proceso mediante el cual, una fracción de biomasa es desprendida de la matriz que la contiene, y transportada por el flujo de agua. Bajo ciertas circunstancias, este proceso puede resultar en colonización secundaria, ya que la biomasa desprendida tiene la facultad de adherirse en algún punto aguas abajo del sitio donde ocurrió el desprendimiento.

Este proceso es importante ya que el desarrollo y dinámica de las biopelículas se encuentran controlados por el balance entre los procesos de formación y desprendimiento. Cuando por ejemplo se desprende una gran cantidad de biopelícula, se crea una superficie rugosa y por lo tanto una interfaz biopelícula – agua muy irregular, que conlleva a que se genere un ambiente favorable para que nuevas bacterias se adhieran a la biopelícula, incluso nuevas especies diferentes a las ya existentes.

A pesar de la importancia del desprendimiento en el desarrollo de las biopelículas, se conoce muy poco acerca de los mecanismos biológicos, físicos y químicos mediante los cuales este proceso es llevado a cabo. (Stewart *et al.*, 2000). Como resultado de lo anterior, la mayoría de modelos e investigaciones se llevan a cabo mediante simplificaciones, como despreciar el desprendimiento o suponiendo un espesor de biopelícula constante. Estos supuestos, aunque son válidos para evaluar el desarrollo de las biopelículas en el laboratorio, no reflejan la verdadera dinámica de éstas.

5.3.1 Mecanismos de Desprendimiento

El desprendimiento de biopelículas puede llevarse a cabo mediante cuatro mecanismos diferentes: Abrasión, erosión, desprendimiento en masa o depredación. (Bryers, 1988)^[8].

La abrasión y la erosión se refieren a la remoción de pequeños grupos de células provenientes de la superficie de las biopelículas, pero difieren en el mecanismo mediante el cual esto se lleva a cabo. La erosión es causada por fuerzas cortantes entre el fluido en movimiento y la superficie de la biopelícula, mientras que la abrasión es causada por la colisión entre las partículas de soporte de las biopelículas, por ejemplo durante un retrolavado.

Por otro lado, el desprendimiento en masa o “sloughing” se refiere a grandes fracciones de biopelícula. Una forma de diferenciar la erosión del desprendimiento en masa es mediante la relación entre la longitud mayor de la fracción desprendida y el espesor de la biopelícula. Si la longitud característica es mayor que el espesor de la biopelícula se trata de un desprendimiento en masa. De lo contrario se clasifica como erosión.

Durante el desprendimiento en masa, una fracción grande de biopelícula es retirada de su lugar y transportada por el agua. Sin embargo, este mecanismo de desprendimiento no es muy efectivo para la superficie total de la biopelícula, pues estos fragmentos son propensos a adherirse nuevamente a la superficie de la tubería en algún sitio aguas abajo del sitio del desprendimiento, en donde se tengan las condiciones propicias de espacio, nutrientes, oxígeno, y demás parámetros necesarios para que esto ocurra.

Por su parte, la abrasión y la erosión son medios efectivos para controlar la totalidad de la superficie de la biopelícula. Sin embargo, mediante estos mecanismos no es removida la biomasa que se encuentra en la base de la estructura, ya que esto es imposible en la vida real: Siempre va a existir una capa de biopelícula por mínima que sea.

La depredación también se considera un mecanismo de desprendimiento, ya que en ausencia de nutrientes, y como parte de un proceso de selección natural, las bacterias más “fuertes” y dominantes tendrán que encontrar su alimento en las más débiles, reduciendo una pequeña fracción del total de biomasa presente. Este mecanismo es poco significativo y no ha sido estudiado a fondo.

5.3.2 Causas del Desprendimiento de Biopelículas

Un evento de desprendimiento ocurre cuando las fuerzas externas causadas por el fluido, son mayores que la resistencia interna de la matriz que mantiene la biopelícula unida. Por lo tanto existen dos mecanismos que conllevan al desprendimiento: O un aumento en el esfuerzo cortante, o una disminución en la resistencia interna. La discusión del mecanismo que domina el desprendimiento, sea biológico, químico o físico, se encuentra en desarrollo (Bakke, 1986; Peyton y Characklis, 1993; Bryers, 2000; Stewart *et al.* 2000).

5.3.2.1 Esfuerzo Cortante

En sistemas de distribución de agua potable, el flujo de agua ejerce fuerzas sobre la superficie de la biopelícula tanto normal como tangencialmente a ésta. Estas fuerzas se traducen en esfuerzos

de tensión y cortante que en algunas circunstancias conllevan al desprendimiento y transporte de la biopelícula a lo largo de la tubería.

Analizar la acumulación de esfuerzos dentro de la estructura de la biopelícula es importante para determinar los lugares en donde es más factible que ocurra la fractura. Picioreanu *et al.* (2001)^[8] realizó un modelo para evaluar el efecto del desprendimiento en la estructura de las biopelículas causado por el esfuerzo cortante. Un ejemplo de la distribución de esfuerzos en la estructura de la biopelícula se muestra en la Figura 5-2. En una escala de grises, el negro representa el esfuerzo máximo y el blanco el mínimo.

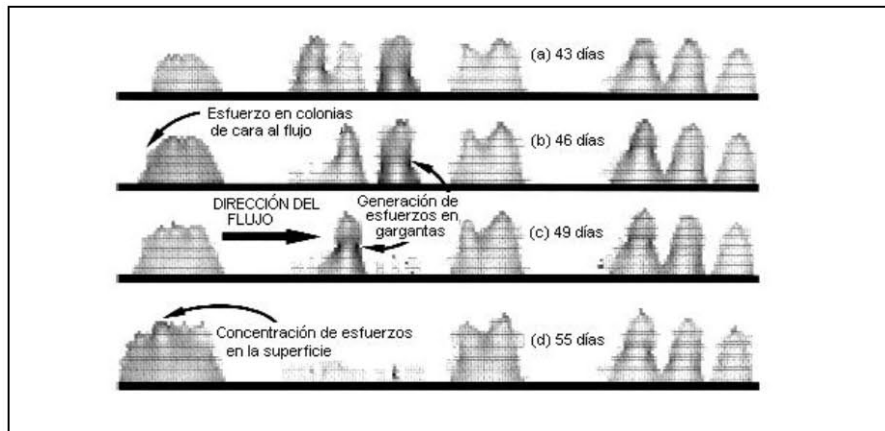


Figura 5-2 Distribución de esfuerzos en las biopelículas simuladas

De acuerdo con la figura, se pueden identificar algunas situaciones típicas:

- En agrupaciones compactas de bacterias (Como el caso de la izquierda en la Figura 5-2(d)), el mayor esfuerzo se genera cerca a la superficie de la biopelícula. Esto es causado principalmente por el componente tangencial o cortante del esfuerzo. Como resultado de este tipo de esfuerzos se puede producir desprendimiento mediante el mecanismo de erosión.
- En las agrupaciones en forma de dedo, se forma una garganta en la que se concentra el esfuerzo (Figura 5-2(a-d)). En general, la ruptura se produce en la zona de la garganta que tenga la menor sección transversal. Esto conlleva al desprendimiento de todo un conjunto de biopelícula, lo que caracteriza al desprendimiento en masa o “sloughing”.

- Las colonias aisladas, o simplemente las primeras que enfrentan el flujo de agua son las que se encuentran menos protegidas contra el esfuerzo cortante que éste causa. A pesar de que estas colonias son las que crecen más rápido, pues son las que reciben la mayor cantidad de sustrato (Picioreanu *et al.* 2000), el esfuerzo se genera también a una tasa mayor (Figura 5-2(b)), por lo que estas colonias también serán fácilmente removidas. Esto concuerda con la investigación llevada a cabo por Gjaltema *et al.* (1994), quien reportó que el desprendimiento en masa siempre iniciaba en la cara aguas arriba de la biopelícula.

Adicionalmente, lo encontrado por Picioreanu *et al.*, coincide con los resultados de Ohashi y Harada (1994), demostrando que las partes convexas de la superficie de la biopelícula son más propensas a ser desprendidas que las partes cóncavas.

Horn *et al.* (2003)^[5] simuló el desprendimiento de biopelículas bajo ciertas condiciones hidrodinámicas. El modelo se encuentra basado en la discusión del espesor de biopelícula promedio, L_f . Durante la fase de crecimiento homogéneo, la biopelícula empieza a aumentar de espesor y ocurren algunos eventos de desprendimiento espontáneo. Ver Figura 5-3. Como se puede ver en la figura, el mecanismo de desprendimiento que domina en esta fase temprana del desarrollo es la erosión, y por lo tanto, la superficie de la biopelícula es homogénea y continua.

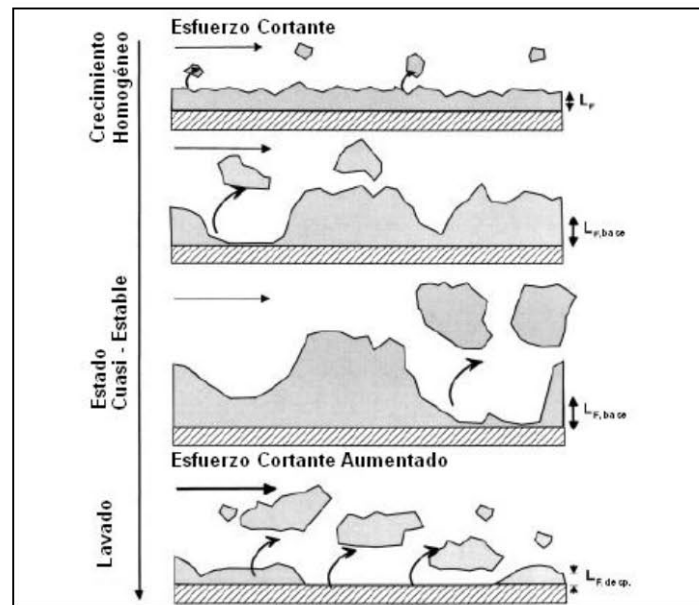


Figura 5-3 Desarrollo de la biopelícula en tres fases

Más adelante, la biopelícula entra en el estado cuasi – estable, en donde existe un balance entre los procesos de crecimiento y desprendimiento. La biopelícula alcanza un espesor promedio, $L_{f,base}$, y éste oscila en el tiempo como se puede ver en los esquemas del centro de la Figura 5-3. En esta fase, se llevan a cabo desprendimientos en masa aleatorios, o “sloughing”, y por lo tanto la superficie deja de ser homogénea.

Durante la fase de lavado se genera un aumento en el esfuerzo cortante que supera la resistencia interna de la biopelícula, desprendiendo grandes porciones de ésta. Como resultado del lavado, se forman parches de biopelícula aislados que luego empiezan el proceso de regeneración.

Horn observó, que durante el experimento de lavado, ocurre un desprendimiento de biomasa en los primeros segundos, y luego no se presenta ningún desprendimiento significativo durante el resto del experimento, como se esquematiza en la Figura 5-4. Esto demuestra que la biopelícula es muy sensible a los cambios de esfuerzo cortante.

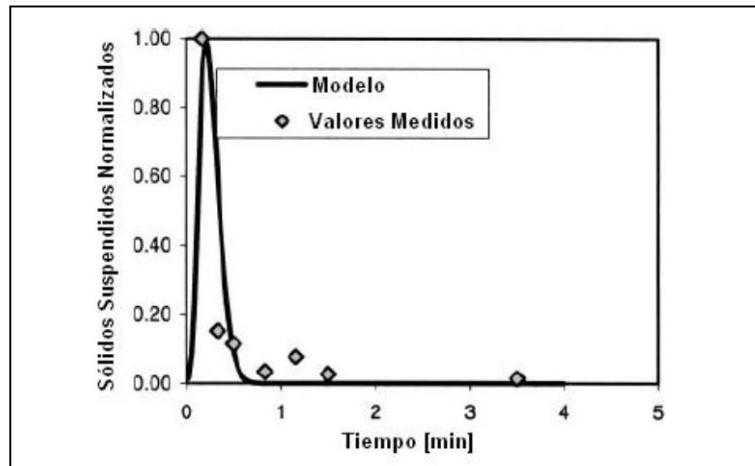


Figura 5-4 Simulación de sólidos suspendidos

Stoodley *et al.* (1999)^[2], desarrolló igualmente un ensayo de laboratorio para determinar las deformaciones estructurales de las biopelículas causadas por cambios en el esfuerzo cortante, al que llama τ_w . Los resultados obtenidos se esquematizan en la Figura 5-5. En la parte superior de la figura, (A), el esfuerzo cortante era $\tau_w = 5.09 \text{ N/m}^2$ ($Re = 3600$). La biopelícula tenía un largo l , un espesor l_c y un ángulo de desarrollo en la dirección del flujo α .

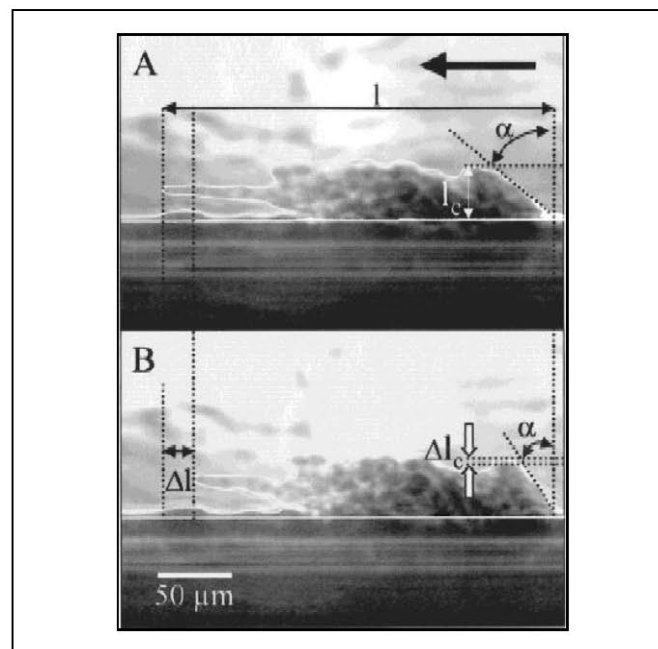


Figura 5-5 Cambios en la forma de la biopelícula como función de τ_w . Stoodley *et al.*

Al reducir el esfuerzo cortante a $\tau_w = 0.12 \text{ N/m}^2$, Figura 5-5 (B), se observaron diferentes cambios morfológicos: Disminuyó la longitud (Δl), aumentó el espesor (Δl_c) y se redujo el ángulo de deformación, α . El resultado es lógico, ya que los esfuerzos cortantes altos, limitan el crecimiento de las biopelículas. Una vez se disminuye la velocidad, y por lo tanto el esfuerzo cortante, la biopelícula está en capacidad de aumentar de espesor. El ángulo de deformación responde al esfuerzo cortante de la misma forma. Por ser la primera superficie de la biopelícula en contacto con el flujo de agua, a mayor esfuerzo cortante mayor ángulo de deformación α . La longitud total de la biopelícula se reduce al reducir el esfuerzo, ya que la fuerza de arrastre que genera el flujo sobre la biopelícula es menor.

5.3.2.2 Resistencia interna de la biopelícula

Entre mayor resistencia tenga la estructura de biopelícula, menos desprendimiento se va a llevar a cabo debido a que existe una mayor cohesión entre las partículas. Para que éste tipo de biopelícula se desprenda, debe existir un esfuerzo cortante mayor a la resistencia de ésta, por ejemplo el que se produce en un lavado agresivo con agua a gran velocidad.

La pérdida de resistencia de una estructura de biopelícula se puede producir de varias formas, siendo la principal de ellas una disminución en el nivel de nutrientes que transporte el agua y que son vitales para la supervivencia de las bacterias. Al decaer el nivel de nutrientes, se genera una competencia entre las diferentes especies y microorganismos por el poco alimento existente, y esto conlleva a la muerte de los más débiles, y por consiguiente a una disminución en la resistencia de la biopelícula como conjunto.

Otro mecanismo mediante el cual se puede disminuir la resistencia interna de la biopelícula, y por lo tanto promover el desprendimiento de ésta, es la formación de cavidades y canales internos, que disminuyen la cohesión entre partículas y favorecen el paso de agua internamente generando altos esfuerzos dentro de la estructura en donde la resistencia es menor que en la superficie, llevando a un desprendimiento en masa de toda la estructura localizada por encima de dichos canales o cavidades.

En algunos casos, se puede producir una combinación de las dos causas mencionadas anteriormente, es decir, que se produzcan cavidades en la zona más profunda de la biopelícula, debido a un decaimiento en la población de bacterias bien sea por la edad de éstas o por que el nivel de nutrientes es muy bajo a diferencia de la superficie en contacto directo con el agua (Ohashi y Harada, 1994, 1996)^[8]. Cuando el área de dichas cavidades alcanza un 10 – 20% del área total de la biopelícula, se genera un decaimiento drástico en la fuerza de cohesión, seguido por un desprendimiento masivo de biopelícula.

5.4 MEDIOS DE CONTROL

5.4.1 Planta de Tratamiento

Hace algún tiempo, se pensaba que la calidad del agua que llegaba a los usuarios dependía exclusivamente del tratamiento que se le diera a ésta en las plantas de potabilización, y se despreciaban los procesos biológicos y químicos que se llevaban a cabo a lo largo de la red de distribución. Con el tiempo, los investigadores fueron encontrando diferentes procesos que alteraban la calidad del agua, dentro de los que se encuentran la corrosión de los materiales metálicos, la aparición de películas bacterianas en las paredes internas de las tuberías, la aparición de incrustaciones, entre otros.

Por esta razón, el tratamiento que se lleve a cabo dentro de las plantas de potabilización no puede considerarse un medio de control de la aparición y reproducción de las biopelículas en la red, ya que a pesar de eliminar en su gran mayoría las bacterias provenientes de la fuente de agua, no garantiza que las pocas que quedaron, o las que puedan entrar a la red por diferentes mecanismos, no colonicen las paredes internas de las tuberías. Adicionalmente, una vez inicia el proceso de colonización, que siempre va a ocurrir en los sistemas de distribución, el tratamiento de potabilización de la planta pasa a un segundo plano, ya que las bacterias encuentran los nutrientes necesarios para su desarrollo en el agua potable a pesar de ser ésta un medio oligotrófico, es decir, muy bajo en nutrientes.

5.4.2 Desinfectante Residual

Los desinfectantes han demostrado ser una herramienta útil en el control de los organismos vivos cuando son utilizados en las proporciones adecuadas. Sin embargo, pueden promover la formación de sustancias orgánicas biodegradables, que son utilizadas por los microorganismos como fuente de energía y de esta forma contribuir a la formación de biopelículas dentro de la red de distribución (Gilbert 1988, Van der Kooij 1999).

Existen desinfectantes diferentes al cloro como por ejemplo las cloraminas, que parecen ser más efectivas que el cloro para controlar la cantidad de bacterias, aunque en la literatura existen contradicciones sobre esta afirmación. Hay quienes afirman que la cloramina es un compuesto menos reactivo que el cloro, razón por la cual, mantiene una cantidad residual de desinfectante por más tiempo y logra penetrar de una forma más efectiva la pared celular de las bacterias, controlando mejor la cantidad total de éstas en un momento determinado (Van der Wende y Characklis, 1990). Aunque por el otro lado, se demostró que el cloro es el desinfectante más reconocido por ser el más efectivo para controlar la ocurrencia de coliformes en agua potable (Camper y McFeters, 1979).

Por otro lado, algunas especies de bacterias logran sobrevivir y reproducirse a pesar de estar en presencia de una cantidad considerable de desinfectante, dado que a través del tiempo, han desarrollado una resistencia hacia esos compuestos (Ridgway y Olson, 1982; Olivieri et al., 1985; LeChavallier et al., 1988). Este factor también contribuye a la formación de nuevas biopelículas, no por el desinfectante utilizado en sí, sino por la capacidad de las bacterias de desarrollar dicha resistencia lo que protege no sólo a las bacterias que la poseen, sino a aquellas más débiles que se encuentren por debajo de éstas dentro de la estructura de la biopelícula.

La selección del desinfectante influye en el tipo de mecanismo de resistencia que desarrolla la célula. LeChavallier et al. en 1988, encontró que la desinfección con cloro libre era afectada por la superficie de la biopelícula, la edad de las bacterias, encapsulamiento y por los niveles de nutrientes, mientras que la desinfección con monoclорamina sólo era afectada por la superficie de la biopelícula. En un estudio posterior se demostró que no sólo eran diferentes mecanismos los

que afectaban en la desinfección (en el caso del cloro), sino que estos mecanismos eran multiplicativos, es decir, la resistencia a la desinfección proporcionada por un mecanismo se multiplicaba por la resistencia proporcionada por otro diferente, lo que afirma la idea de que la cloramina es un desinfectante más efectivo, dado que sólo un mecanismo de resistencia es desarrollado por las bacterias. Actualmente se conoce muy poca información cuantitativa acerca de los mecanismos de resistencia de las biopelículas con otro tipo de desinfectantes como el ozono.

Por estas razones, mantener un nivel mínimo de cloro residual, o desinfectante residual, no puede ser la única metodología para prevenir la reproducción de bacterias dentro del sistema de distribución.

5.4.3 Flushing

El lavado de tuberías o Flushing, es la técnica mecánica más antigua y útil para resolver los problemas de calidad de agua en la red a bajo costo. Aproximadamente el 99% de los acueductos en Estados Unidos que son lavados anualmente, utilizan esta metodología.

Aunque el lavado o flushing es de vital importancia, tiene limitaciones en su uso. Típicamente, el lavado con flujo a presión no es efectivo para remover tubérculos y otras incrustaciones duras, por lo que es necesario un método más agresivo o incluso la rehabilitación de la tubería.

Además de lo anterior, el lavado con flujo a presión no es efectivo en tuberías de más de 12 pulgadas (300 mm), puesto que las velocidades necesarias para erosionar las paredes internas de la tubería no son alcanzadas fácilmente.

Existen tres tipos básicos de lavado con flujo a presión: El lavado convencional, el lavado unidireccional y el lavado con flujo continuo.

5.4.3.1 Lavado Convencional

El lavado convencional consiste en abrir uno o más hidrantes y permitir que el agua fluya fuera del sistema, hasta que los sedimentos, biopelículas o la baja calidad del agua, sean removidos. Es un método que responde rápidamente a problemas de calidad de agua que se detecten por quejas en los usuarios. Estos problemas incluyen una disminución en el desinfectante residual, mal color y sabor, problemas de turbiedad entre otros.

Este tipo de lavado es utilizado por ejemplo, luego de una reparación de la red, en donde es necesario permitir que el agua fluya hasta que la tubería se limpie y se alcancen los parámetros de calidad exigidos antes de reestablecer nuevamente el servicio.

Por ser una metodología reactiva en respuesta a las quejas de los usuarios, no siempre acaba con el problema. Los sedimentos pueden ser transportados a las tuberías adyacentes por cambios en el régimen normal de flujo, dirección y velocidad de éste. Como el proceso de apertura de los hidrantes no sigue una secuencia planeada, es posible que la porción de agua con bajos estándares de calidad sea retornada al área que se está lavando. Como conclusión, los resultados del lavado convencional no siempre son positivos. Sin embargo, este tipo de lavado se realiza de una forma rápida y con requerimientos mínimos de mano de obra, equipo, planeación y entrenamiento.

En la Figura 5-6 se observa un esquema de un lavado convencional.

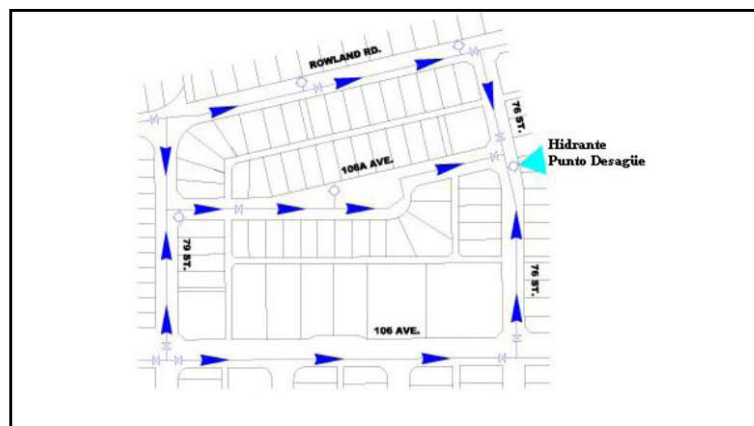


Figura 5-6 Lavado convencional. Tomado de: www.epcor.ca

Esta metodología de lavado no requiere la manipulación de válvulas, por lo cual, las velocidades de lavado no se maximizan. El agua que sale por los hidrantes proviene de diferentes caminos y tuberías lo que implica que la velocidad individual de cada una de ellas sea baja (ver Figura 5-6). En contraste con este método, se encuentra el lavado con flujo unidireccional, en donde el agua es forzada, mediante la manipulación de válvulas, a fluir por sólo un camino, generándose una mayor velocidad.

5.4.3.2 Lavado con flujo Unidireccional

El lavado unidireccional se lleva a cabo mediante el cierre y apertura progresivos de válvulas e hidrantes, con el fin de mantener circuitos cerrados de flujo. Esta metodología combina dos conceptos importantes: Primero, el flujo de agua viaja en una sola dirección. Al lograr esto, se producen velocidades del agua mayores, lo que permite que el lavado sea más efectivo. Segundo, el lavado se realiza en una secuencia tal, que el agua del lavado proviene de sitios que ya han sido lavados previamente, lo que garantiza que la porción que ya se encuentra lavada no vuelve a recibir agua con una baja calidad. Esto se realiza desde la planta de tratamiento hacia la periferia, y desde las tuberías de mayor diámetro hacia las de menor.

En la Figura 5-7 se observa este tipo de lavado. En ella se observa que mediante la manipulación de válvulas se genera un solo camino de flujo, maximizando la cantidad de agua de lavado y por lo tanto la velocidad.



Figura 5-7 Lavado Unidireccional. Tomado de: www.epcor.ca

Adicionalmente, el lavado con flujo unidireccional tiene otros beneficios. Se estima que éste utiliza únicamente el 60% del agua que se requiere para lograr los mismos objetivos mediante el lavado convencional. Con una mayor velocidad de lavado, la limpieza es más efectiva y se realiza en menor tiempo. Además la cantidad de agua puede ser menor ya que, aunque la velocidad sea mayor, el flujo se mueve en una sola dirección.

A diferencia del lavado convencional, el lavado con flujo unidireccional requiere de planeación previa, para poder ser llevado a cabo de forma secuencial y requiere de mano de obra especializada para el monitoreo y puesta en marcha del programa de lavado.

Existen diversos puntos de vista acerca de la velocidad necesaria para que el lavado o “flushing” sea efectivo. Una guía de la American Water Works Association¹, publicada en 1986 sugiere que una velocidad mínima de lavado de 2.5 ft/seg (0.7 m/s) es requerida, una velocidad de 5 ft/seg (1.5 m/s) es deseada, y posiblemente una velocidad de 12 ft/seg (3.7 m/s) es suficiente para mover arenas y limos por ejemplo del cauce de un río, por lo cual, debe ser suficiente para desprender biopelículas dentro de un sistema de distribución.

Antoun, Tyson y Hildebrand (1997)² aseguran que se necesita una velocidad de 6 ft/seg (1.8 m/seg) para remover sedimentos y biopelículas adheridas sobre la superficie de la tubería.

Un Reporte de la Universidad de Alberta, citado por Oberoi (1994)³, asegura que en lugar de determinar la velocidad de flujo como parámetro para evaluar la efectividad del lavado en cuanto a remoción de biopelículas, es necesario determinar el esfuerzo cortante en la frontera, esto es:

$$\tau_0 = \frac{U^2}{[2.2 \ln(R/k_s) + 6.6]^2} \cdot \rho \quad (6.1)$$

¹ Maintaining Distribution – System Water Quality. Denver, Colo.

² Unidirectional Flushing: A Remedy to Water Quality Problems Such as Biologically Mediated Corrosion. *Proc. Of the AWWA Conference, Vol D.* Denver, Colo.

³ Distribution Flushing Program: The Benefits and Results. *Proc. Of the AWWA Annual Conference, Engineering and Operations.* Denver, Colo.

donde:

τ_0 : Esfuerzo de Frontera [Pa]

ρ : Densidad del Fluido [Kg/m^3]

R : Radio Hidráulico [m]

k_s : Rugosidad absoluta del material [m]

U : Velocidad Media [m/s]

5.4.3.3 Lavado con flujo Continuo

Una tercera opción de lavado con agua a presión se lleva a cabo cuando es necesario mantener un flujo continuo de agua para evitar el estancamiento y mantener niveles de desinfectante aceptables. Las velocidades son generalmente menores a 0.3 m/seg (1 ft/seg). Por ser velocidades tan bajas, son insuficientes para remover sedimentos y biopelículas, aunque lo suficientemente altas para perder grandes cantidades de agua a través del tiempo.

Este procedimiento es recomendable en redes con gran cantidad de puntos muertos o con problemas severos de circulación de agua. Implementar esta metodología, ayuda a reestablecer los niveles de desinfectante residual normales, y disminuir el tiempo de residencia del agua en la red.

6 HIDRÁULICA DE TUBERÍAS⁴

Para el análisis de la variación en las pérdidas de energía ocasionadas por el desarrollo y evolución de las biopelículas en el tiempo, es necesario definir algunos conceptos necesarios para el entendimiento de los procedimientos realizados. Este capítulo por lo tanto se enfoca en describir las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo en tuberías y los conceptos más relevantes.

6.1 TIPOS DE FLUJO

El flujo de agua, dependiendo de su velocidad, su viscosidad y el diámetro de la tubería, puede comportarse de una manera diferente dentro de la tubería. El número de Reynolds describe esta diferencia, siendo éste:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} \qquad \text{Ecuación 6-1}$$

donde v es la velocidad del flujo, d el diámetro de la tubería, ρ la densidad del fluido y μ su viscosidad.

Para números de Reynolds menores a 2000, el flujo se comporta de forma laminar, es decir, en donde las partículas de fluido viajan a través de la tubería en forma de láminas paralelas en la misma dirección del flujo, como se observa en la Figura 6-1.

Cuando el número de Reynolds es mayor que 5000, el flujo es completamente turbulento. En este tipo de flujo las partículas se mueven de forma aleatoria, con velocidades diferentes entre sí y direcciones que no necesariamente son la misma dirección del flujo.

Entre 2000 y 5000 se presenta un flujo transicional, en donde las partículas comienzan a ser inestables y pasar de flujo laminar a flujo turbulento, descritos anteriormente.

⁴ El presente capítulo es un extracto del libro: *Hidráulica de Tuberías* de Juan G. Saldarriaga. Ver Referencia [15].

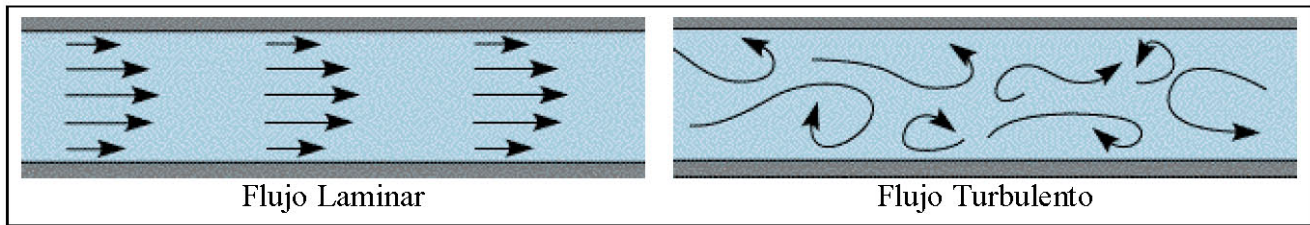


Figura 6-1 Flujos Laminar y Turbulento en Tuberías

6.2 INTERACCIÓN FLUJO – PARED SÓLIDA

El agua, durante su paso por la tubería, ejerce un esfuerzo cortante sobre la pared de ésta. Este esfuerzo es predominante en una pequeña capa que se genera cerca de la pared que se denomina Capa límite. Cuando el flujo es turbulento, se genera una subcapa mucho más pequeña en donde el flujo es laminar y se denomina subcapa laminar viscosa, ya que las fuerzas viscosas priman sobre las fuerzas inerciales. La descripción anterior se esquematiza en la Figura 6-2. De acuerdo con la teoría vista en el capítulo anterior, es dentro de esta subcapa laminar que se forma la biopelícula y alcanza su espesor máximo.

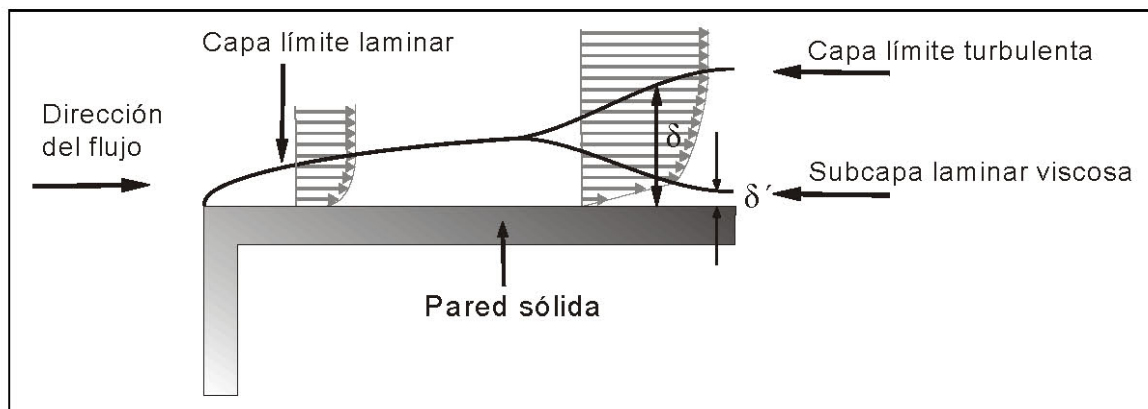


Figura 6-2 Capa Límite

Dependiendo de la relación entre el espesor de la subcapa laminar viscosa δ' y el tamaño medio de la rugosidad de las paredes k_s , se habla de flujo turbulento hidráulicamente liso o hidráulicamente rugoso. La diferencia entre éstos dos tipos de flujo se observa en la Figura 6-3.

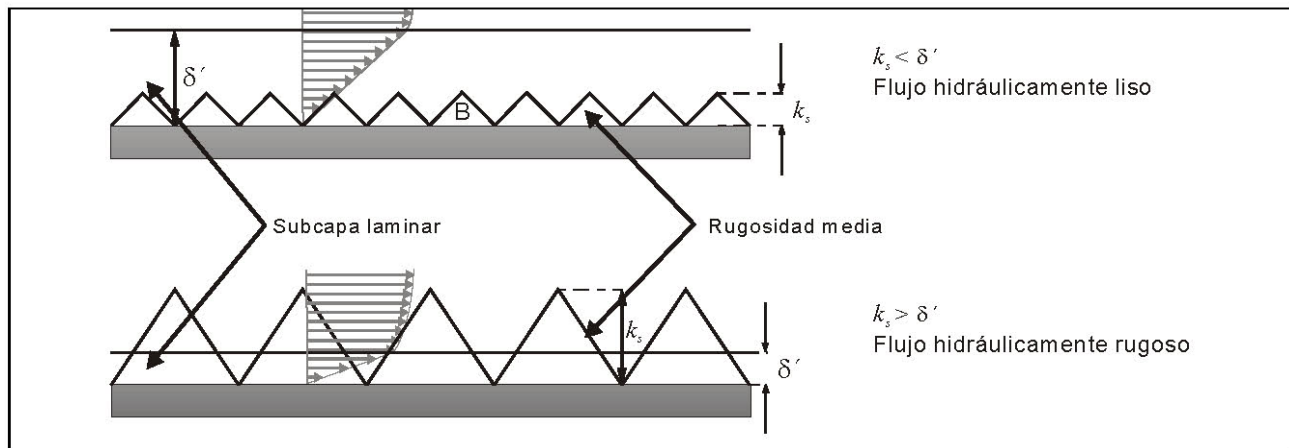


Figura 6-3 Flujos hidráulicamente liso y rugoso

Cuando el flujo es turbulento ($Re > 5000$) hidráulicamente liso, la rugosidad de la tubería se encuentra por debajo de la subcapa laminar viscosa, y por lo tanto, no afecta las pérdidas de energía que se generan en la zona turbulenta por encima de esta capa. Por el contrario, cuando el flujo es hidráulicamente rugoso, la rugosidad supera el espesor de la subcapa laminar y por lo tanto interfiere en el flujo de agua por encima de ésta capa, generando una pérdida de energía al paso del agua.

Prandtl y Von Kármán, definieron el espesor de la subcapa laminar viscosa como se expresa en la Ecuación 6-2.

$$\delta' = \frac{11,6\nu}{V_*} \quad \text{Ecuación 6-2}$$

En la ecuación anterior, ν representa la viscosidad cinemática (Equivalente a ρ/μ), y V_* representa la velocidad de corte del fluido. Esta velocidad, mide la magnitud relativa del esfuerzo cortante en la superficie fluido – pared sólida, y se puede calcular mediante la Ecuación 6-3:

$$V_* = \sqrt{\frac{f}{8} \bar{V}} \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Colebrook – White, luego de diferentes estudios determinaron los límites que diferencian los flujos hidráulicamente liso, rugoso y transicional de esta forma:

- Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso:

$$k_s \leq 0.305 \delta' \quad \text{Ecuación 6-4}$$

- Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso:

$$k_s \geq 6.10 \delta' \quad \text{Ecuación 6-5}$$

- Flujo en Transición:

$$0.305 \delta' \leq k_s \leq 6.10 \delta' \quad \text{Ecuación 6-6}$$

6.3 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA

6.3.1 Pérdidas por Fricción

Durante su paso a través de la tubería, el fluido va perdiendo energía de presión debido a la fricción que se genera en la pared interna de ésta. Esta pérdida de cabeza depende del diámetro de la tubería (d), de la longitud recorrida por el fluido (l), la cabeza de velocidad de éste ($v^2/2g$), y un factor de fricción (f) que depende del número de Reynolds (Re) y la rugosidad absoluta de la tubería (k_s). La ecuación que mejor describe esta pérdida de energía fue deducida por Henry Darcy y Julius Weisbach, y se conoce como la ecuación de Darcy – Weisbach:

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 6-7}$$

El factor f como se dijo anteriormente, es una función de Re y k_s , y por lo tanto, varía dependiendo de si el flujo es laminar o turbulento (dependiendo de Re), y siendo este último podría ser turbulento hidráulicamente liso, rugoso o en transición (dependiendo de la relación entre k_s y δ' descrita anteriormente). Por lo tanto, el factor de fricción se puede calcular de las siguientes maneras:

- Si el flujo es laminar:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 6-8}$$

- Si el flujo es Turbulento:

- Hidráulicamente Liso

$$f = \frac{0.316}{\text{Re}^{0.25}} \quad \text{Blassius} \quad \text{Ecuación 6-9}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} (\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8 \quad \text{Prandtl - Von kármán} \quad \text{Ecuación 6-10}$$

- Hidráulicamente Rugoso

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} \left(\frac{d}{k_s} \right) + 1.14 \quad \text{Prandtl - Von kármán} \quad \text{Ecuación 6-11}$$

- En transición

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Colebrook - White} \quad \text{Ecuación 6-12}$$

Esta última ecuación, la ecuación de Colebrook – White es la ecuación más general para el cálculo del factor de fricción pues involucra todos los tipos de flujo. Reagrupando las ecuaciones Ecuación 6-7 y Ecuación 6-12 se obtiene una única ecuación para el cálculo de las pérdidas de fricción en los tramos de tubería.

$$V = \frac{-2\sqrt{2gdh_f}}{\sqrt{f}} \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51v\sqrt{f}}{d\sqrt{2gdh_f}} \right) \quad \text{Ecuación 6-13}$$

Esta ecuación es explícita para la velocidad en la tubería a partir de todos los datos geométricos de la tubería, de los datos intrínsecos del fluido y de las pérdidas obtenidas.

6.3.2 Diagrama de Moody

Otra forma de encontrar el factor de fricción en las tuberías es a través del diagrama de Moody. Este diagrama representa todo el espectro posible de flujos, desde laminar hasta turbulento hidráulicamente rugoso.

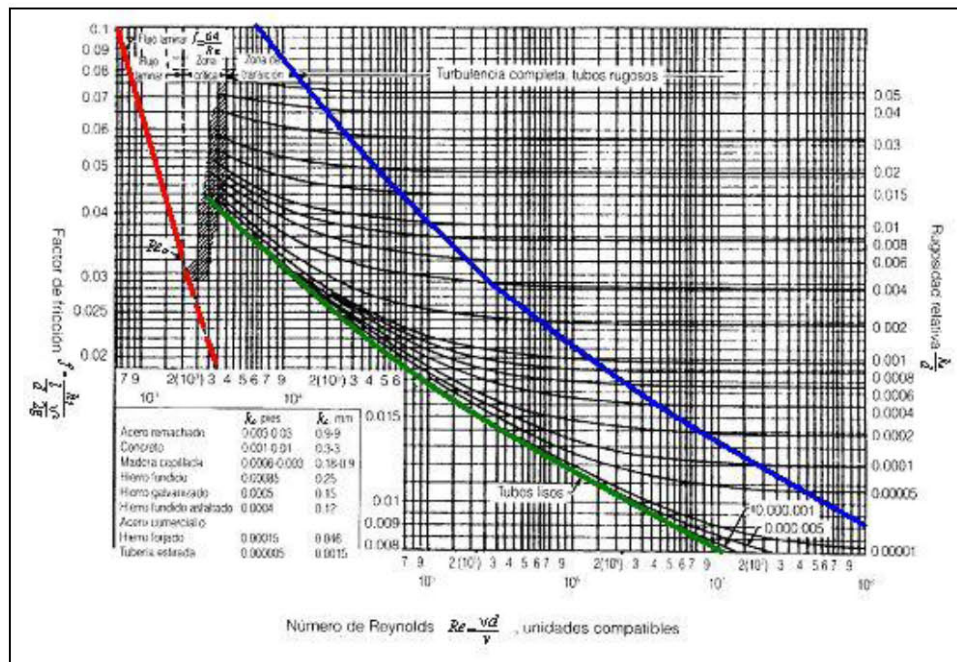


Figura 6-4 Diagrama de Moody

En el diagrama de la Figura 6-4 se pueden diferenciar cuatro zonas: Una primera zona que describe el flujo laminar para números de Reynolds menores a $Re = 2000$. Esta zona se encuentra delimitada por la línea diagonal de color rojo que se encuentra en la parte izquierda de la figura.

Las otras tres zonas describen el flujo turbulento en las tuberías: Flujo turbulento hidráulicamente liso, flujo turbulento hidráulicamente rugoso, y flujo transicional.

- La zona del diagrama que se encuentra a la derecha de la línea de color azul, corresponde a flujos altamente turbulentos en donde el factor de fricción f depende únicamente de la rugosidad relativa. Dentro de esta zona se encuentran las tuberías de materiales rugosos y con números de Reynolds muy altos.
- La zona comprendida entre la línea verde y la línea azul, corresponde a flujo transicional, en donde el factor de fricción f depende tanto de la rugosidad relativa como del número de Reynolds.

- Finalmente, la línea verde corresponde a la zona de flujo turbulento hidráulicamente liso, en donde las pérdidas de energía por fricción dependen exclusivamente del número de Reynolds, ya que la tubería es tan lisa, que su rugosidad no afecta el régimen de flujo.

6.3.3 Pérdidas Menores

Los accesorios ocasionan una pérdida localizada en la cabeza de presión de las tuberías, debido a un cambio ya sea de diámetro, o de dirección o simplemente una unión entre dos tramos de tuberías. Estas pérdidas localizadas, denominadas pérdidas menores, se calculan mediante la Ecuación 6-14.

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 6-14}$$

donde k_m es el coeficiente de pérdidas menores y varía de acuerdo con el tipo de accesorio, el material y el diámetro.

Para ésta investigación únicamente se analizarán las pérdidas en las uniones. En teoría, de acuerdo con Saldarriaga^[15], las uniones tienen un coeficiente de pérdidas menores igual a 0.3.

7 MONTAJE FÍSICO

Mediante el diseño de un montaje físico y la experimentación durante un período determinado de tiempo, se pretenden demostrar dos hipótesis planteadas por dos autores diferentes con respecto al crecimiento y comportamiento de las biopelículas luego de lavados sucesivos. Es importante resaltar que la metodología de estos autores es bastante diferente a la metodología que se va a plantear en esta investigación, ya que uno de los autores realizó una modelación matemática, y el otro realizó un montaje físico pero a una escala sustancialmente menor que la que se utiliza en este caso.

La primera hipótesis que se pretende comprobar fue enunciada por Picioreanu *et al*^[13], quien plantea que luego de un evento de desprendimiento, en este caso un lavado, la biopelícula continúa con su proceso de crecimiento pero no alcanza nuevamente la cantidad de biomasa acumulada antes de dicho evento. Por lo tanto, mediante la experimentación se buscará demostrar si luego de lavados sucesivos, con una frecuencia determinada, se logra controlar la formación de biopelículas, haciendo que cada vez que se lave se llegue a un nivel más bajo de biomasa adherida.

En la Figura 7-1 se muestran los resultados de la modelación de este autor. En esta gráfica se observa que el nivel máximo de biopelícula acumulada cada vez es menor. Adicionalmente, las líneas verticales esquematizan la biomasa desprendida. En este caso, se puede ver que a través del tiempo, la biomasa desprendida es cada vez menor.

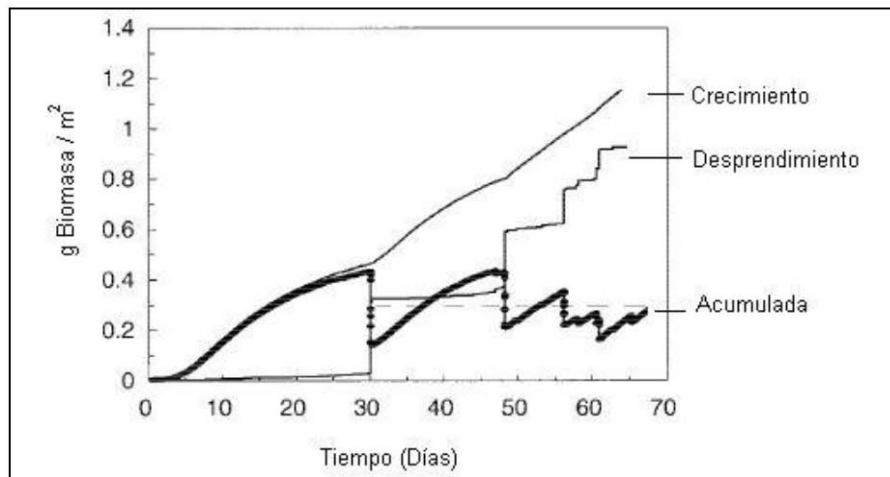


Figura 7-1 Modelación de biomasa adherida luego de lavados sucesivos

Por otro lado, Kwow *et al.*^[8], explica que las fuerzas de desprendimiento promueven la densificación de la biopelícula pues se vuelven a exponer al flujo de agua las capas inferiores de ésta. A medida que se somete la biopelícula a esfuerzos mayores, se densifica cada vez más la estructura, y por lo tanto se vuelve cada vez más resistente a futuros lavados. De esta forma, se explica que llega un punto en el que la cantidad desprendida es despreciable, no debido a que dejó de formarse la biopelícula sino a que alcanzó un nivel de resistencia tal, que la alta velocidad del agua de lavado no logra desprender la biomasa.

Adicionalmente, se pretende demostrar que con el tiempo las tuberías se vuelven más rugosas y que el efecto de los lavados es benéfico en cuanto a las pérdidas de energía, es decir, comprobar que luego de un lavado las pérdidas se hacen menores de lo que eran antes de éste. En el caso de los accesorios, o uniones, el resultado es inverso: Al aumentar el crecimiento de biopelículas, las pérdidas en las uniones disminuyen, mientras que luego de los lavados las pérdidas vuelven a aumentar debido a que se desprende la biomasa que hacía que el flujo por la unión fuera más uniforme.

7.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

Como se mencionó en el capítulo 4, numeral 4.2, el montaje de laboratorio que se utilizó en esta investigación fue utilizado previamente por el ing. Luis Fernando Muñoz en su investigación titulada *Velocidad de Desprendimiento de las Biopelículas en Tuberías de Distribución de Agua Potable*^[9]. Por esta razón, no se diseñaron todos los elementos del montaje sino que el presente trabajo de investigación se adaptó al montaje existente, realizando algunas modificaciones que se explicarán a continuación.

7.1.1 Descripción General

En la Figura 7-2 se observa un esquema general del montaje. El agua parte de un tanque subterráneo hacia un segundo tanque de 2 m de altura, mediante el uso de una bomba de 12 Hp (8.95 KWatts). Este segundo tanque cuenta con una tubería de recirculación localizada aproximadamente 20 cm por debajo del nivel máximo del tanque. De esta forma, el agua se mantiene a un nivel constante de aproximadamente 1.8 m y el agua sobrante regresa al tanque subterráneo para ser bombeada nuevamente.

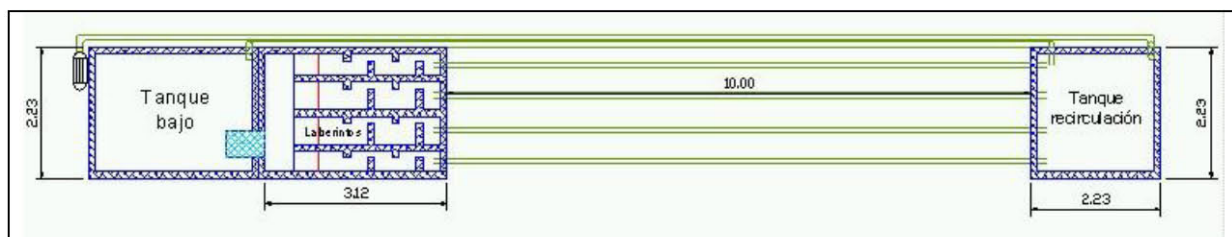


Figura 7-2 Esquema general del montaje

Del segundo tanque, de cabeza constante, parten cuatro tuberías de 10 m de longitud pero de diferentes diámetros y características: Tres tuberías de PVC de 2.5, 3 y 4 pulgadas respectivamente, y una cuarta tubería de 4" en PVC Biaxial. La distribución de estas tuberías se muestra en la Figura 7-3. Comercialmente, las tuberías de PVC se encuentran en tramos de 6m. Por esta razón, en el montaje se utiliza un tramo de 6 metros otro de 4 m, unidos mediante una unión soldada en el caso de las tuberías de PVC. Las tuberías de Biaxial son campana – espigo, por lo que esta unión se realiza directamente entre los dos tramos de tubería, sin necesidad de utilizar un accesorio adicional.

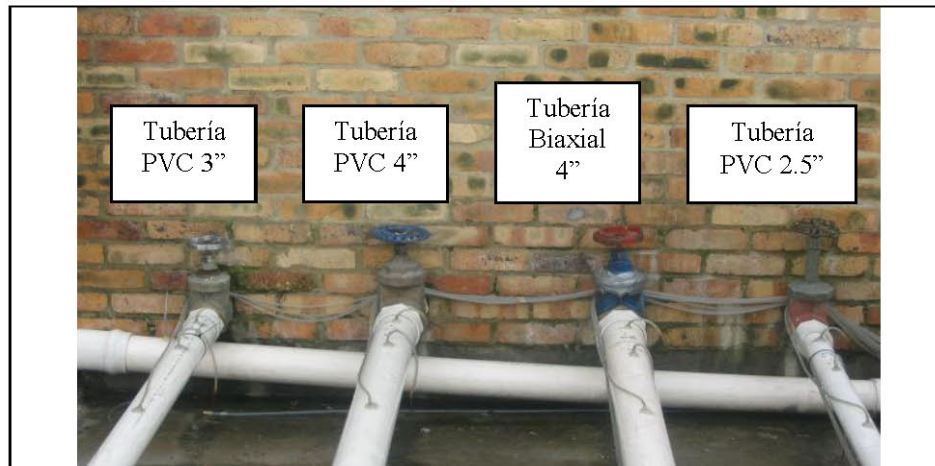


Figura 7-3 Tuberías del Montaje

Los cuatro tramos de tuberías llegan respectivamente a cuatro canales de quietamiento, con una estructura de medición de caudal al final. El agua luego retorna al tanque subterráneo, cerrando de esta forma el circuito del montaje.

Para controlar el caudal en cada una de las tuberías se utilizaron válvulas de compuerta ubicadas aguas abajo del tanque de cabeza constante. La ubicación de estas válvulas también se observa en la Figura 7-3.

7.1.2 Medición de la Velocidad de Flujo

Como se dijo anteriormente, cada tubería cuenta con un vertedero para medir el caudal individual que pasa por ésta. Los vertederos tienen forma triangular (dado que esta forma particular es muy sensible a variaciones en caudales pequeños), con 60° de apertura y una altura suficiente para permitir el paso del caudal máximo.

En el ANEXO 1 se presentan las tablas de datos, cálculos y las curvas de calibración de todos los vertederos. Al comparar las curvas de calibración con las curvas teóricas para un vertedero con las mismas características se puede observar que las curvas experimentales siempre están por debajo de la curva teórica. Esta diferencia entre las dos curvas puede ser debido a que el ángulo de los vertederos no es exactamente 60° o a que no se cumple con la distancia mínima de medición con la aguja limnimétrica.

A pesar de esta diferencia, se realizó una verificación de la curva obtenida para cada vertedero dando resultados que se ajustan muy bien a las curvas respectivas, por lo tanto, se puede concluir que las curvas de calibración se encuentran bien calculadas y representan adecuadamente el caudal que está pasando por cada uno de los vertederos. En la Tabla 7-1 se muestran las curvas de calibración resultantes:

Tabla 7-1 Ecuaciones de calibración de los vertederos

Vertedero	Tubería	Ecuación de Calibración
1	PVC de 3"	$Q = 0.0126 (H - H_0)^{2.3341}$
2	PVC de 4"	$Q = 0.017 (H - H_0)^{2.27}$
3	Biaxial de 4"	$Q = 0.0121 (H - H_0)^{2.3812}$
4	PVC de 2.5"	$Q = 0.0129 (H - H_0)^{2.3812}$

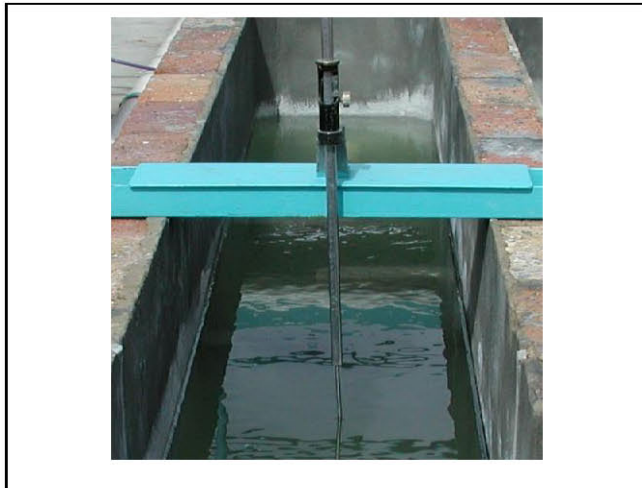


Figura 7-4 Aguja Limnimétrica

La ventaja de contar con curvas de calibración radica en que se simplifica el cálculo del caudal para cada prueba ya que sólo es necesario leer la altura de la lámina de agua mediante el uso una aguja limnimétrica como se muestra en la Figura 7-4. La precisión de esta aguja es décimas de milímetro, por lo que el valor del caudal obtenido mediante este método es muy confiable.

A partir de los valores obtenidos de caudal para cada vertedero, y utilizando el diámetro interno real de cada una de las tuberías del montaje, es posible calcular la velocidad del flujo de agua en cada una de ellas.

7.1.3 Medición de las Pérdidas de Energía

Con el fin de evaluar el comportamiento de las pérdidas de energía en los diferentes tramos de tuberías se utilizaron piezómetros para medir la presión en varios puntos. Cada tubería está instrumentada con tres piezómetros: Uno inmediatamente aguas abajo de la válvula; uno aproximadamente 5 metros aguas abajo de éste, localizado antes de la unión, o la campana en el caso de la tubería de biaxial; y el tercero luego de esta unión. De esta forma, en cada una de las tuberías se pueden medir las pérdidas por fricción en el tramo de aproximadamente 5 m mediante el uso de los dos primeros piezómetros, y adicionalmente es posible cuantificar las pérdidas menores que se producen en la unión, mediante el uso de los dos últimos piezómetros. En la Figura 7-5 se muestra la unión de la tubería de 4" con los piezómetros antes y después de ésta.



Figura 7-5 Instrumentación de la unión de 4"

En total se cuenta con 12 piezómetros que se conectan al tablero de medición que se muestra en la Figura 7-6 (a). En este tablero se pueden leer las diferencias de presión entre los piezómetros para un caudal determinado. En la Figura 7-6 (b) se muestra una fotografía tomada durante el período de pruebas para dos de las tuberías. En esta figura se pueden observar las diferencias en las lecturas de los piezómetros durante un lavado.

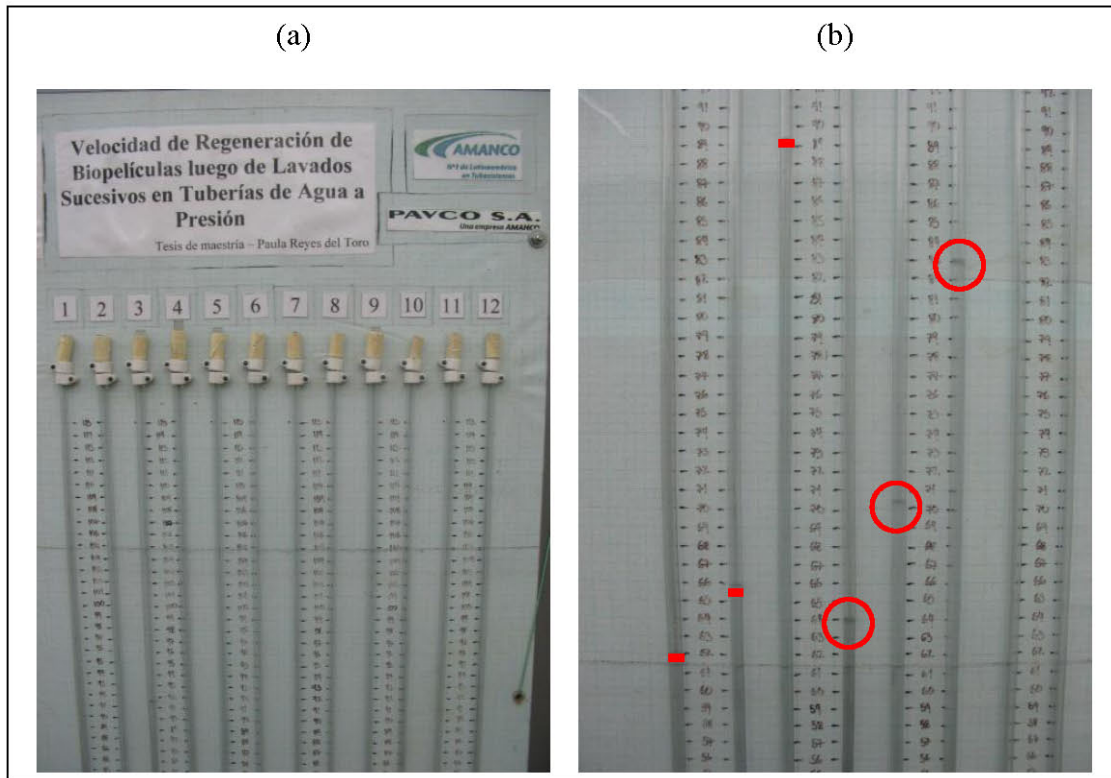


Figura 7-6 Tablero de medición de piezómetros

Los piezómetros se numeraron de tres en tres, siendo el primero de cada tubería el piezómetro ubicado aguas abajo de la unión, y sucesivamente hacia aguas arriba. Es de esperarse por lo tanto, que el piezómetro 1 tenga menos energía que el 2 y éste a su vez menos energía que el 3, como se observa en la Figura 7-6 (b). Los tres primeros piezómetros corresponden a la tubería de 3" en PVC. Del 4 al 6 corresponden a la tubería de 4" en PVC. Del 7 al 9 a la tubería de 4" en PVC Biaxial y los últimos tres piezómetros, del 10 al 12, corresponden a la tubería de 2.5".

7.1.4 Medición del Crecimiento de Biopelículas

Para evaluar el crecimiento de las biopelículas y su comportamiento bajo diferentes condiciones de flujo se utilizaron testigos del mismo material y diámetro de cada una de las tuberías. Un testigo es un fragmento de la tubería que puede ser extraído con facilidad y sirve para observar la biopelícula que se va acumulando en el interior de ésta.

Los testigos son colocados en los soportes que se muestran en la Figura 7-7 para cada una de las tuberías. Como se observa, cada tubería cuenta con un soporte que contiene espacio para 13 testigos: Doce a lo largo del tramo y uno en el borde.



Figura 7-7 Soportes de los testigos para las cuatro tuberías

Con el fin de no alterar la medición de las pérdidas de energía explicadas anteriormente, estos soportes se localizaron aguas abajo de los 10 m de tramo de tubería, dentro de los canales de aproximación a los vertederos. Estos soportes, mediante el uso de adaptadores, macho y hembra, pueden ser desenroscados para facilitar el proceso de extracción y colocación de cada uno de los testigos en el momento en que es usado. La ubicación dentro del montaje y el detalle de la unión se observan en la Figura 7-8.



Figura 7-8 Localización de los testigos en el montaje. Muestreador Biaxial de 4"

Como se dijo anteriormente, en esta investigación se utilizaron dos tipos de testigos: El primero de ellos fue llamado un testigo de borde, que como su nombre lo indica se encuentra localizado en el borde del soporte. Estos testigos fueron diseñados para que su extracción y posterior colocación fueran muy fáciles de realizar sin alterar la biopelícula adherida, dado que estos testigos sirven para controlar el crecimiento progresivo de las biopelículas. En la Figura 7-9 se pueden observar los cuatro testigos del borde, uno para cada una de las tuberías.



Figura 7-9 Testigos del borde para evaluar crecimiento progresivo de biopelícula

Estos testigos, de aproximadamente 12 cm de largo por 5 cm de ancho, están pegados a dos anillos cuyo diámetro interno corresponde al diámetro externo de cada una de las tuberías. De esta forma, los anillos sirven de guía para la buena colocación del testigo, al mismo tiempo que evitan que éste se desplace hacia adentro de la tubería o se salga de ella. En la Figura 7-10 se muestra una secuencia de fotografías con el proceso de colocación de éstos testigos.



Figura 7-10 Proceso de colocación del testigo del borde. En este caso para PVC de 4"

Idealmente, el borde de estos testigos debe alterar lo menos posible las líneas de corriente del flujo, y de esta forma, garantizar que no se genere un factor externo diferente que favorezca o evite el crecimiento de las biopelículas. En la Figura 7-11 se observa la superficie interna de una de las tuberías con el testigo del borde colocado.



Figura 7-11 Vista interna del muestreador de PVC de 4" con el testigo del borde colocado

El segundo tipo de testigos son los testigos desechables, pues su objetivo es utilizarlos únicamente una vez durante el período de pruebas. La biopelícula adherida a la superficie interna de estos testigos puede ser retirada con el fin de hacer análisis microbiológicos o de densidad de la biopelícula. Como se observa en los soportes de estos testigos, se diseñaron 6 filas de a 2 testigos. La idea de este diseño es utilizar estos testigos para evaluar la efectividad de los lavados, y por lo tanto extraer uno de los testigos antes del lavado para evaluar las condiciones previas, y el otro luego de realizado el lavado, para efecto de comparación entre las condiciones pre y post lavado.

Para evitar que la extracción de los testigos de un lavado afecte a los testigos de los lavados subsiguientes, los primeros testigos que se deben utilizar son los que se encuentran localizados aguas abajo, cerca al testigo del borde, y sucesivamente hacia aguas arriba.

En la Figura 7-12 se observa este segundo tipo de testigos. Para facilitar el manejo de los testigos, y evitar que se caigan dentro de la tubería o ingresen más de lo que deben, se colocó una abrazadera cuyo diámetro interno es idéntico al diámetro exterior de cada uno de los testigos.

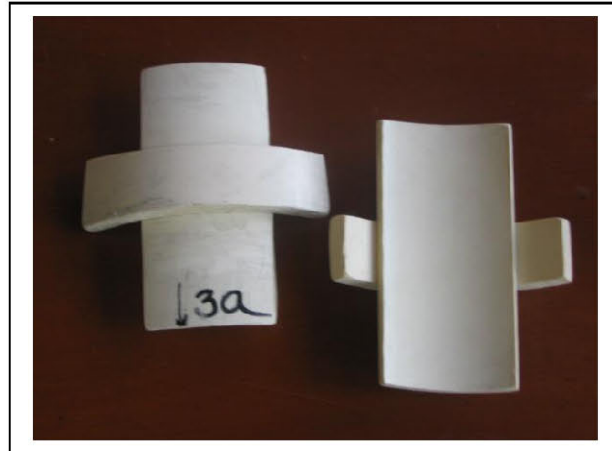


Figura 7-12 Testigos desechables de PVC 4"

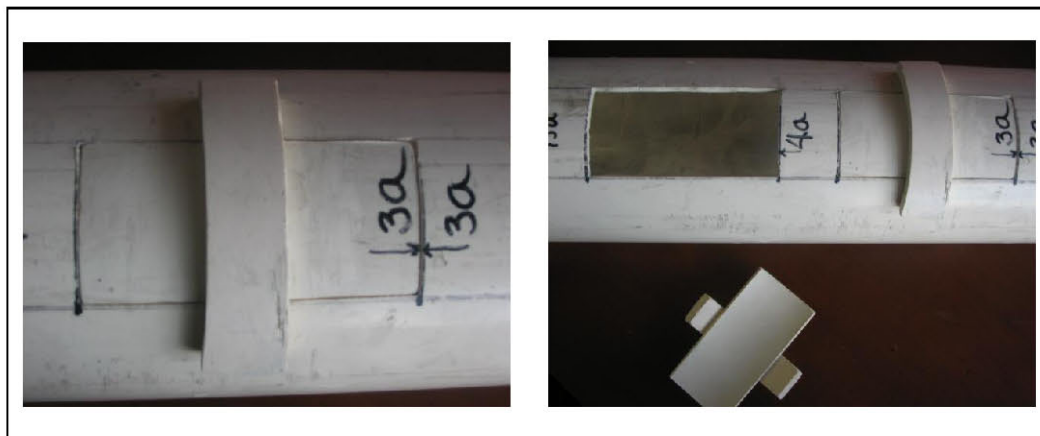


Figura 7-13 Vista externa del testigo colocado

En la Figura 7-13 se observa la manera en la que encaja cada uno de los testigos desechables en el soporte, mientras que en la Figura 7-14 se observa la superficie interna de estos testigos, que al igual que los testigos del borde, intentan alterar lo menos posible las líneas de flujo del agua.



Figura 7-14 Vista interna de los testigos colocados

A diferencia que los testigos del borde, este segundo tipo de testigos no tiene ningún soporte que evite que se salgan los testigos. Por esta razón fue necesario sellar los bordes con silicona como se muestra en la Figura 7-15. Este sello puede no ser hermético, sin embargo evita que se desprenda el testigo.

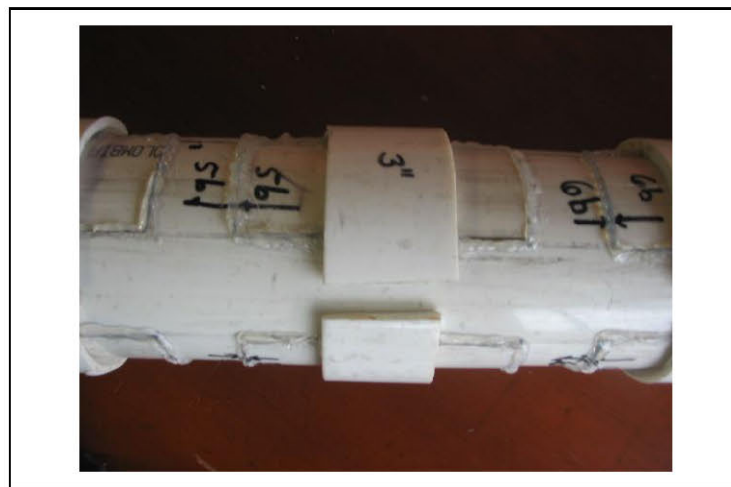


Figura 7-15 Muestreador sellado, listo para colocarse como en la Figura 7-8

Por estar dentro de los canales de aproximación a los vertederos, todo el sistema de medición de biopelículas se encuentra sumergido dentro del flujo de agua lo que garantiza que el flujo en las tuberías y en estos dispositivos siempre va a estar presurizado.

7.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

A continuación se describe el funcionamiento del sistema, el período de pruebas y las metodologías utilizadas tanto para la medición de los diferentes parámetros involucrados en el desarrollo de la investigación, como para el análisis de los datos obtenidos.

7.2.1 Período de pruebas

Para el desarrollo experimental de esta investigación, se diseñó un período de pruebas de 120 días. Previo a este período, se realizó la adaptación del modelo existente: El cambio de tuberías del montaje, las obras de mampostería anexas, y la construcción de los sistemas de medición, es decir, los soportes y testigos de cada tubería y la instrumentación mediante piezómetros. Esta etapa previa duró aproximadamente 40 días, entre el 17 de Enero y el 25 de Febrero.

Adicionalmente, entre el 28 de Febrero y el 10 de Marzo, se contó con 10 días para realizar la calibración de los vertederos y para conocer a fondo el funcionamiento del modelo.

El 11 de Marzo se inició el período de pruebas como tal. Como se dijo anteriormente éste es de 120 días, y por lo tanto finalizó el 8 de Julio de 2005. Durante este período se pueden diferenciar dos fases: La primera fase correspondiente a la adaptación inicial y crecimiento de la biopelícula bajo las mismas condiciones hidrodinámicas. Esta primera fase tiene una duración de 50 días, durante los cuales se recirculaba, se agregaban nutrientes y se mantenía un control del crecimiento progresivo de las biopelículas, procedimientos que se explicarán en detalle más adelante.

La segunda fase fue llamada fase de lavados, y tiene una duración de 70 días. En esta fase se realizaron 4 lavados diferentes además de todos los procedimientos mencionados anteriormente.

En la Tabla 7-2 se muestran las fechas más relevantes durante el desarrollo de la parte experimental de ésta investigación. Como puede observarse en la tabla, se fijó una frecuencia entre lavados de 20 días, y por lo tanto se realizan lavados en los días 50, 70, 90 y 110 respectivamente.

Tabla 7-2 Fechas importantes durante el período de pruebas

FASE	DÍA	FECHA	EVENTO
Fase 1: Adaptación y Crecimiento	1	Marzo 11 de 2005	Inicio de las pruebas
Fase 2: Lavados	50	Abril 29 de 2005	Primer Lavado
	70	Mayo 19 de 2005	Segundo Lavado
	90	Junio 8 de 2005	Tercer Lavado
	110	Junio 28 de 2005	Último Lavado
	120	Julio 8 de 2005	Fin del período de Pruebas

En el ANEXO 2 se presenta una bitácora diaria de las diferentes actividades realizadas durante el período de pruebas. En este anexo se incluyen los días en los que se agregaron nutrientes, cuándo se realizaron pruebas de piezómetros, cuándo se pesaron los testigos, las actividades durante cada lavado y los días de toma de fotos.

7.2.2 Medición de los Diferentes Parámetros

Existen diferentes parámetros que deben ser monitoreados durante el período de pruebas como son los nutrientes que son agregados para potencializar el crecimiento; la velocidad de recirculación diaria que debe tratar de mantenerse constante; las pérdidas de energía tanto de fricción como menores a través de las diferencias en las lecturas de los piezómetros; el crecimiento de las biopelículas mediante el uso de los dos tipos de testigos descritos; y todos los parámetros asociados con los lavados. A continuación se explica cada uno de estos parámetros en detalle.

7.2.2.1 Nutrientes

Con el fin de acelerar el crecimiento de las biopelículas durante los 120 días de pruebas, es necesario el uso de nutrientes. Las bacterias encuentran en el agua los nutrientes necesarios para su desarrollo, siendo los más importantes el carbono, el nitrógeno y el fósforo.

Las proporciones de carbono, nitrógeno y fósforo de una biopelícula aerobia dentro de un sistema de distribución son 10.5 / 5 / 1 respectivamente. Esta proporción es la que se utiliza para calcular la cantidad de nutrientes que deben ser agregados al modelo de recirculación.

Como fuente de carbono se utiliza la panela en polvo, que es sacarosa cuya fórmula química es $C_{12}H_{22}O_{11}$. Como fuente de nitrógeno y fósforo se utiliza el fosfato di – amónico (DAP) cuya fórmula es $(NH_4)_2PO_4$.

- Peso Molecular de los compuestos:

H:	1	}	
O:	16		
C:	12		
N:	14		
P:	31		
			1 mol $C_{12}H_{22}O_{11}$ = 342 g
			1 mol $(NH_4)_2PO_4$ = 132 g

- Cálculo de la cantidad de sacarosa para cumplir con la proporción de 10.5g de C

$$10.5g C \cdot \frac{1mol C}{12g C} \cdot \frac{1mol C_{12}H_{22}O_{11}}{12mol C} \cdot \frac{342g}{1mol C_{12}H_{22}O_{11}} = 24.94g C_{12}H_{22}O_{11}$$

- Cálculo de la cantidad de DAP para cumplir con la proporción de 5g de N

$$5g N \cdot \frac{1mol N}{14g N} \cdot \frac{1mol (NH_4)_2PO_4}{2mol N} \cdot \frac{132g}{1mol (NH_4)_2PO_4} = 20.63g (NH_4)_2PO_4$$

- Cálculo de la cantidad de sacarosa para cumplir con la proporción de 1g de P

$$1g P \cdot \frac{1mol P}{31g P} \cdot \frac{1mol (NH_4)_2PO_4}{1mol P} \cdot \frac{132g}{1mol (NH_4)_2PO_4} = 4.26g (NH_4)_2PO_4$$

De acuerdo con los cálculos anteriores, es necesario agregar aproximadamente 25 g de sacarosa y 21 g de DAP para cumplir con los requerimientos mínimos de nutrientes. Esto quiere decir que la cantidad disponible de fósforo va a ser aproximadamente 5 veces la necesaria, pero debe ser así pues de lo contrario haría falta nitrógeno en lugar de sobrar fósforo. Con estas cantidades, la nueva proporción C / N / P es 10.53 / 5.09 / 4.93.

La frecuencia con la cual se agregan los nutrientes es escogida aleatoriamente, y se fijó en tres días. Cada tercer día se agregan estos dos compuestos en el tanque de aguas arriba durante la recirculación.

7.2.2.2 Recirculación diaria

En el Diagrama de Flujo 7 – 1 se observa el procedimiento que se llevó a cabo para manejar la recirculación diaria en el montaje, con el fin de mantener una velocidad constante en todas las tuberías de 0.5 m/s.

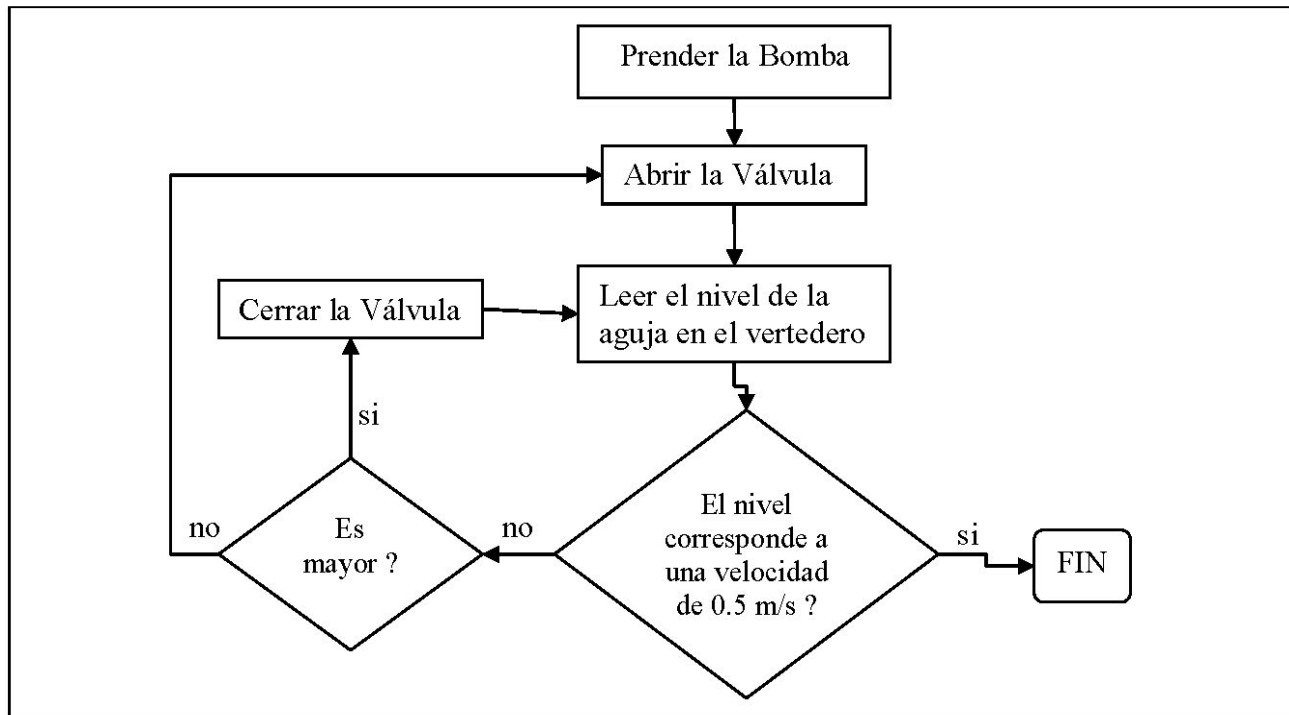


Diagrama de Flujo 7-1 Procedimiento para recircular diariamente

Diariamente, durante diferentes períodos de tiempo se prendía el montaje con la velocidad de recirculación mencionada, con el fin de promover el intercambio de nutrientes y oxígeno en la biopelícula en formación.

7.2.2.3 Pérdidas de energía

Cada una de las pruebas de piezómetros se llevó a cabo mediante el procedimiento que se describe en el Diagrama de Flujo 7.2

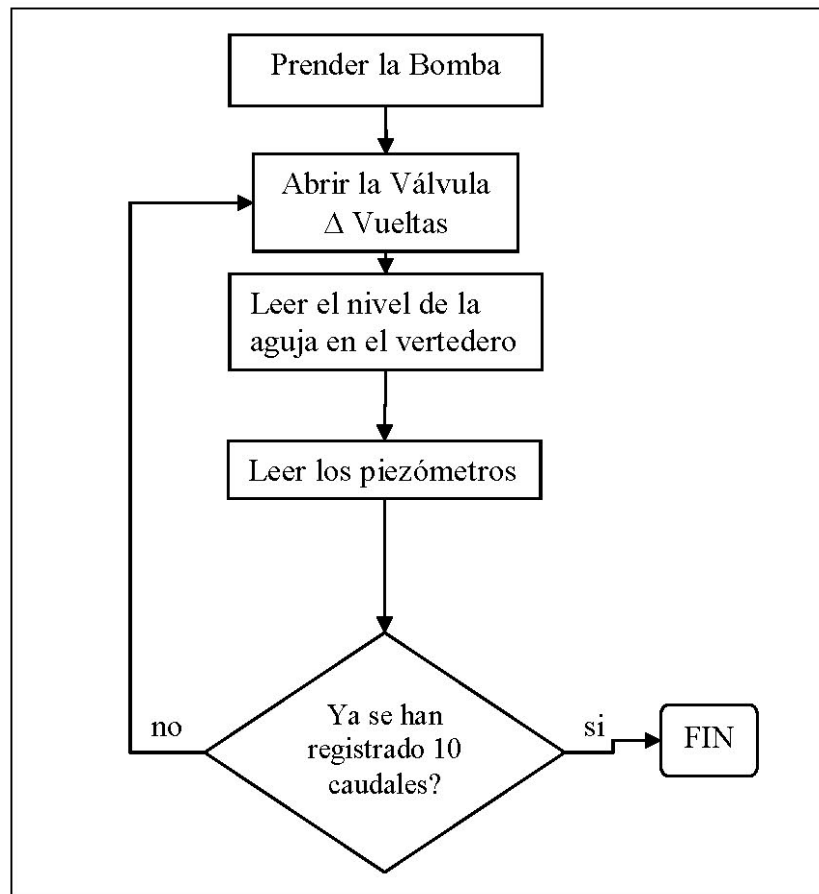


Diagrama de Flujo 7-2 Procedimiento de una prueba de piezómetros

En total se realizaron 19 pruebas de piezómetros para evaluar el comportamiento de las pérdidas de energía durante las dos fases de experimentación. Los caudales se variaron hasta lograr números de Reynolds entre $Re = 20000$ y $Re = 60000$ aproximadamente, con el fin de evitar desprendimiento de las biopelículas durante estas pruebas.

7.2.2.4 Biopelículas

Para evaluar la evolución de las biopelículas en el tiempo se utilizaron únicamente los testigos del borde, que podían ser manipulados fácilmente de acuerdo con su diseño. En el Diagrama de Flujo 7-3 se observan los pasos que se siguieron para pesar los testigos del borde a lo largo del período de pruebas.

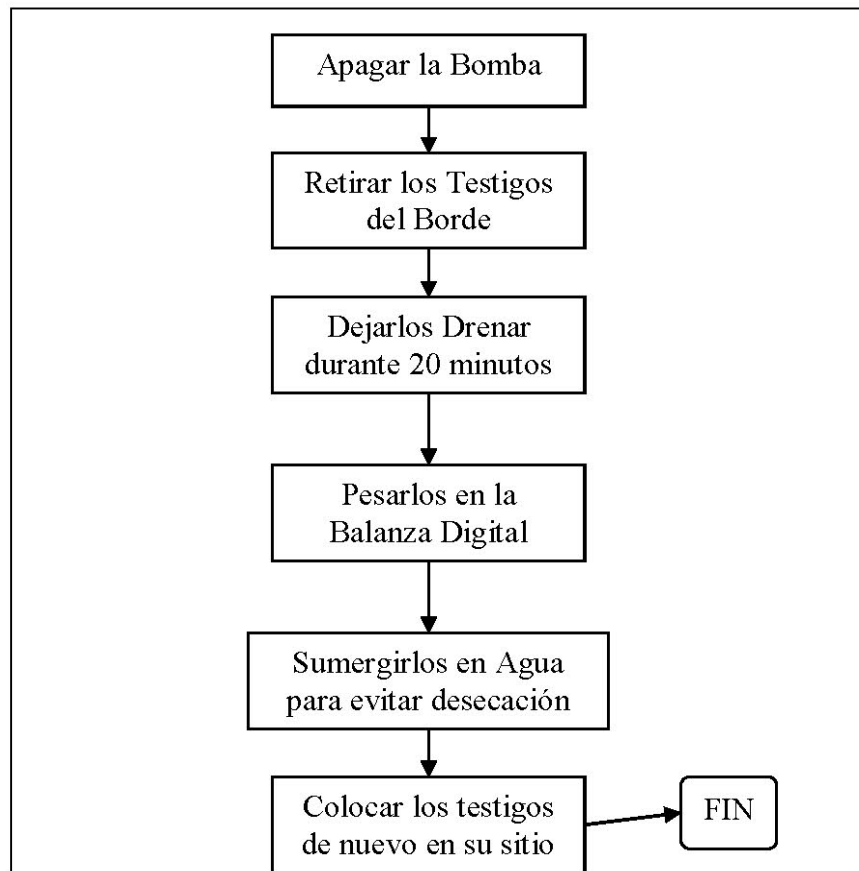


Diagrama de Flujo 7-3 Procedimiento de pesaje de los testigos del borde

7.2.2.5 Lavados

Para evaluar la eficiencia de remoción de biopelículas durante los lavados, se utilizaron los testigos desechables descritos anteriormente. El procedimiento de cada uno de los lavados se presenta en el Diagrama de Flujo 7-4.

En cada lavado se extraen dos testigos: El testigo del lado derecho antes del lavado para evaluar la cantidad de biomasa adherida antes del lavado, y el testigo del lado izquierdo para evaluar la cantidad de biomasa que quedó luego de éste. Para hacer que los resultados sean comparativos entre testigos y entre tuberías, se normalizaron éstos dividiendo el peso registrado entre el área efectiva de cada testigo.

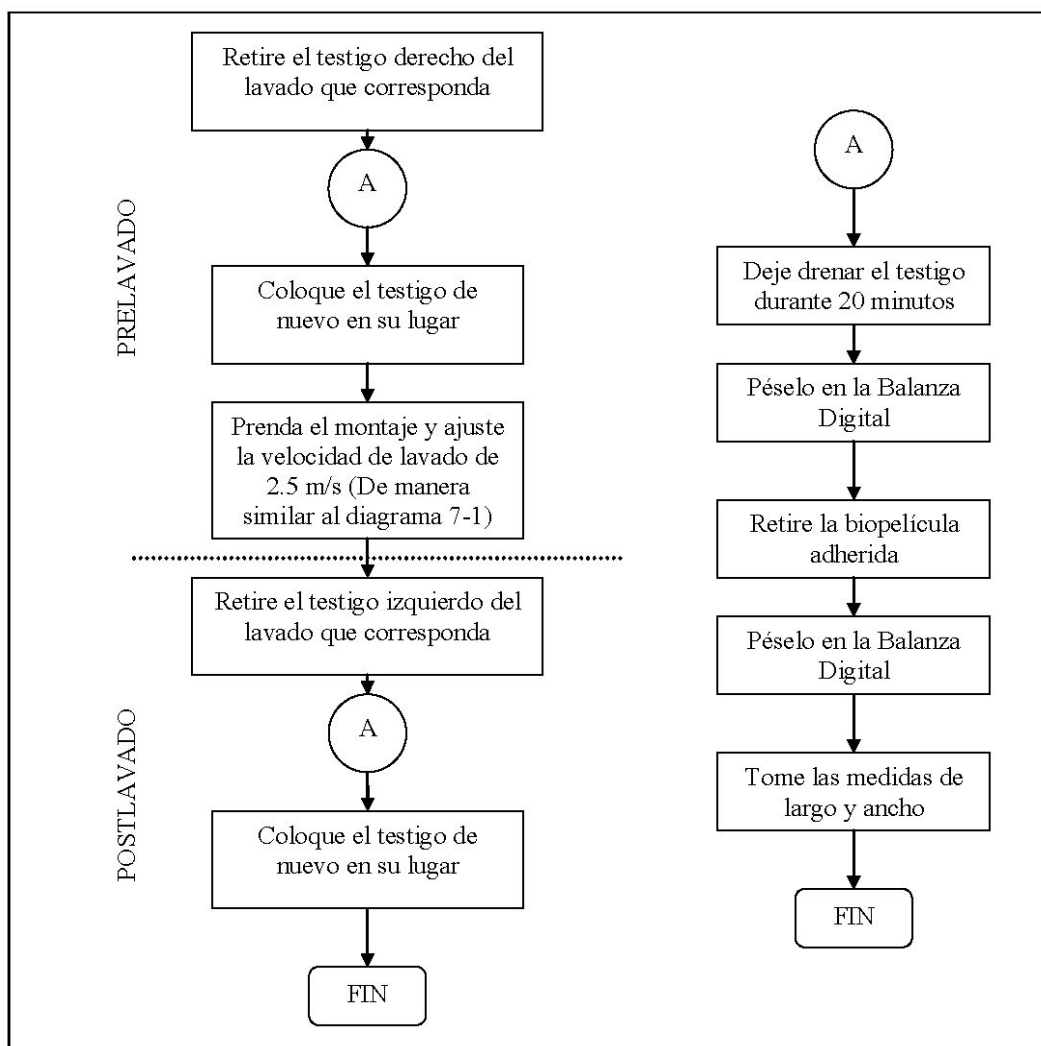


Diagrama de Flujo 7-4 Procedimiento de lavado

Los testigos luego de ser pesados con biopelícula, eran limpiados y pesados nuevamente, debido a que el peso inicial registrado antes de iniciar las pruebas podía ser alterado por la silicona adherida al testigo. Por esta razón se decidió hacer el procedimiento descrito en A.

8 RESULTADOS

Durante el desarrollo experimental del presente trabajo de investigación, se realizaron pruebas para determinar la evolución de las biopelículas en el tiempo, la variación de las pérdidas de energía de acuerdo con dicha evolución, y la efectividad de los lavados para controlar el crecimiento de las bacterias. Estas pruebas se llevaron a cabo de acuerdo con los procedimientos enunciados en el numeral 7.2.2.

En la bitácora de pruebas presentada en el ANEXO 2 se puede observar el número de pruebas tanto de evaluación del crecimiento de biopelículas como de cálculo de las pérdidas de energía, y las fechas exactas en que éstas fueron realizadas.

8.1 EVOLUCIÓN DE LA BIOPELÍCULA EN EL TIEMPO

Durante el período de experimentación se mantuvo controlado el crecimiento de las biopelículas en las cuatro tuberías, a través del pesaje de los testigos del borde en la balanza electrónica. Los pesos registrados y los días en los cuales se realizaron estas pruebas se encuentran en el ANEXO 5. Como se explicó en el numeral 7.2.2, los pesos registrados fueron luego normalizados dividiendo el peso registrado entre el área de cada testigo con el fin de contar con una medida de espesor promedio de biopelícula y de esta forma tener un criterio de comparación entre las tuberías de diferentes diámetros.

En la Figura 8-1 se observa el comportamiento del crecimiento para la tubería de 2.5" en PVC. En esta gráfica se observa que a pesar de los lavados el crecimiento de la biopelícula en el tiempo es progresivo, llegando a ser aproximadamente 60 μm en el día 110 de experimentación.

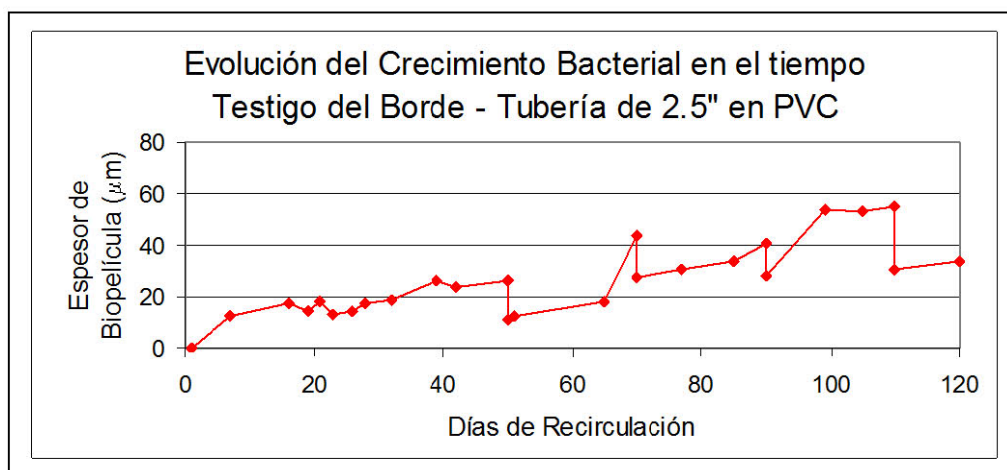


Figura 8-1 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 2.5" en PVC en el testigo del borde

De manera similar, en la Figura 8-2 se presenta la gráfica para la tubería de 3" en PVC. Durante los primero 50 días de experimentación, el crecimiento fue muy parecido al registrado en la tubería de 2.5". Durante los 20 días siguientes se observa un crecimiento mayor, registrando un espesor promedio de biopelícula de 60 µm, a diferencia de los 40 µm que se registró en el día 70 en la tubería de 2.5". Luego, el crecimiento en esta tubería se detuvo, manteniendo aproximadamente el espesor alcanzado luego del segundo lavado, siendo éste controlado por los lavados subsiguientes.

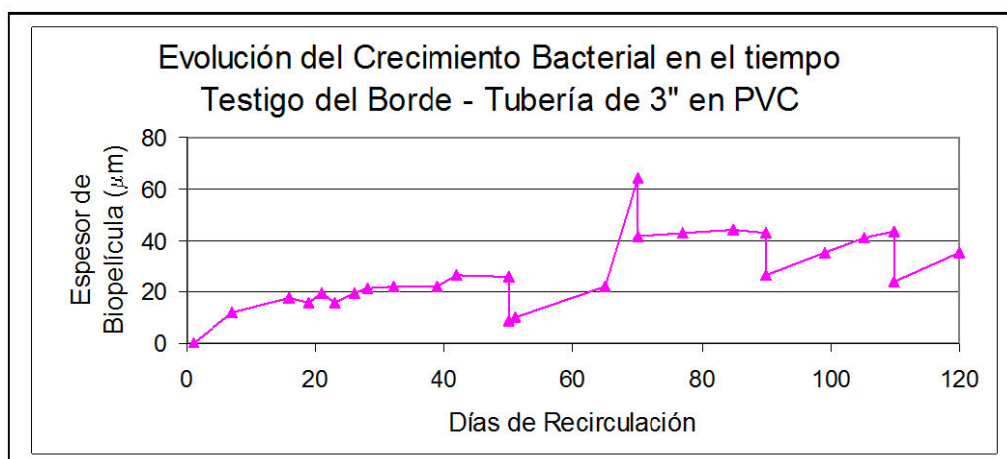


Figura 8-2 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 3" en PVC en el testigo del borde

En la Figura 8-3 se observa el comportamiento de la tubería de 4" en PVC. Al igual que la tubería de 2.5", los lavados no parecen afectar el crecimiento de las biopelículas a través del tiempo, siendo éste progresivo hasta alcanzar un espesor aproximado de 70 μm . El espesor alcanzado antes de cada uno de los lavados es fácilmente alcanzado luego de éste. Comparando los resultados de esta tubería con los dos anteriores se observa que el crecimiento en esta tubería duplica el crecimiento registrado en las otras, demostrando una relación directa entre el crecimiento de la biopelícula y el diámetro de la tubería, bajo las mismas condiciones hidrodinámicas.

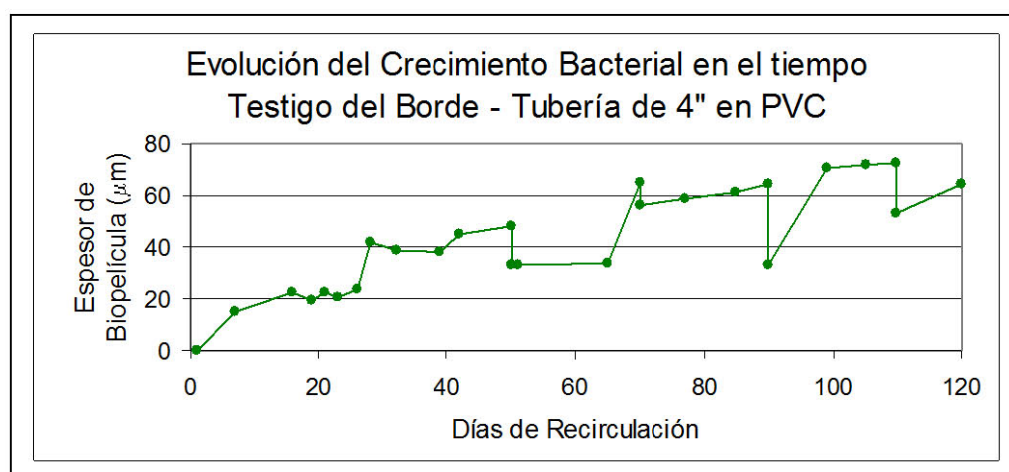


Figura 8-3 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 4" en PVC en el testigo del borde

Finalmente, en la Figura 8-4 se observa la evolución del crecimiento en la tubería de Biaxial. Los resultados en esta tubería llegan únicamente hasta el día 90 debido a una falla en la válvula de regulación del caudal de ésta tubería, que no permitió manejar las velocidades normales de funcionamiento del sistema ni las velocidades de lavado.

El resultado del espesor de biopelícula para esta tubería es muy similar al observado anteriormente, como se observa en la Figura 8-5 en donde se presentan en una misma gráfica los resultados descritos anteriormente. A pesar de que no se cuenta con datos experimentales luego del día 90, se puede suponer que el comportamiento iba a ser similar al de la tubería de 4" en PVC, por lo que se hubiera alcanzado un espesor de 80 μm aproximadamente.

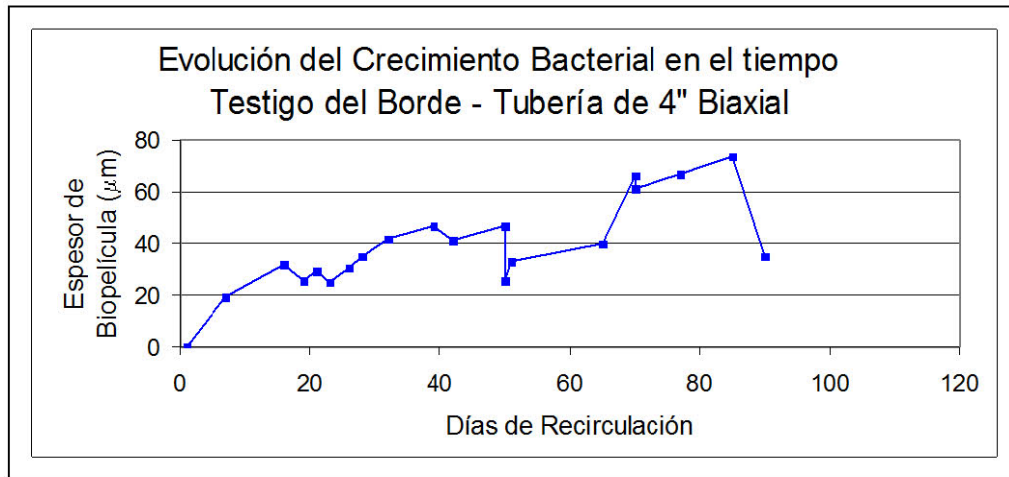


Figura 8-4 Evolución del crecimiento de biopelícula para la tubería de 4" en Biaxial en el testigo del borde

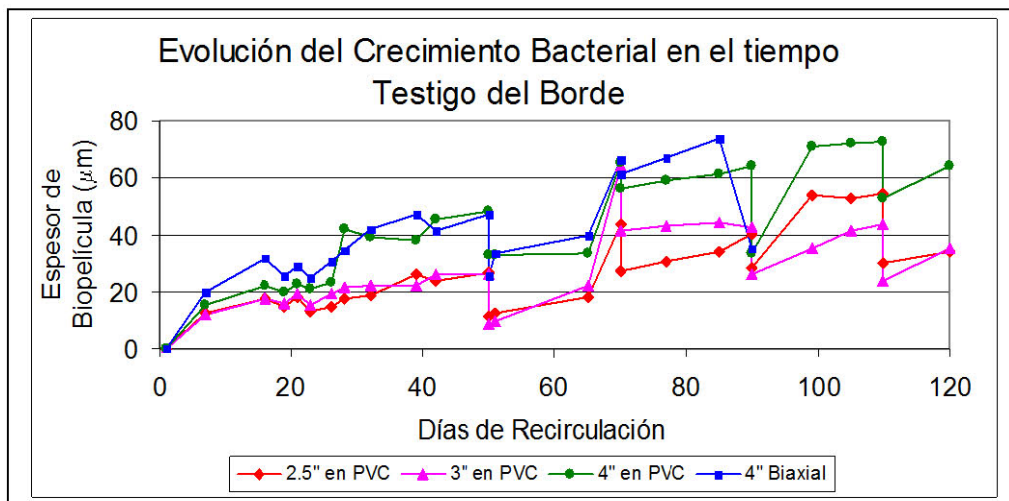


Figura 8-5 Gráfica comparativa del crecimiento en las cuatro tuberías

Como se observa en la figura anterior, el diámetro de la tubería juega un papel importante en la cantidad de biomasa adherida bajo las mismas condiciones hidrodinámicas de experimentación: Durante la fase 1, es decir, durante la fase de crecimiento desde el día 1 hasta el día 50, se observa claramente que las dos tuberías de menor diámetro alcanzaron la mitad del espesor de las dos tuberías de 4". Durante la fase de lavados (Fase 2), cada tubería tuvo un comportamiento diferente; las diferencias observadas en la primera fase dejaron de ser tan marcadas. Sin embargo, se mantiene el hecho de que a mayor diámetro mayor crecimiento. Este hecho se fundamenta en que, para una misma velocidad, las tuberías de mayor diámetro generan un menor esfuerzo

cortante en las paredes internas por causa del flujo del agua. De esta forma, es más fácil para las bacterias adherirse a las paredes de las tuberías de mayor diámetro, pues el esfuerzo que deben vencer para adherirse es menor.

Por otro lado, se observa en la Figura 8-5 que la tendencia de crecimiento en las cuatro tuberías fue creciente a través del tiempo. Posiblemente los 50 días de la fase de crecimiento no fueron suficientes para contar con una biopelícula en estado maduro, por lo que la fase de lavados se realizó durante la fase de crecimiento exponencial de las biopelículas. Si esta hipótesis es cierta, el lavado no sería una herramienta efectiva para controlar las biopelículas en su fase inicial de crecimiento como aparentemente lo demuestran las gráficas.

En la Tabla 8-1 se muestran las tasas de crecimiento inicial durante la fase 1 de experimentación, y las fases de regeneración luego de cada uno de los lavados.

Tabla 8-1 Tasa de crecimiento y regeneración de biopelículas en las cuatro tuberías del montaje

Fase	Periodo	Tubería			
		2.5" PVC	3" PVC	4" PVC	4" Biaxial
		$\mu\text{m}/\text{día}$	$\mu\text{m}/\text{día}$	$\mu\text{m}/\text{día}$	$\mu\text{m}/\text{día}$
Fase 1	Entre día 0 y 50	0,53	0,52	0,97	0,94
Fase 2	Entre día 50 y 70	1,63	3,65	1,60	2,03
	Entre día 70 y 90	0,65	0,06	0,40	0,86
	Entre día 90 y 110	1,32	0,88	1,96	

Los resultados de la fase 1 corroboran la dependencia del crecimiento de las biopelículas con el diámetro de la tubería: Las dos tuberías de diámetros pequeños tuvieron una tasa de crecimiento aproximada de $0.53 \mu\text{m}/\text{día}$, mientras que las tuberías de 4" tuvieron una tasa aproximada de $0.95 \mu\text{m}/\text{día}$, valor que es aproximadamente el doble que las otras dos.

A partir del primer lavado, la relación entre el diámetro de la tubería y la formación de biopelículas deja de ser evidente, puesto que la tubería de 3" registró la mayor velocidad de regeneración luego del primer lavado, mientras que las tuberías de 2.5" y 4" en PVC mostraron el

mismo comportamiento. Luego del segundo lavado las tasas de regeneración disminuyeron, sobretodo la de 3" en PVC, por lo que se puede inferir que el valor alcanzado luego del primer lavado para esta tubería se encontraba sobreestimado. Esto produjo un efecto de aumento en la tasa de regeneración luego del primer lavado, y disminución de la tasa luego del segundo.

Luego del tercer lavado, las tasas de regeneración volvieron a aumentar, sin alcanzar en general el valor de la primera tasa de regeneración registrada.

Con los resultados descritos anteriormente, no es posible comprobar la hipótesis planteada de la relación entre el diámetro de las tuberías y la formación de biopelículas con base en las tasas de regeneración, por lo que sería recomendable continuar con la investigación en este aspecto, tratando de controlar de la mejor forma posible todos aquellos factores que puedan afectar los resultados.

8.2 VARIACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Para el análisis de los resultados de las lecturas de los piezómetros, se dividió el período de experimentación en las dos fases que se han descrito anteriormente: La fase 1 durante los primeros 50 días, considerada como la fase de crecimiento; y la fase 2 o de lavados para analizar cómo se reestablecen las pérdidas luego de un lavado y cómo se comportan a través del tiempo.

A continuación se evaluarán las pérdidas de energía tanto por fricción como las ocasionadas por las uniones, dividiendo cada una de ellas en las dos fases enunciadas. En el ANEXO 4 se muestran los datos experimentales tomados durante las pruebas y los resultados individuales de cada una de las pruebas con las gráficas obtenidas tanto para el factor de fricción f como para el coeficiente de pérdidas menores k_m .

8.2.1 Pérdidas Menores

Las pérdidas menores son las que se ocasionan en los accesorios por causa de una obstrucción en el flujo, un cambio de dirección etc. En esta investigación, únicamente se evalúan las pérdidas

menores en las uniones de cada una de las tuberías del montaje, que se encuentran determinadas por la siguiente ecuación:

$$h_m = k_m \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 8-1}$$

donde

h_m = pérdida de energía

k_m = coeficiente de pérdida

v = velocidad de flujo

g = aceleración de la gravedad.

Las pérdidas de energía se encuentran mediante la diferencia en las lecturas de los piezómetros antes y después de cada una de las uniones. Conociendo esta diferencia, y la velocidad del flujo en la tubería, es posible encontrar el valor del coeficiente, despejándolo de la Ecuación 8-1. Este coeficiente es el parámetro que se analizó para evaluar el comportamiento de las pérdidas menores asociado con el crecimiento de las biopelículas.

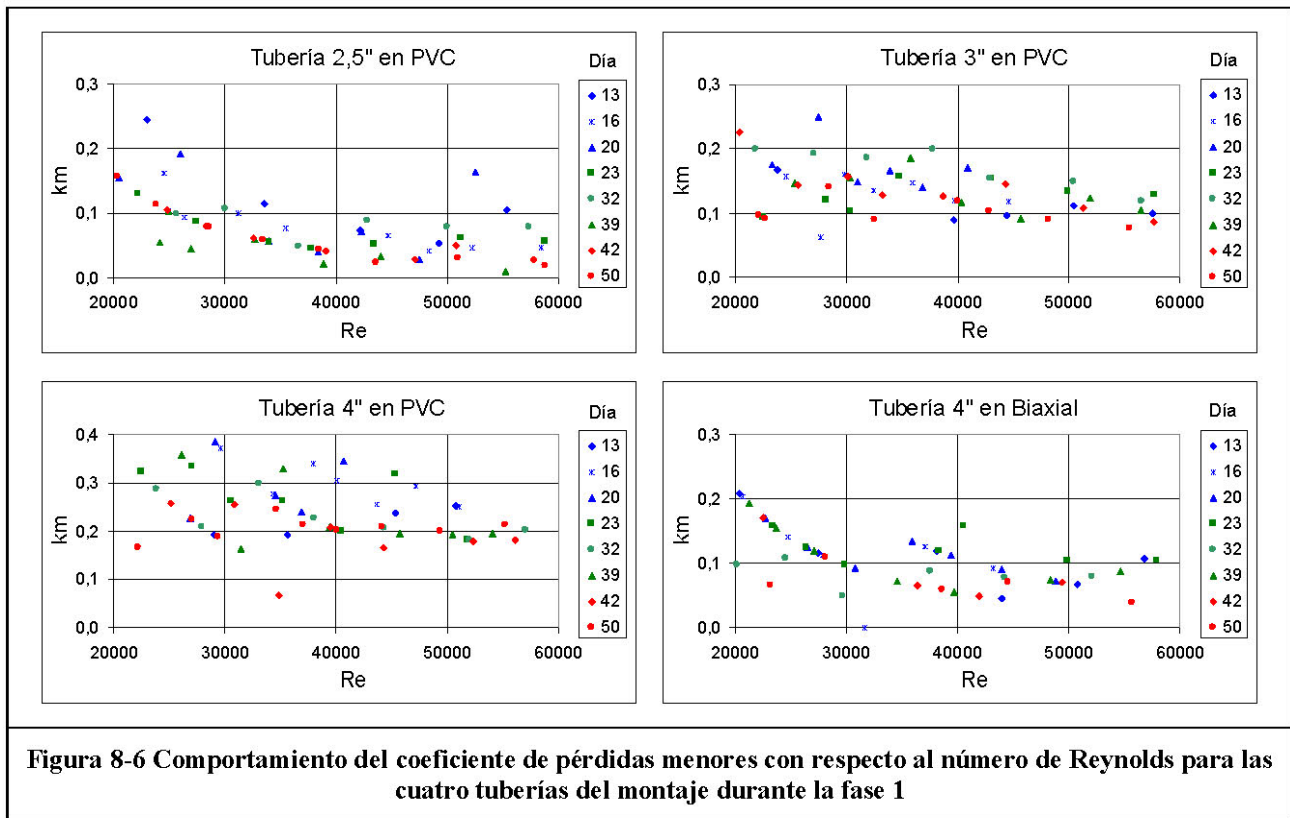
En teoría, a medida que crece biopelícula dentro de la tubería, las pérdidas de energía en la unión, y por lo tanto el coeficiente de pérdidas, deberían disminuir ya que la biopelícula adherida suaviza el paso del agua a través de la unión, haciendo que las líneas de flujo se vean menos afectadas por ésta. Luego de un lavado debe ocurrir el efecto contrario, es decir, debe aumentar nuevamente el valor del coeficiente una vez se desprende la biomasa acumulada o parte de ella.

Las pérdidas de energía causadas por las uniones se evalúan entonces mediante la realización de gráficas de k_m vs. Re , siendo éste último valor el responsable de las condiciones de flujo. Esta gráfica se realiza con el fin de determinar si el coeficiente de pérdidas es constante con un aumento en la velocidad o si existe alguna tendencia de éste con respecto al régimen de flujo.

8.2.1.1 Fase 1: Crecimiento inicial de las biopelículas

Durante los primeros 50 días de recirculación del montaje se realizaron 8 pruebas de evaluación de pérdidas de energía, cada una de 10 caudales diferentes.

En la Figura 8-6 se observan las gráficas de k_m vs. Re para las cuatro tuberías del montaje. En estas gráficas se utilizó una convención de colores y formas de los puntos en donde los puntos azules corresponden a las primeras 3 pruebas, los puntos verdes corresponden a las siguientes 3 y los puntos rojos a las últimas dos pruebas. Cada día de pruebas se identifica con la forma del punto.



En las gráficas de la figura anterior se observa que el coeficiente de pérdidas menores k_m no es constante con respecto a la velocidad de flujo y por lo tanto al número de Reynolds: A medida que el número de Reynolds aumenta, el valor del coeficiente decrece hasta que se estabiliza en un valor constante.

Adicionalmente, se puede observar que a medida que aumenta el diámetro de la tubería en PVC, aumenta la dispersión de los resultados. Esto se debe a que entre mayor sea el diámetro, menores son las pérdidas de energía para un mismo caudal, y por lo tanto, la sensibilidad del tablero de

piezómetros es insuficiente para lograr una medición precisa de los resultados. Esto no ocurre en la tubería de 4" en Biaxial.

Aparentemente, a medida que pasa el tiempo el coeficiente de pérdidas tiende a disminuir. Esto puede evidenciarse en la Figura 8-6 mediante la convención de colores. Los puntos rojos que corresponden a los datos de los últimos días de crecimiento se encuentran por lo general en la parte inferior del espectro posible de datos. Así mismo, los puntos azules se encuentran en la parte superior de la nube de datos por lo que se evidencia una relación inversa entre el crecimiento de biopelículas y el valor del coeficiente de pérdidas menores: A medida que aumenta el espesor de la biopelícula, disminuye el coeficiente de pérdidas menores.

Esto comprueba la hipótesis de que a medida que crece la biopelícula, se suavizan las líneas de flujo a través de los accesorios, reduciendo el efecto que éstos producen sobre la energía total y minimizando la pérdida localizada de energía.

Sin embargo, en la gráfica de la tubería de Biaxial se observa que para la mayoría de las pruebas, los resultados experimentales se ubican dentro de una misma línea de tendencia; es decir, no se evidencia ningún cambio en el coeficiente con respecto al tiempo, pues los puntos azules, verdes y rojos se ubican indistintamente sobre una misma línea.

De acuerdo con lo anterior, puede concluirse que el efecto del crecimiento de las biopelículas sobre las pérdidas menores en las uniones es muy pequeño o casi imperceptible. En las redes de acueducto este resultado no es relevante, ya que la mayor parte de las pérdidas de energía a lo largo de toda la red de acueducto la aportan las pérdidas por fricción, por lo que el efecto de las biopelículas sobre las tuberías es más importante que el que se genera sobre los accesorios.

8.2.1.2 Fase 2: Lavados

Durante la fase de lavados se analizó el comportamiento de las pérdidas menores antes y después de cada lavado y en los periodos comprendidos entre dos lavados sucesivos.

En la Figura 8-7 se observa el comportamiento del coeficiente de pérdidas menores antes y después del primer lavado, diferenciando por colores estas dos fechas: En rojo los puntos tomados antes del lavado y en azul los puntos luego de éste.

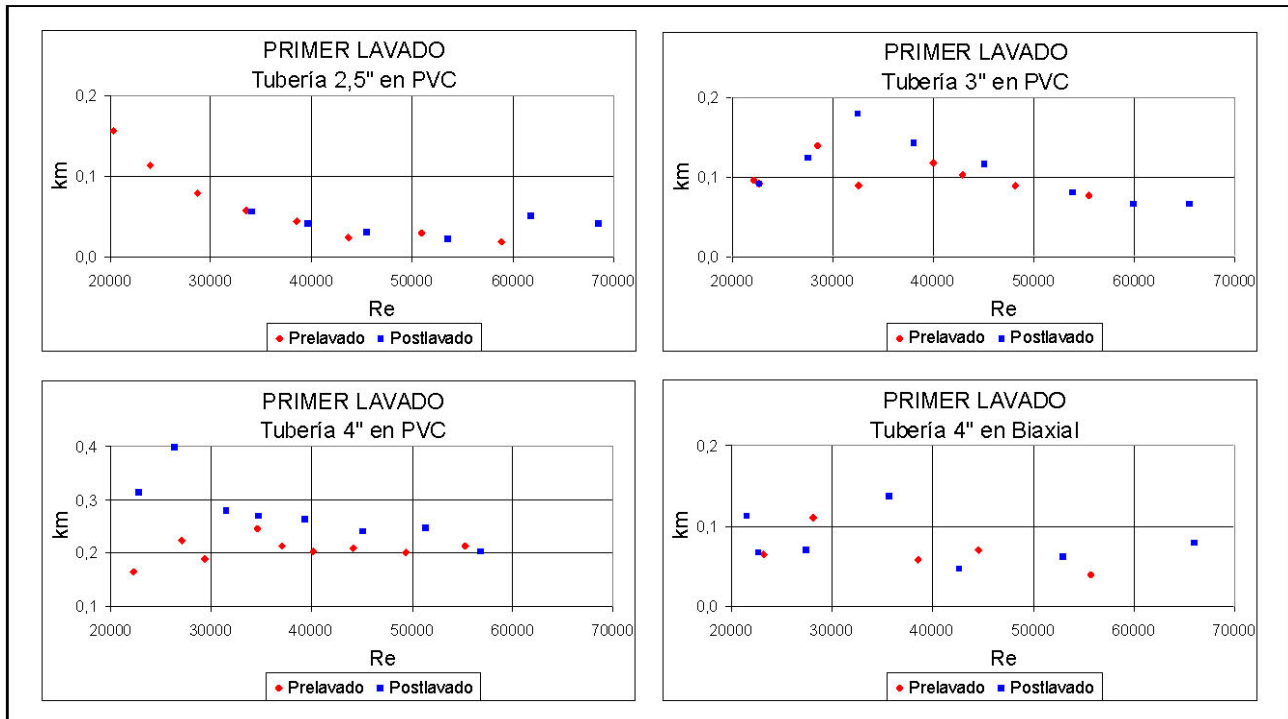


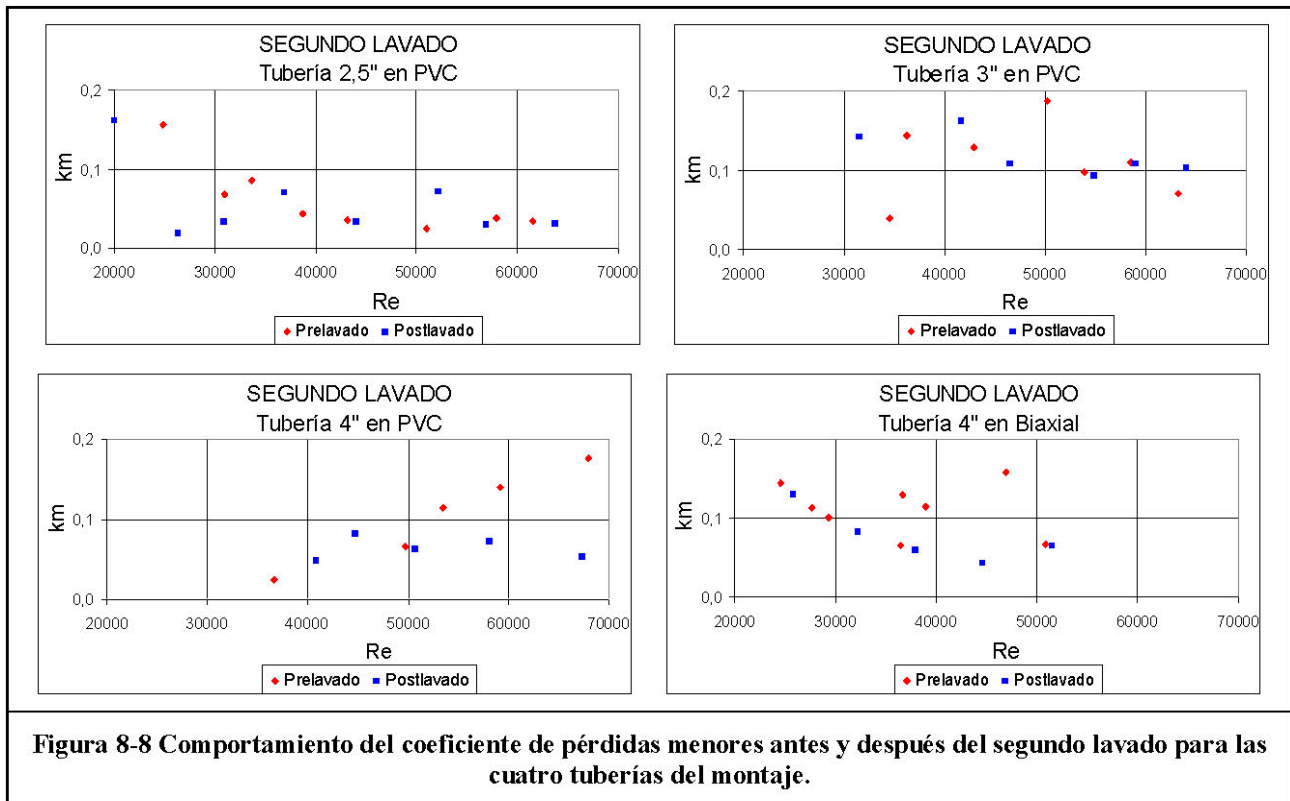
Figura 8-7 Comportamiento del coeficiente de pérdidas menores antes y después del primer lavado para las cuatro tuberías del montaje.

De acuerdo con la gráfica anterior, en algunas tuberías el efecto del lavado sobre el coeficiente es nulo, como en el caso de la tubería de 2.5". Sin embargo en otras, como en la tubería de 4" en PVC, el efecto es notorio: Antes de lavar, por efecto de las biopelículas, el coeficiente presentó un valor menor que luego del lavado, para todo el rango de números de Reynolds analizado.

En general, el efecto del lavado sobre las pérdidas menores de energía es poco significativo lo que nuevamente demuestra que las biopelículas no afectan este parámetro a través del tiempo.

Luego del primer lavado el comportamiento de las pérdidas menores se volvió errático: La tendencia de una prueba individual dejó de ser un decaimiento a medida que aumentaba el número de Reynolds como se observó durante la primera fase, y comenzó a tener tendencias diferentes.

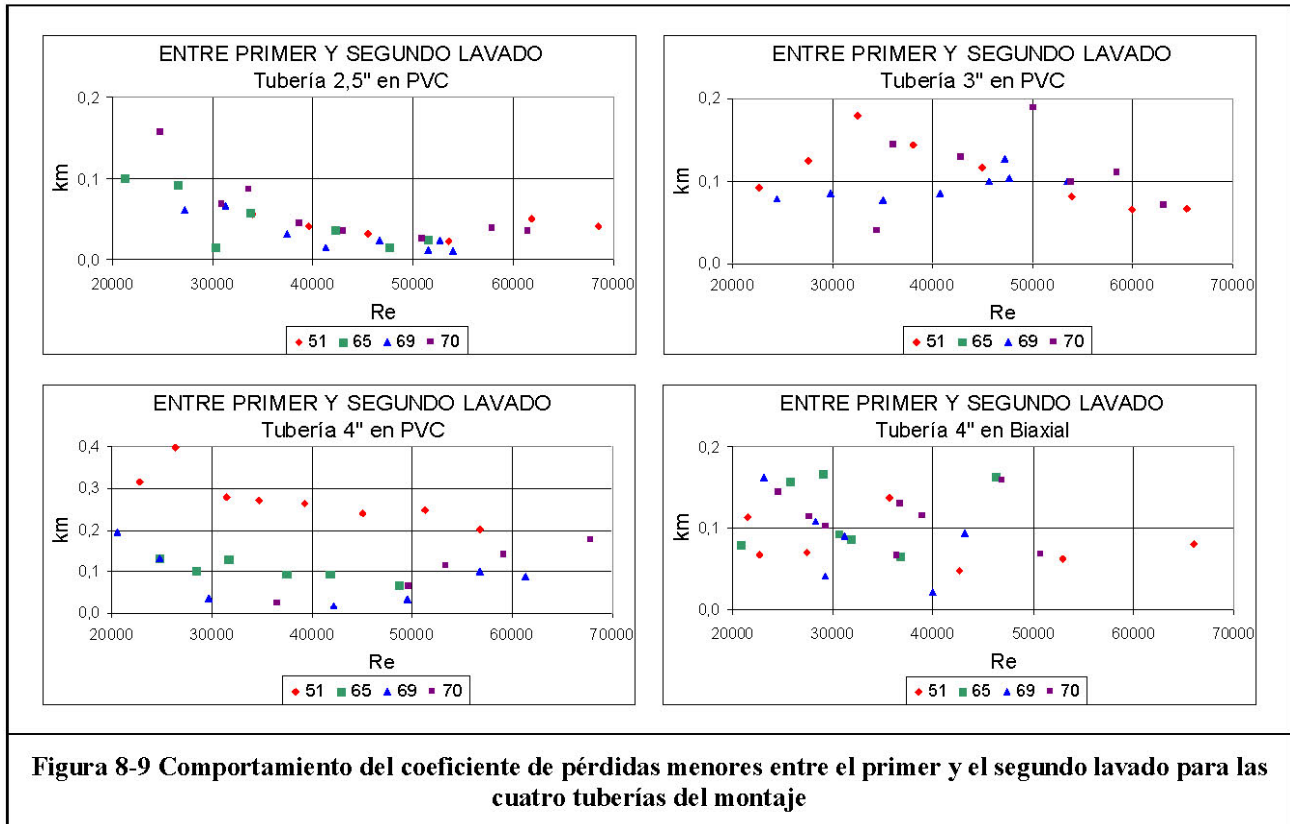
A manera de ejemplo, en la Figura 8-8 se presentan las gráficas del comportamiento del coeficiente para las cuatro tuberías antes y después del segundo lavado.



En las gráficas anteriores no se observa una tendencia clara del comportamiento del coeficiente de pérdidas menores con respecto al número de Reynolds, ni tampoco se observa la incidencia del lavado en las pruebas; es decir, no se puede determinar si el lavado es o no efectivo dado el resultado que se obtuvo.

En la Figura 8-9 se presentan las mismas gráficas anteriores pero para el período entre el primer y el segundo lavado. El comportamiento debería ser similar al evidenciado durante la fase 1 o de

crecimiento exponencial, ya que durante este periodo de 20 días la biopelícula debería suavizar la obstrucción ocasionada por el accesorio, disminuyendo el valor del coeficiente de pérdidas.



De acuerdo con la gráfica de la tubería de 4" en PVC, durante el período entre los dos primeros lavados se evidenció una disminución del coeficiente de pérdidas con el número de Reynolds. Sin embargo, este resultado no se puede demostrar con las demás tuberías ya que la tendencia de los datos dejó de ser decreciente como ya se explicó anteriormente.

Entre el segundo y tercer lavado se normalizó la tendencia decreciente del coeficiente de pérdidas menores, pero el cambio progresivo a través del tiempo dejó de ser claro como se observa en la gráfica de la tubería de 3" de la Figura 8-10: La tendencia del coeficiente durante una prueba intermedia entre los dos lavados (color verde) se localizó por encima de las dos pruebas extremas.

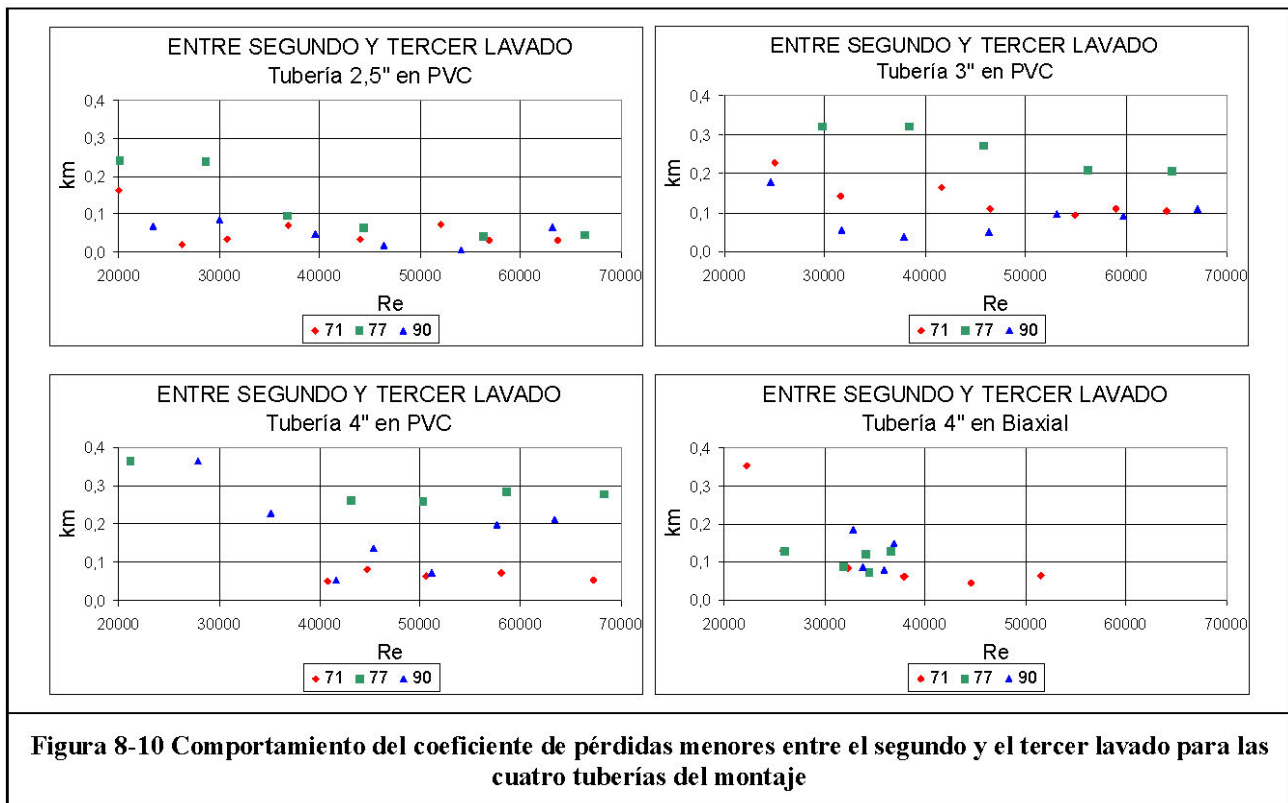


Figura 8-10 Comportamiento del coeficiente de pérdidas menores entre el segundo y el tercer lavado para las cuatro tuberías del montaje

En conclusión, durante las dos fases de experimentación, no se observó un cambio notorio en las pérdidas menores por causa de la formación de biopelículas.

8.2.2 Pérdidas por fricción

La fricción entre la pared de la tubería y el flujo de agua hace que se pierda energía en el tramo de tubería, de acuerdo con la siguiente expresión:

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

Ecuación 8-2

- donde
- h_f = pérdida de energía por fricción
 - f = factor de fricción de Darcy
 - l = longitud del tramo de tubería
 - d = diámetro de la tubería
 - v = velocidad de flujo
 - g = aceleración de la gravedad

A través de las pruebas se pueden conocer las pérdidas h_f mediante la diferencia entre las lecturas de los piezómetros al inicio y al final de cada tramo en estudio; adicionalmente se conocen las variables de longitud entre piezómetros, el diámetro de cada tubería y la velocidad del agua para cada caudal analizado. De esta forma, el parámetro que se analiza para evaluar la evolución de las pérdidas por fricción en el tiempo, es el valor del coeficiente f .

De acuerdo con el diagrama de Moody, el coeficiente de fricción f disminuye a medida que aumenta el caudal y por lo tanto el número de Reynolds. De esta forma, se realizan gráficas de f vs. Re y se sobreponen en un diagrama de Moody, con el fin de localizar los datos experimentales y compararlos con las líneas del diagrama.

8.2.2.1 Fase 1: Crecimiento inicial de las biopelículas

Para el caso de las pérdidas de energía por fricción ocurre el fenómeno contrario al evidenciado en las pérdidas menores, es decir, a medida que crece la biopelícula aumenta el factor de fricción, aumentando de esta forma las pérdidas de energía. La razón de este comportamiento inverso radica en que las biopelículas aumentan la rugosidad de la pared interna de la tubería, generando un obstáculo extra que debe ser vencido por el flujo de agua, lo que se traduce en un aumento del factor de fricción.

En la Figura 8-11 se presenta la gráfica de f vs. Re superpuesta en un Diagrama de Moody para la tubería de 2.5" en PVC. En esta gráfica se puede observar que el efecto del crecimiento de las biopelículas sobre las pérdidas de energía por fricción es más notorio que en el caso de las pérdidas menores. Los datos azules en la gráfica, correspondientes a los primeros días de experimentación, se encuentran por debajo del total de datos; de manera similar, los datos rojos, que corresponden al final de la fase 1 de experimentación se encuentran por encima de todos los datos de esta primera fase.

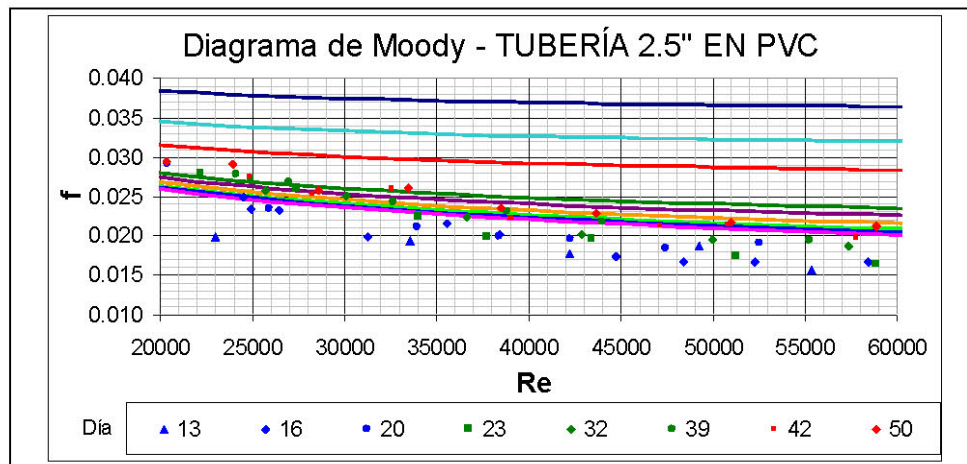


Figura 8-11 Diagrama de Moody para la tubería de 2.5" en PVC durante la fase 1

Por otro lado, se observa que inicialmente los datos experimentales se encontraban por debajo del límite inferior del diagrama de Moody, que corresponde a tuberías muy lisas, más lisas incluso que aquellas que Moody utilizó para generar el diagrama. A medida que pasó el tiempo, y creció biopelícula, los datos experimentales empezaron a subir en el diagrama hasta que finalmente ingresaron a las líneas inferiores de éste. Esto significa que llega un punto en que la capa de biopelícula adherida hace que el régimen de flujo pase de ser turbulento hidráulicamente liso a hidráulicamente en transición, en donde la rugosidad del material aporta a las pérdidas de energía que se generan por fricción.

El anterior resultado demuestra que las biopelículas si tienen un efecto importante sobre la rugosidad del material y por consiguiente sobre las pérdidas de energía por fricción, disminuyendo la capacidad hidráulica de las tuberías con el tiempo.

De manera similar, en la Figura 8-12 se presenta la gráfica para la tubería de 3" en PVC; en la Figura 8-13 la de la tubería de 4" en PVC y en la Figura 8-14 la gráfica de la tubería de 4" en Biaxial.

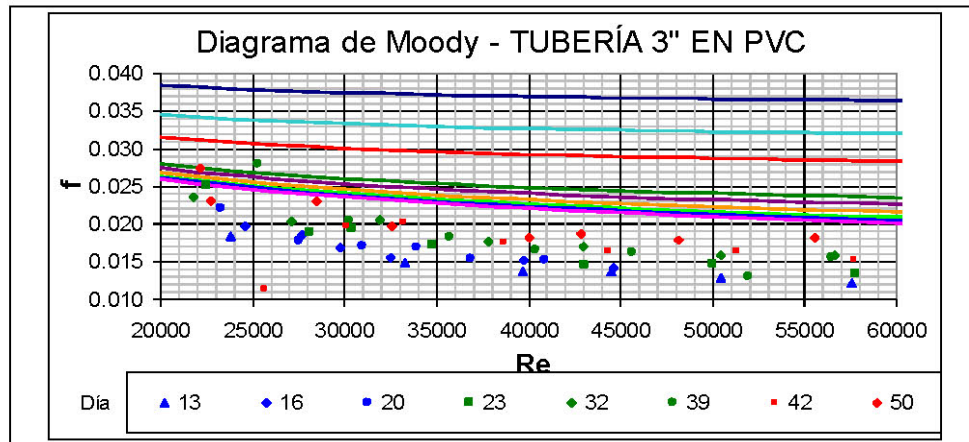


Figura 8-12 Diagrama de Moody para la tubería de 3" en PVC durante la fase 1

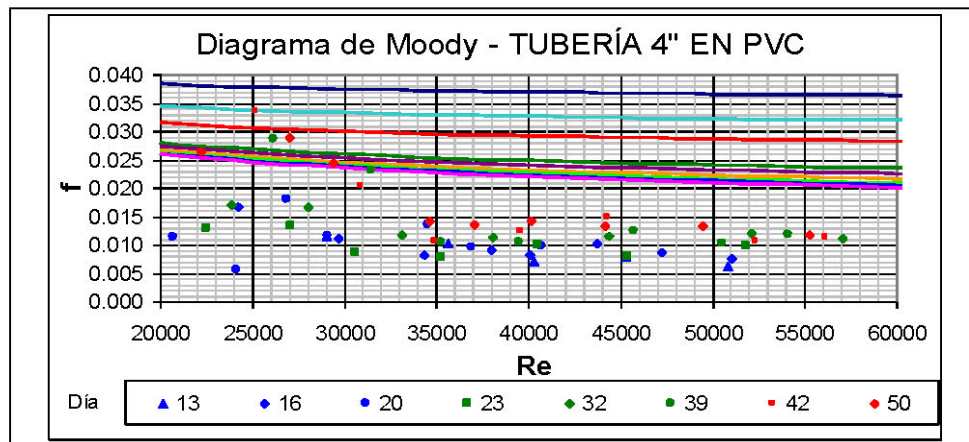


Figura 8-13 Diagrama de Moody para la tubería de 4" en PVC durante la fase 1

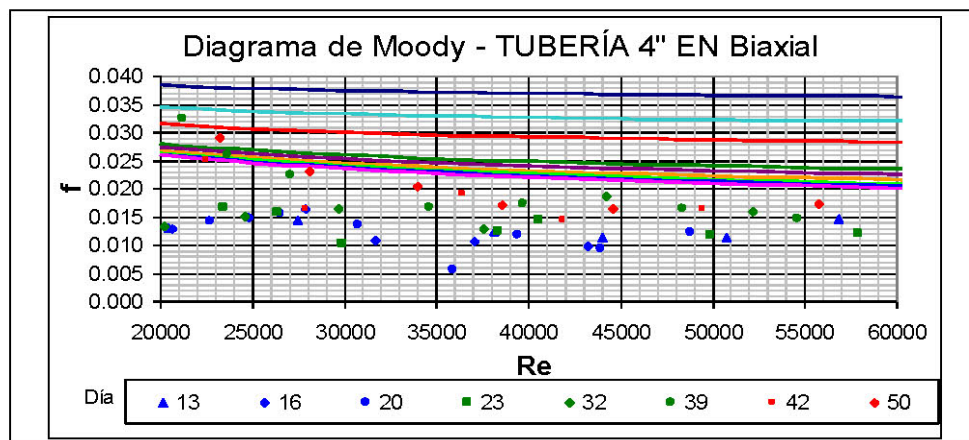


Figura 8-14 Diagrama de Moody para la tubería de 4" en Biaxial durante la fase 1

En las figuras anteriores se observa que entre mayor sea el diámetro, más abajo se ubican los datos experimentales con respecto al diagrama de Moody. Adicionalmente, la dispersión de los datos experimentales se comporta igual que el caso de pérdidas menores, es decir, los resultados de las tuberías de mayor diámetro son los más dispersos, por la incertidumbre en la lectura del tablero de piezómetros.

Por otro lado, en estas tres figuras se observa que a pesar de que el efecto de las biopelículas es notorio, incrementando el valor del coeficiente de fricción f con el tiempo, ningún dato experimental ingresó al diagrama como en el caso de la tubería de 2.5". Esto quiere decir que a pesar de que las biopelículas afectan la rugosidad de las paredes internas de las tuberías, éste aumento no afecta la capacidad hidráulica de la tubería pues el flujo sigue siendo hidráulicamente liso por estar por debajo del diagrama de Moody. Sin embargo, el efecto que se observó en la tubería de 2.5" puede ocurrir en las demás con más tiempo de formación de biopelículas que es lo que ocurre en las redes instaladas en donde hay tuberías de más de 20 años sin que se les haya realizado un mantenimiento de lavado.

8.2.2.2 Fase 2: Lavados

Luego de cada lavado, el factor de fricción disminuyó por causa del desprendimiento de las biopelículas; En cada uno de los períodos entre lavados, las pérdidas volvían a aumentar siendo controladas y retornadas a un valor cercano al inicial con cada uno de los lavados subsiguientes.

En la Figura 8-15 se presenta toda la evolución de las pérdidas de energía por fricción para la tubería de 2.5" en PVC. En una primera gráfica se muestran las pruebas antes y después del primer lavado; luego se muestra el comportamiento de las pruebas entre los dos primeros lavados; luego las pruebas antes y después del segundo lavado y así sucesivamente.

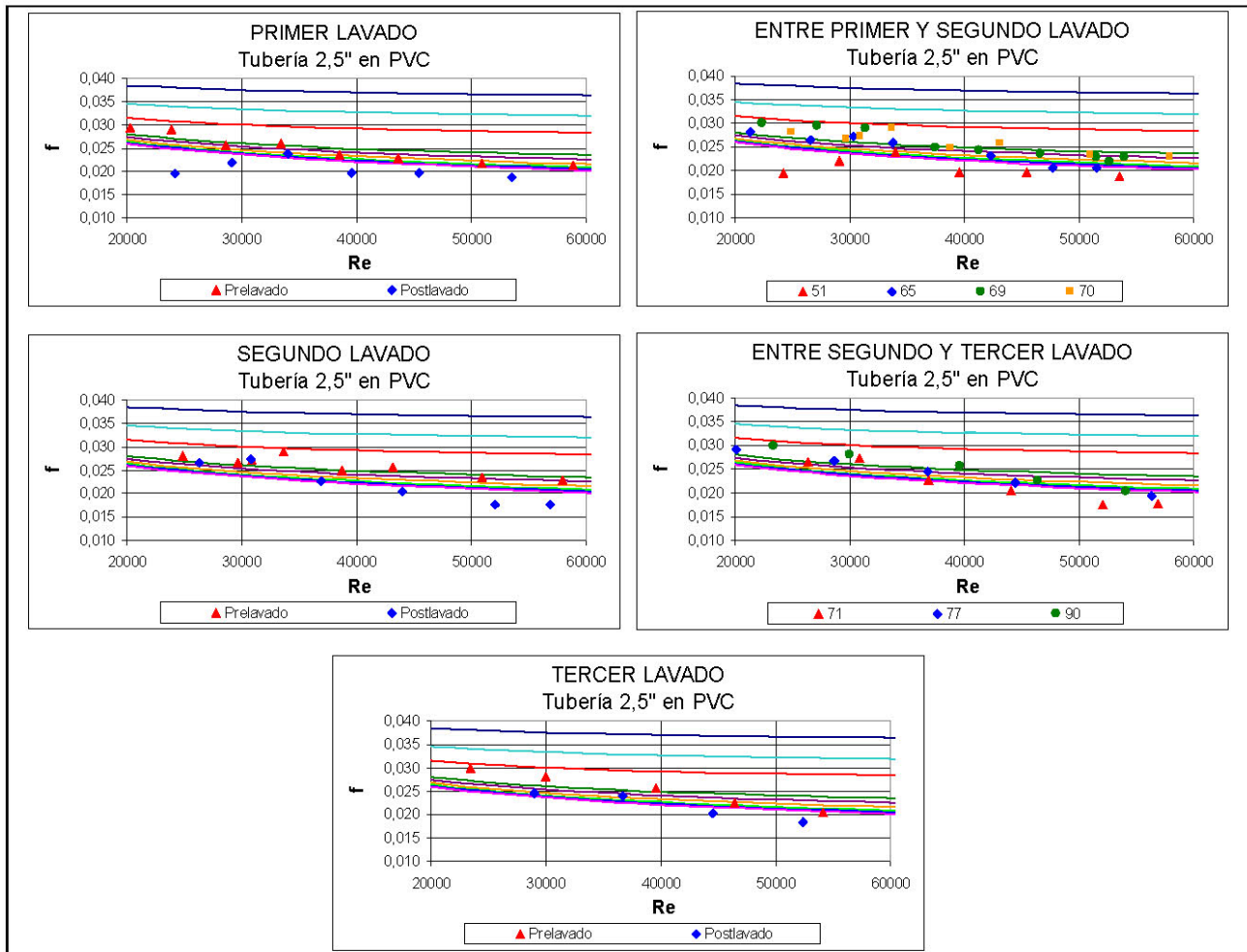


Figura 8-15 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 2.5" en PVC

Como se puede observar, siempre las pruebas antes de cada uno de los lavados se encuentran por encima de las pruebas después de cada uno de ellos. Esto demuestra que los lavados son una herramienta útil para reestablecer las pérdidas de energía por fricción, y de esta forma, conservar más la energía a lo largo de los tramos de la red. Similarmente, en los períodos entre lavados se observa que nuevamente el factor de fricción crece a medida que crece la biopelícula.

Otro aspecto que es importante mencionar es que a pesar de que los lavados individuales son efectivos para disminuir las pérdidas de energía, a través del tiempo no se disminuye el nivel de pérdidas por debajo del nivel que se evidenció luego del primer lavado. Esto lo que quiere decir es

que mediante los lavados de las tuberías no se puede erradicar por completo el problema de las biopelículas sino controlar su espesor.

En la Figura 8-16 se presenta la misma evolución a través del tiempo para la tubería de 3". En este caso, el comportamiento es muy similar al que se evidenció en la tubería de 2.5", sin embargo, sólo hasta después del segundo lavado, los datos experimentales comenzaron a entrar dentro del diagrama de Moody.

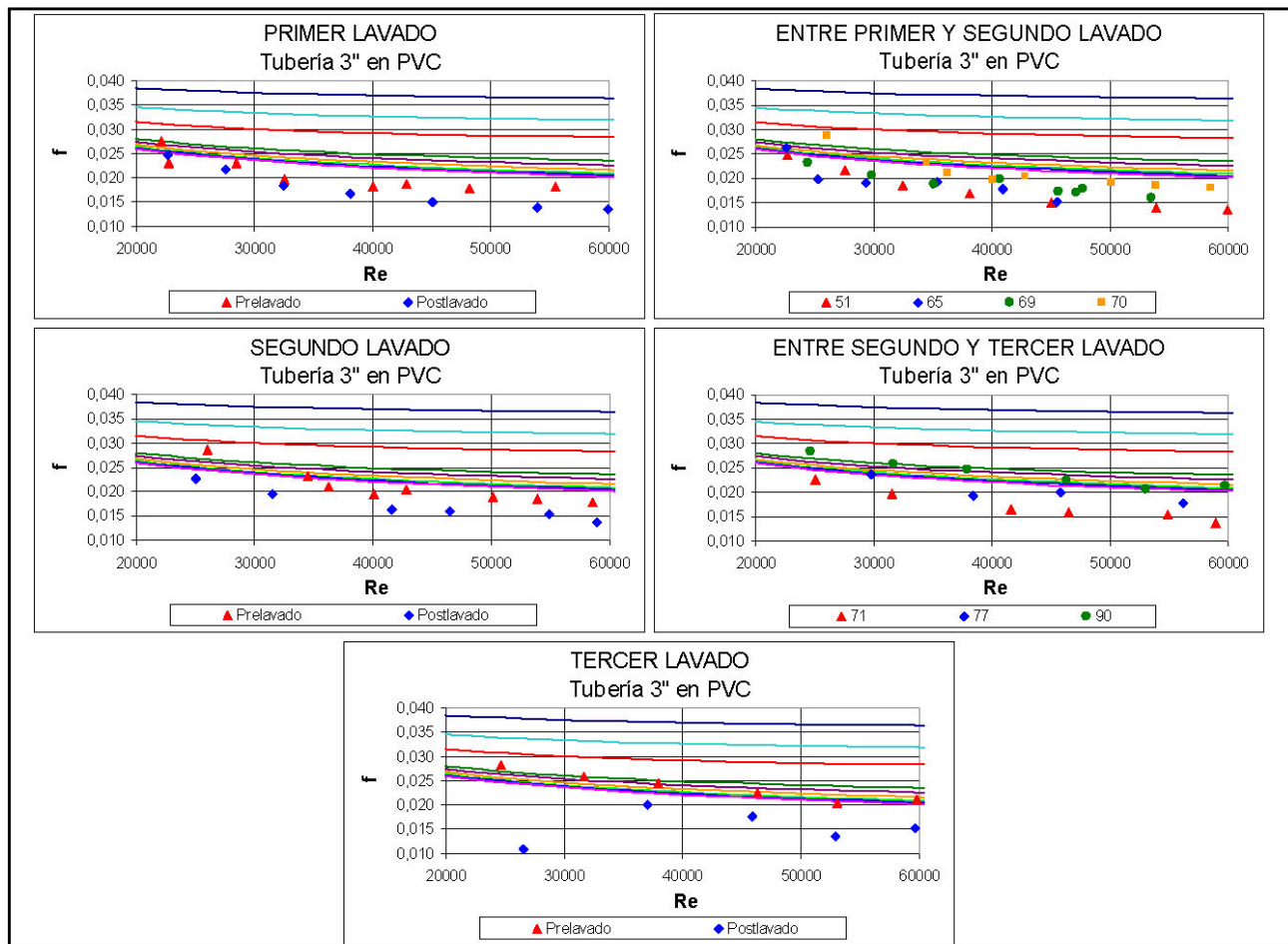


Figura 8-16 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 3" en PVC

Por otro lado, en la Figura 8-21 se presentan las gráficas para la tubería de 4" en PVC. En estas gráficas se evidencia un comportamiento extraño pero consistente y es que para números de Reynolds menores a 30.000, los datos experimentales se encuentran dentro del diagrama de

Moody, mientras que para $Re > 30.000$ se localizan muy por debajo de éste. Este comportamiento es extraño pues en general las pérdidas por fricción siguen una tendencia clara de comportamiento.

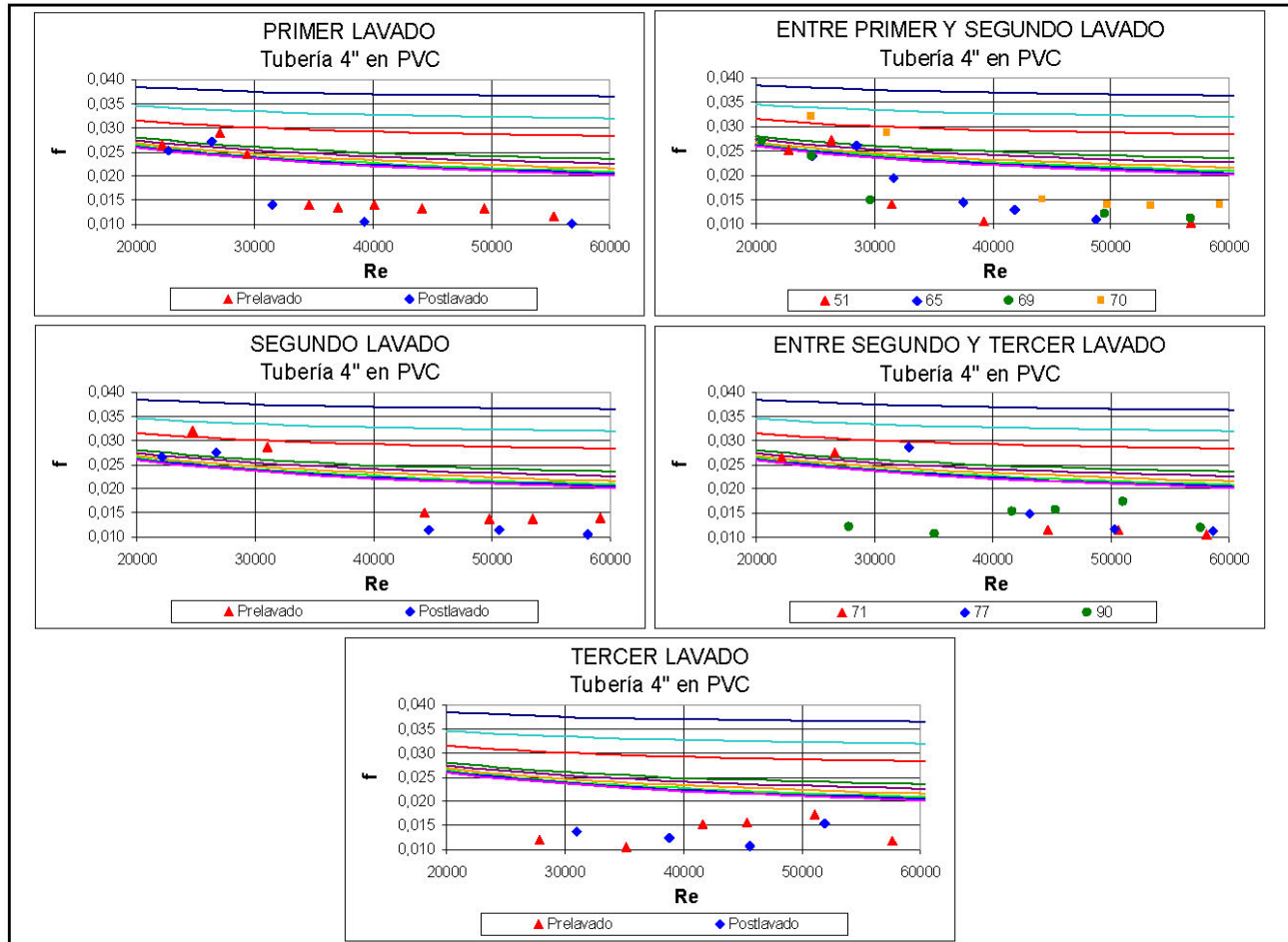


Figura 8-17 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 4" en PVC

A pesar del problema enunciado anteriormente, el efecto de los lavados sigue siendo el mismo que se presentó en las demás tuberías: Luego de un lavado se evidencia una disminución en el factor de fricción, que luego aumenta en los períodos entre lavados.

Por último, en la Figura 8-18 se presentan las gráficas para la tubería de 4" en PVC. El análisis que podría hacerse sobre estas gráficas es similar a los análisis anteriores.

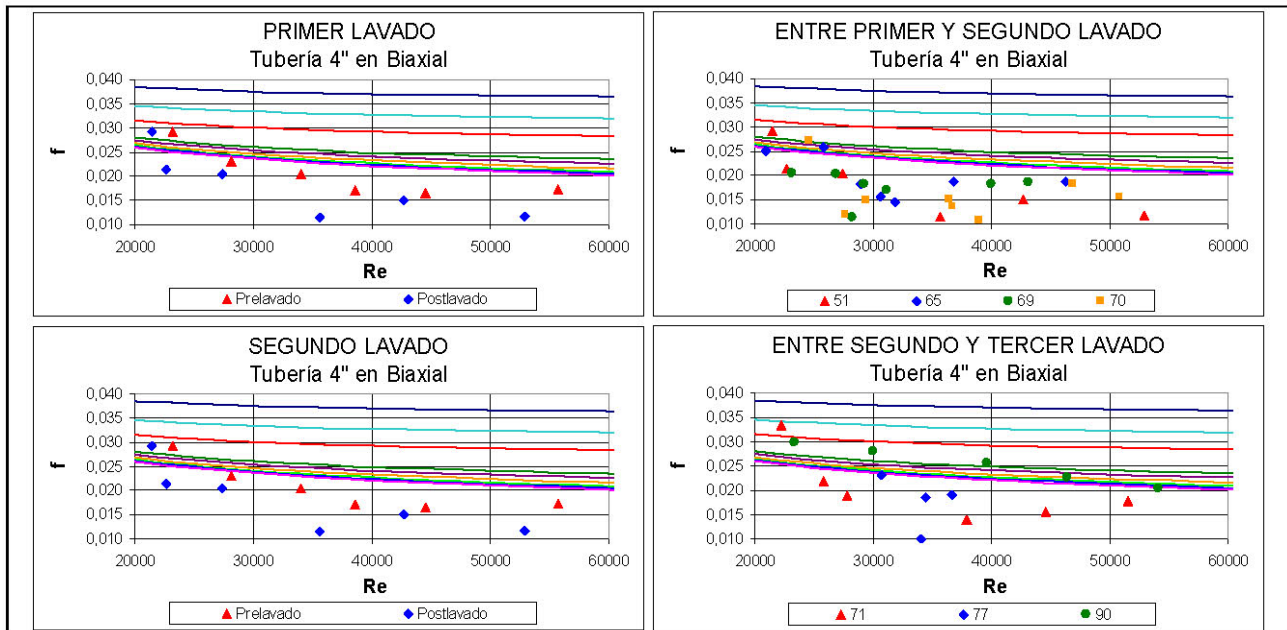


Figura 8-18 Evolución de las pérdidas por fricción durante la fase 2 en la tubería de 4" en Biaxial

Como se puede evidenciar en todos los grupos de gráficas para cada una de las tuberías, los datos experimentales a través del tiempo empiezan a ingresar en el diagrama de Moody; lo que podría significar que eventualmente, el flujo a través de las tuberías pasa de ser hidráulicamente liso a ser flujo en transición.

Sin embargo, no es posible cuantificar el coeficiente de rugosidad absoluta debido a que los resultados se encuentran siempre por debajo del diagrama de Moody o sobre el límite del flujo hidráulicamente liso. Este límite fue definido por Colebrook – White cuando se cumple la siguiente expresión:

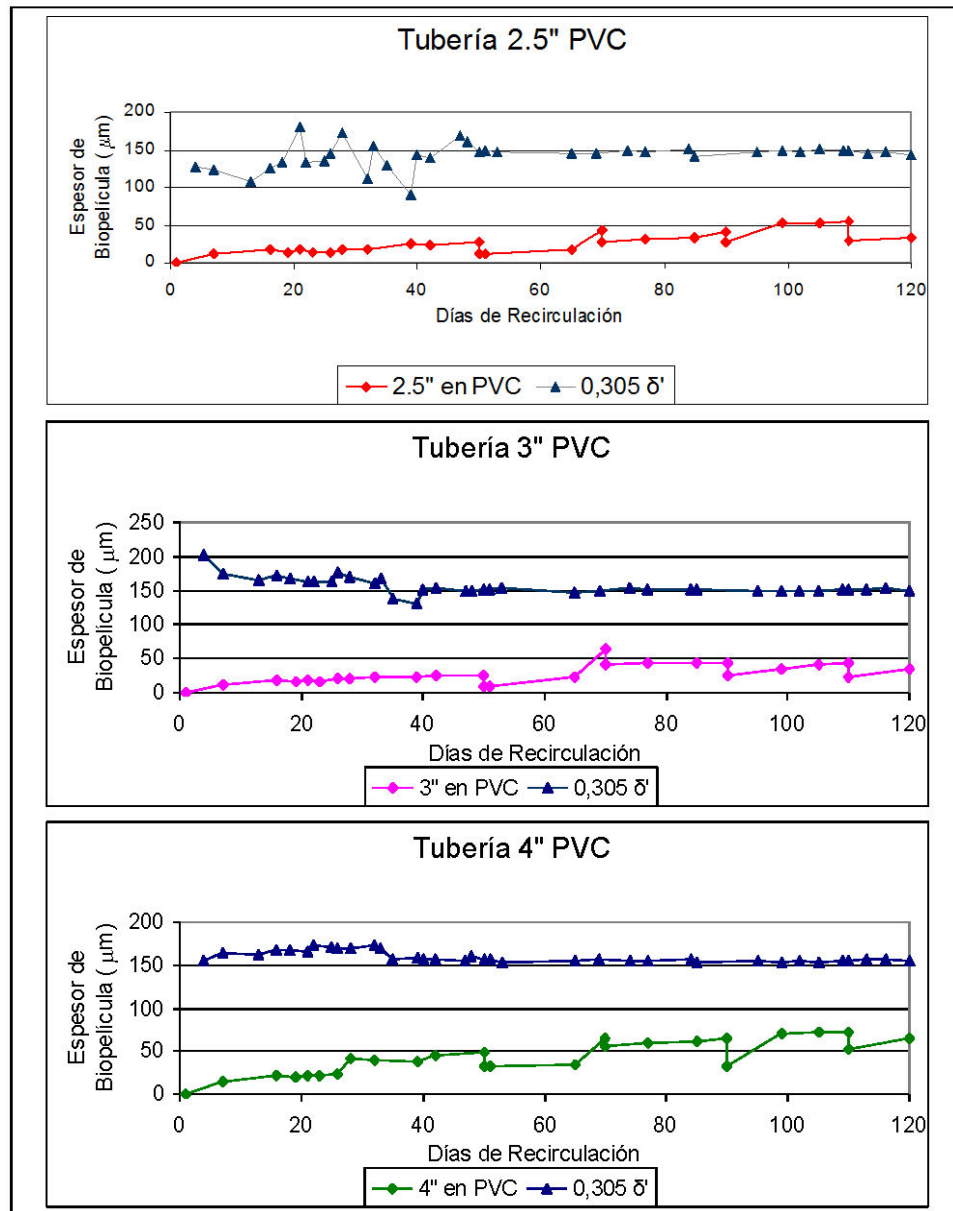
$$k_s < 0.305 \delta' \quad \text{Ecuación 8-3}$$

donde:

k_s : Rugosidad absoluta

δ' : Espesor de la subcapa laminar viscosa.

En la Figura 8-19 se observa el límite del flujo hidráulicamente liso descrito anteriormente, y cómo el espesor de la biopelícula se encuentra por debajo.



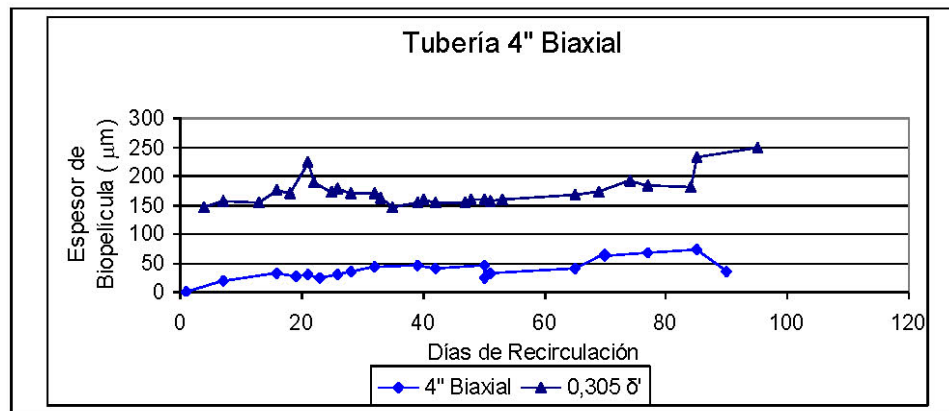


Figura 8-19 Límite del flujo hidráulicamente liso con el espesor de la biopelícula

De acuerdo con las figuras anteriores se observa que a pesar de que la biopelícula crece aumentando la rugosidad de la pared interna de la tubería, este aumento no es significativo pues no aporta a las pérdidas de energía que se generan, siendo éstas producto únicamente de la turbulencia del flujo.

Sin embargo, si se permite que la biopelícula crezca sin controlarla mediante lavados, eventualmente el espesor va a aumentar por encima de la subcapa laminar viscosa, afectando considerablemente las pérdidas de energía.

8.3 EFICIENCIA DE LOS LAVADOS

Para analizar la efectividad de los lavados, se utilizaron los testigos desechables en donde cada punto de cada una de las gráficas corresponde al peso normalizado de uno de estos testigos. La tendencia de crecimiento entre las mediciones se supone exponencial debido a que a través de los testigos del borde se determinó que las biopelículas durante la experimentación nunca llegaron a su estado maduro, es decir, estuvieron todo el tiempo en la fase de crecimiento exponencial.

En la Figura 8-20 se observan las gráficas de espesor de biopelícula vs. el tiempo de recirculación para este tipo de testigos y cada una de las tuberías analizadas.

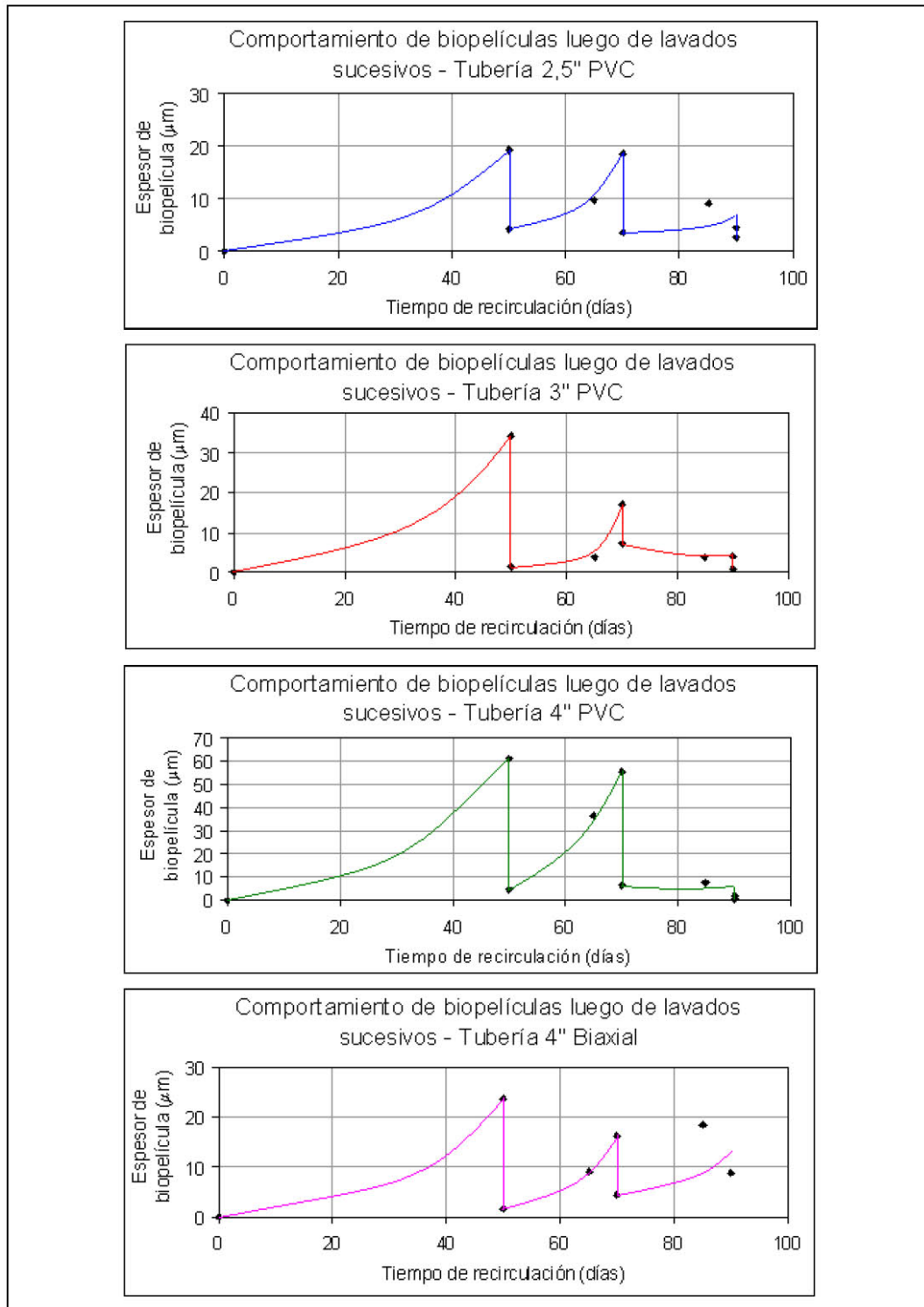


Figura 8-20 Comportamiento de las biopelículas luego de los primeros tres lavados para las cuatro tuberías analizadas

De acuerdo con los resultados observados en las gráficas anteriores, y comparando los espesores finales de la fase 1 (día 50), con los obtenidos mediante los testigos del borde, se puede observar que los valores son diferentes. En este caso, a medida que aumenta el diámetro de las tuberías de PVC, aumenta el espesor de la biopelícula, aunque los valores máximos alcanzados son menores en este caso: La tubería de 4" en Biaxial mostró un espesor de aproximadamente 20 μm , cuando en el testigo del borde mostró un espesor de 40 μm . La hipótesis que se genera mediante los resultados de la Figura 8-20, es que las tuberías de Biaxial parecen ser más lisas que las de PVC, evitando que se forme una capa considerable de biopelícula a pesar de que el esfuerzo cortante es el más bajo de todas las tuberías analizadas.

Por otro lado, utilizando los resultados de los dos primeros lavados, es decir en el día 50 y el día 70, se ratifica lo enunciado por Picioreanu et al. (2001), según el cual, luego de un evento de desprendimiento, la biopelícula continúa aumentando su espesor, pero no alcanza nuevamente la cantidad de biomasa acumulada antes de dicho evento. Este resultado se evidencia en las cuatro tuberías, siendo más notorio el cambio en la tubería de PVC de 3" y en la tubería de 4" Biaxial.

A partir del día 70, los resultados cambiaron la tendencia que traían hasta ese momento, hecho que coincide con un cambio en las condiciones del montaje, pues muy cerca de esa fecha se evidenció la presencia de algas dentro de la tubería, como se muestra en la Figura 8-21.



El monitoreo de la acumulación de biomasa luego del segundo lavado no es representativo debido al problema enunciado anteriormente, razón por la cual, valdría la pena repetir el período de experimentación en una futura investigación, con el fin de tener un mejor control de las condiciones ambientales y evitar la aparición de algas en el montaje.

La eficiencia de remoción del primer lavado fue muy alta, como se observa en la Tabla 8-2. En el segundo lavado las eficiencias se redujeron sin una tendencia aparente con respecto al diámetro, excepto para la tubería de 2.5", en donde las eficiencias fueron muy parecidas.

Tabla 8-2 Eficiencia de remoción de biopelículas de los diferentes lavados

Lavado No.	Tubería			
	2,5" PVC (%)	3" PVC (%)	4" PVC (%)	4" Biaxial (%)
1	78,21	95,71	92,78	92,74
2	81,27	57,83	88,04	72,37
3	40,99	79,02	63,7	---

De acuerdo con el resultado evidenciado en la Tabla 8-2, los lavados resultan ser un mecanismo efectivo para la remoción de biopelículas incluso luego de varios lavados sucesivos, pues los porcentajes de remoción fueron generalmente mayores al 50% o muy cercanos a este valor.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Con respecto al montaje

Para lograr las velocidades que se manejaron, el montaje fue apropiado, ya que la cabeza de presión y el caudal fueron suficientes para cumplir con los objetivos propuestos.

Los testigos que fueron diseñados para evaluar el crecimiento de las biopelículas en el tiempo fueron igualmente apropiados. Sin embargo, el poco control que se tiene sobre los agentes externos al montaje como el sol, la lluvia, la temperatura entre otros, hizo que las mediciones y la evolución de las biopelículas se deterioraran con el tiempo.

A pesar de que se controló sustancialmente la aparición de algas en el montaje que se evidenció en la investigación previa a la presente, no fue posible erradicarla por completo. Por lo tanto, es recomendable continuar con la investigación en este tema, tratando de controlar cada vez más las condiciones bajo las cuales se desarrolla el período de experimentación.

9.2 Con respecto al crecimiento de la biopelícula en el tiempo

La intención inicial de separar el período de experimentación en dos fases era que durante la primera, la biopelícula llegara a un estado maduro en donde el crecimiento dejara de ser exponencial y estuviera más estable. Sin embargo, las gráficas de crecimiento de biopelículas en los testigos del borde demuestran que a pesar de los lavados, la biopelícula seguía creciendo con la misma tendencia, e incluso, las tasas de regeneración fueron en algunos casos más altas que la tasa de crecimiento inicial.

Lo que esto significa es que los 50 primeros días de experimentación no fueron suficientes para clasificar la biopelícula como madura. Por lo tanto, valdría la pena extender este primer período en futuras investigaciones, con el fin de representar una mejor aproximación a la realidad, en donde los lavados se realizan sobre una biopelícula totalmente formada y madura, cuya dinámica de crecimiento se encuentra controlada por las fuerzas de desprendimiento.

Por otro lado, la tendencia de crecimiento sobre los testigos del borde fue diferente a la encontrada en los testigos desechables: En los primeros, la tendencia es creciente todo el tiempo, mientras que en los testigos desechables si se observa una reducción en el espesor ponderado de la biopelícula. Es más confiable el resultado de los testigos desechables, pues la manipulación constante de los testigos del borde pudo alterar el crecimiento progresivo de las biopelículas y por lo tanto invalidar los resultados obtenidos.

Como se observa en las gráficas de crecimiento (Figura 8-1 a Figura 8-4) y lavados (Figura 8-20), el espesor de biopelícula alcanzado durante la primera fase fue aproximadamente el mismo para los dos tipos de testigos; es en la segunda fase en donde comienzan a divergir los comportamientos.

La ubicación de los testigos del borde puede ser la causa de esta divergencia, ya que durante un lavado, las líneas de flujo en la salida de la tubería son muy diferentes a las que se presentan sobre la pared interna de ésta aguas arriba, y por lo tanto, esto pudo afectar la eficiencia de remoción en este sector.

La constante manipulación de los testigos del borde, también pudo tener un efecto importante en la veracidad de los resultados de las Figura 8-1 a Figura 8-4, ya que muchas variables externas intervienen en el proceso de extracción, pesaje y posterior colocación de estos testigos, que además fueron utilizados varias veces en el período de experimentación.

Por otro lado, la ubicación de los testigos en la parte superior de la tubería permite sacar varias conclusiones:

- El crecimiento de la biopelícula en una sección transversal de una tubería no es homogéneo: En la parte inferior de ésta se observó un mayor crecimiento que en la parte superior debido a partículas sedimentadas que pasaron a formar parte de la biopelícula.

- Al tener los testigos en la parte superior, el crecimiento que se evidencia no es tan alto al que se registraría si estuvieran en la parte inferior, sin embargo, es una mejor aproximación a las biopelículas en redes de distribución de agua potable, ya que en éstas el agua va a una velocidad tal que no permite la fácil sedimentación de partículas suspendidas en el agua.
- Un período de experimentación más largo, sobretodo durante la fase 1, permitiría evaluar la hipótesis planteada anteriormente. Es posible que cuando la biopelícula alcance su estado maduro, colonice de manera homogénea toda la sección transversal de la tubería.

A partir del segundo lavado, se evidenció un claro deterioro de la calidad del agua, debido a la aparición de algas dentro de la tubería. El color del agua no varió como en la investigación anterior, aunque los registros fotográficos y los resultados de medición de las biopelículas sí se vieron afectados.

9.3 Con respecto al comportamiento de las pérdidas de energía

La determinación de las pérdidas de energía fue tal como se especulaba: Las pérdidas menores en las uniones fueron disminuyendo a medida que la biopelícula crecía, siendo éstas reestablecidas al valor inicial luego de cada uno de los lavados. Las pérdidas por fricción por el contrario, fueron aumentando con el crecimiento bacteriano, disminuyendo nuevamente luego de los lavados.

No fue posible cuantificar el aumento en la rugosidad de las tuberías debido al crecimiento de las biopelículas, ya que durante todo el período de experimentación, la biopelícula estuvo muy por debajo de la subcapa laminar viscosa, siendo incluso menor que el límite para entrar al flujo turbulento transicional.

Al estar dentro de la zona de flujo turbulento hidráulicamente liso, la rugosidad del material no afecta a las pérdidas de energía siendo éstas ocasionadas únicamente por el régimen de flujo (Re); por lo tanto, mediante el uso de las ecuaciones tradicionales para el cálculo del factor de fricción no es posible determinar un valor de rugosidad absoluta.

9.4 Con respecto a la influencia del diámetro y material de las tuberías en los resultados obtenidos

La intención de utilizar cuatro tuberías en paralelo de diferentes diámetros y materiales era la de poder comparar los diferentes parámetros analizados y determinar la influencia tanto del diámetro como del material para el caso de la tubería de Biaxial.

La tasa de crecimiento de las biopelículas durante la primera fase de experimentación fue mayor en las tuberías de mayor diámetro, debido a que, bajo una misma velocidad de crecimiento, el esfuerzo cortante en las paredes es menor y por lo tanto se facilita el crecimiento de las biopelículas. No se evidenció mucha diferencia entre la tasa de crecimiento entre el PVC y el PVC Biaxial.

La tubería de Biaxial dejó de funcionar en el día 90 por lo que no es posible realizar comparaciones entre este material y los demás a partir de esta fecha. Aparentemente, se adhiere menos biopelícula en este material que en PVC, sin embargo es necesario realizar más investigaciones en este aspecto para contar con herramientas de comparación.

9.5 Con respecto al lavado como control de la biopelícula.

De acuerdo con los resultados obtenidos es posible concluir que los lavados sucesivos son una herramienta efectiva para controlar el crecimiento de las biopelículas en las paredes internas de las tuberías, y de esta forma mantener no sólo la capacidad hidráulica de éstas, sino prevenir eventos de coloración del agua por causa de un desprendimiento en masa de las biopelículas.

Los resultados presentados en esta investigación corresponden a tuberías presurizadas, no de agua potable, por lo que es necesario evaluar la pertinencia de extrapolar las conclusiones presentadas al caso de las redes de distribución de agua potable. Sin embargo, sin importar la calidad del agua del modelo experimental, la eficiencia de los lavados y el control de las biopelículas a través de lavados sucesivos mostrados en esta investigación, demuestran que el lavado con agua a presión o “flushing” es una herramienta efectiva para realizar un mantenimiento rutinario de las redes.

Sin embargo, es necesario realizar un análisis de costo – beneficio, pues para lograr los porcentajes de remoción alcanzados fue necesario utilizar una velocidad 5 veces más grande que la velocidad normal de funcionamiento, lo que hace que la cantidad de agua perdida para efectos del lavado sea considerable. Traduciendo esto al costo de utilizar toda esa agua, y en tuberías no sólo de 2.5”, 3” y 4” sino hasta 12” que es lo que se recomienda en la literatura, se evidencia la necesidad de evaluar la factibilidad económica de implementar el lavado como herramienta de mantenimiento de las redes de distribución.

Por ser una de las primeras aproximaciones al tema de lavados en tuberías, esta investigación fue muy cualitativa, es decir, se enfocó en demostrar la tendencia de los comportamientos tanto de las biopelículas como de las pérdidas de energía, sin llegar a cuantificarlos; por lo tanto, se recomienda que en una futura investigación se trate de cuantificar no sólo el cambio progresivo de cada fenómeno analizado, sino la magnitud de éste.

9.6 Con respecto a la velocidad de regeneración de la biopelícula

Como se dijo anteriormente, la tasa de crecimiento inicial fue mayor en las tuberías de mayor diámetro debido a las bajas velocidades que se generaron cerca de las paredes de la tubería. Sin embargo, luego del primer lavado las velocidades de regeneración en las diferentes tuberías no presentaron un comportamiento uniforme. Luego del primer lavado, la tubería de 3” tuvo un crecimiento acelerado de 3.65 $\mu\text{m}/\text{día}$, mientras que las tuberías de 2.5” y 4” en PVC presentaron un crecimiento cercano a la mitad, es decir 1.63 $\mu\text{m}/\text{día}$. Luego del segundo lavado, todas las tasas de regeneración, y por lo tanto las velocidades de re – crecimiento disminuyeron, siendo la más notoria nuevamente la de 3” en PVC, que disminuyó a 0.06 $\mu\text{m}/\text{día}$.

El análisis anterior permite concluir que es necesario realizar una nueva investigación cuyo énfasis principal sea la regeneración de las biopelículas, pues en este aspecto no se encontraron resultados confiables en la presente investigación.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bakke R, Kommedal R, Kalvenes S. 2001. Quantification of biofilm accumulation by an optical approach. *Journal of Microbiological Methods*. Vol 44. p. 13 – 26
- [2] Beyenal H, Lewandowski Z. 2002. Internal and External Mass Transfer in Biofilms Grown at Various Flow Velocities. *Biotechnology Progress*. Vol 18. p 55 – 61.
- [3] Boxall J.B, Skipworth P.J, Saul A.J. 2002. Aggressive flushing for discolouration event mitigation in water distribution networks.
- [4] Boxall J.B, Saul A.J, Gunstead J.D, Dewis N. 2003. Regeneration of discolouration in distribution systems.
- [5] Ellison D. 2003. Investigation of Pipe Cleaning Methods. *AWWA Research Foundation and American Water Works Association*. 2P-2C-90938-9/03-CM
- [6] Horn H, Reiff H, Morgenroth E. 2003. Simulation of Growth and Detachment in Biofilm Systems Under Defined Hydrodynamic Conditions. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 81, No. 5. p. 607 – 617.
- [7] Kerr C.J, Osborn, K.S, Robson G.D, Handley P.S. 1999. The relationship between pipe material and biofilm formation in a laboratory model system. *Journal of Applied Microbiology Symposium Supplement*. Vol 85. p. 29S – 38S.
- [8] Kwok W.K, Picioreanu C, Ong S.L, Van Loosdrecht M, Heijnen J.J. 1998. Influence of Biomass Production and Detachment Forces on Biofilm Structures in a Biofilm Airlift Suspension Reactor. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 58, No. 4. p. 401 – 407
- [9] Muñoz Realpe, Luis Fernando. 2005. Velocidad de Desprendimiento de las Biopelículas en Tuberías de Distribución de Agua Potable. *Tesis de Maestría. Universidad de los Andes*.
- [10] Niquette P, Servais P, Savoir R. 2000. Impacts of pipe materials on densities of fixed bacterial biomass in a drinking water distribution system. *Water Resources*. Vol. 34, No. 6. p. 1952 – 1956.
- [11] Pedersen K. 1990. Biofilm development on stainless steel and PVC surfaces in drinking water. *Water Resources*. Vol. 24, No. 2. p. 239 – 243.
- [12] Peyton B, Characklis W.G. 1993. A Statistical Analysis of the Effect of Substrate Utilization and Shear Stress on the Kinetics of Biofilm Detachment. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 41. p. 728 – 735.
- [13] Picioreanu C, Van Loosdrecht M, Heijnen J.J. 2001. Two-Dimensional Model of Biofilm Detachment Caused by Internal Stress from Liquid Flow. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol. 72, No. 2. p. 205 – 218.

- [14] Reyes del Toro, Paula. 2004. Aspectos Hidráulicos para el Lavado de Redes de Distribución de Agua Potable. *Tesis de pregrado. Universidad de los Andes.*
- [15] Saldarriaga, Juan Guillermo. 2000. Capítulo 1: Introducción al flujo en tuberías. En McGraw Hill. *Hidráulica de Tuberías.* (pp. 1 – 72) Bogotá, Colombia.
- [16] Stewart P.S. 1993. A Model of Biofilm Detachment. *Biotechnology & Bioengineering.* Vol 41, No. 1. p. 111 – 117.
- [17] Stoodley P, Dodds I, Boyle J. D, Lappin – Scott H. 1999. Influence of Hydrodynamics and Nutrients on Biofilm Structure. *Journal of Applied Microbiology Symposium Supplement.* Vol 85. p 19S – 28S.
- [18] Vargas Gamarra, Andrea. 2004. Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelículas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable. Estado del arte. *Tesis de pregrado. Universidad de los Andes.*
- [19] Webb J, Nixon M, Eastwood I.M, Greenhalgh M, Robson G.D, Handley P. 2000. Fungal Colonization and Biodeterioration of Plasticized Polyvinyl Chloride. *Applied and Environmental Microbiology.* Vol 66, No. 8. p. 3194 – 3200

ANEXO 1

Datos y curvas de calibración de los vertederos

VERTEDERO 1 : Tubería PVC 3"

h_0 (cm)		3,00			
Apertura V (vueltas)	Nivel (cm)	Volumen (Lts)	Tiempo (seg)	Tiempo Prom. (seg)	Caudal Lts/seg
1	8,55	12	22,86	22,69	0,529
			23,07		
			22,41		
			22,58		
			22,55		
1,25	9,97	12	10,26	10,22	1,174
			10,05		
			10,14		
			10,33		
			10,32		
1,5	11,13	12	6,04	6,03	1,989
			6,05		
			6,16		
			6,03		
			5,88		
1,75	13,35	12	4,56	4,33	2,770
			4,37		
			4,29		
			4,1		
			4,34		
2	13,9	12	3,4	3,34	3,595
			3,3		
			3,34		
			3,45		
			3,2		
2,25	14,69	12	2,71	2,75	4,370
			2,86		
			2,68		
			2,82		
			2,66		
2,75	16,1	12	1,88	1,91	6,296
			1,87		
			2,01		
			1,95		
			1,82		
3,25	17,17	12	1,5	1,60	7,500
			1,7		
			1,58		
			1,68		
			1,54		

VERIFICACIÓN

-	18,41	12	1,38	1,39	8,618
			1,5		
			1,3		
			1,39		
-	20,18	12	0,99	0,99	12,183
			0,93		
			0,97		
			1,05		

VERTEDERO 1 : Tubería PVC 3"

EXPERIMENTAL

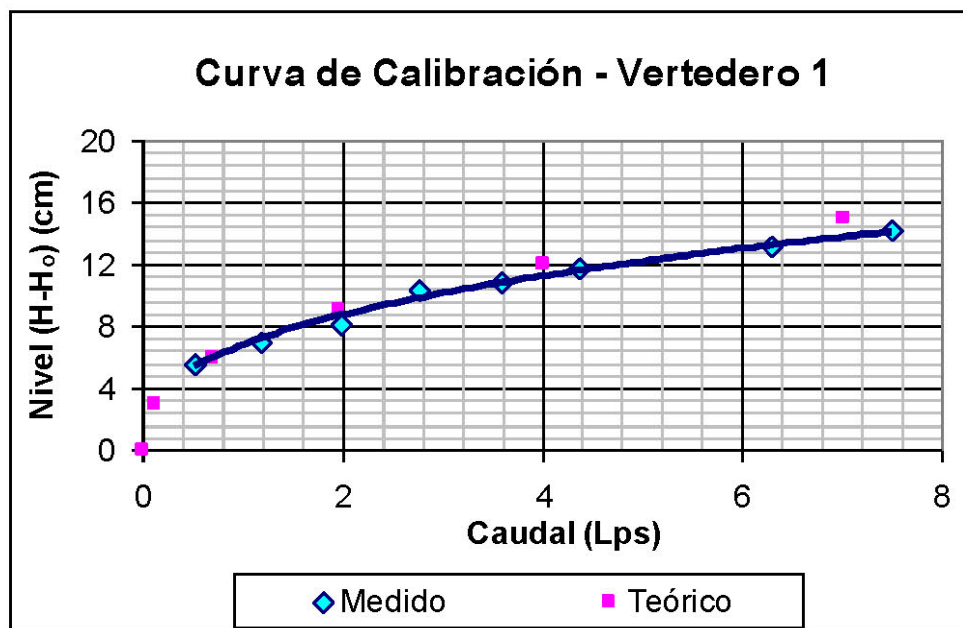
Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
8,55	5,55	0,06	0,529	0,0005
9,97	6,97	0,07	1,174	0,0012
11,13	8,13	0,08	1,989	0,0020
13,35	10,35	0,10	2,770	0,0028
13,90	10,90	0,11	3,595	0,0036
14,69	11,69	0,12	4,370	0,0044
16,10	13,10	0,13	6,296	0,0063
17,17	14,17	0,14	7,500	0,0075

VERIFICACIÓN

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
18,41	18,41	0,18	8,618	0,0086
20,18	20,18	0,20	12,183	0,0122

TEÓRICO

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	Caudal (Lts/seg)
3	0	0,000
6	3	0,125
9	6	0,710
12	9	1,955
15	12	4,014
18	15	7,012
21	18	11,062



$$Q = 0.0126 (H - H_0)^{2.3341}$$

VERTEDERO 2: Tubería PVC 4"

h_0 (cm) 4,02

Apertura V (vueltas)	Nivel (cm)	Volumen (Lts)	Tiempo (seg)	Tiempo Prom. (seg)	Caudal Lts/seg
1,25	11,53	12	7,68	7,68	1,563
			7,68		
			7,64		
			7,69		
			7,71		
1,5	13,22	12	4,65	4,65	2,580
			4,72		
			4,61		
			4,63		
2	15,51	12	2,63	2,67	4,488
			2,74		
			2,5		
			2,72		
2,25	16,4	12	2,16	2,24	5,352
			2,26		
			2,12		
			2,37		
2,75	17,96	12	1,6	1,64	7,308
			1,56		
			1,7		
			1,65		
3,25	19,22	12	1,4	1,40	8,559
			1,35		
			1,41		
			1,5		
3,75	20,47	12	1,15	1,11	10,850
			1,07		
			1,14		
			1,08		
4,25	21,46	12	0,77	0,91	13,187
			0,98		
			0,78		
			1,01		

VERIFICACIÓN

-	23,65	22	1,31	1,24	17,706
			1,18		
			1,25		
			1,23		
-	25,59	22	0,89	0,91	24,242
			0,81		
			1,01		
			0,92		

VERTEDERO 2: Tubería PVC 4"

EXPERIMENTAL

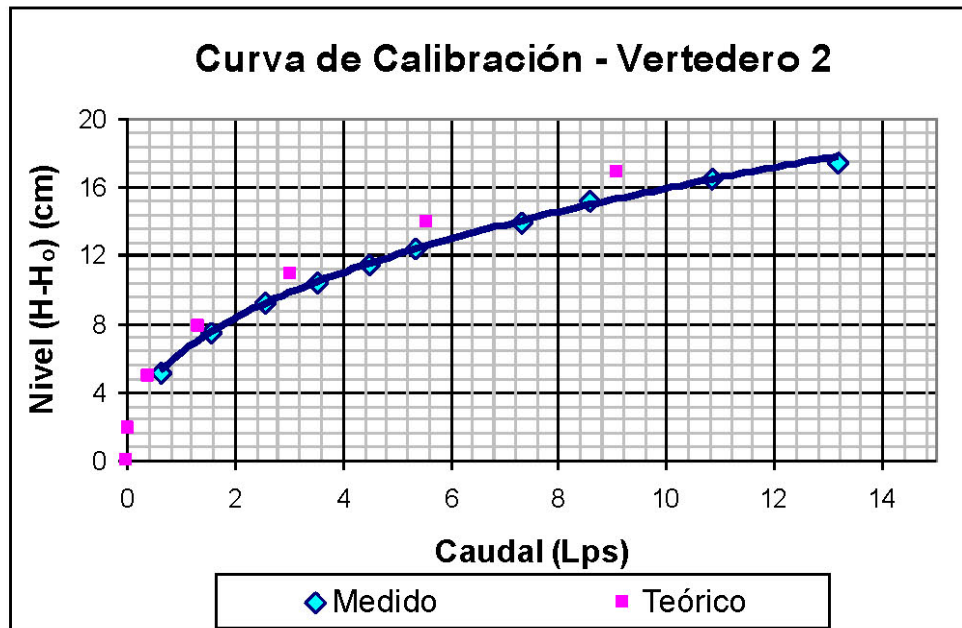
Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
9,19	5,17	0,05	0,639	0,0006
11,53	7,51	0,08	1,563	0,0016
13,22	9,20	0,09	2,580	0,0026
14,44	10,42	0,10	3,544	0,0035
15,51	11,49	0,11	4,488	0,0045
16,40	12,38	0,12	5,352	0,0054
17,96	13,94	0,14	7,308	0,0073
19,22	15,20	0,15	8,559	0,0086
20,47	16,45	0,16	10,850	0,0108
21,46	17,44	0,17	13,187	0,0132

VERIFICACIÓN

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
23,65	23,65	0,24	17,706	0,0177
25,59	25,59	0,26	24,242	0,0242

TEÓRICO

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	Caudal (Lts/seg)
4,12	0	0,000
6	1,88	0,038
9	4,88	0,409
12	7,88	1,355
15	10,88	3,036
18	13,88	5,580
21	16,88	9,101



$$Q = 0.017 (H - H_0)^{2.27}$$

VERTEDERO 3: Tubería BIAxIAL 4"

h_0 (cm) 3,43

Apertura V (vueltas)	Nivel (cm)	Volumen (Lts)	Tiempo (seg)	Tiempo Prom. (seg)	Caudal Lts/seg
-	9,07	12	15,92	15,76	0,762
			15,77		
			15,99		
			15,6		
			15,5		
-	12,3	12	5,21	5,60	2,144
			5,65		
			5,65		
			5,92		
-	14,47	12	5,55	2,92	4,104
			2,94		
			3,1		
			2,82		
-	15,8	12	2,88	2,14	5,597
			2,88		
			2,13		
			2,02		
-	17,54	12	2,17	1,66	7,238
			2,2		
			2,2		
			1,57		
-	18,21	12	1,57	1,38	8,721
			1,7		
			1,7		
			1,75		
-	19,08	12	1,33	1,27	9,434
			1,38		
			1,4		
			1,4		
-	22,75	17	1,37	1,16	14,630
			1,3		
			1,34		
			1,23		
-	22,31	22	1,2	1,34	16,449
			1,29		
			1,21		
			1,15		
-	26,14	22	1,24	0,98	22,449
			1,12		
			1,09		
			0,91		

VERIFICACIÓN

-	22,31	22	1,34	1,34	16,449
			1,35		
			1,28		
			1,38		
-	26,14	22	1	0,98	22,449
			1,03		

VERTEDERO 3: Tubería BIAxIAL 4"

EXPERIMENTAL

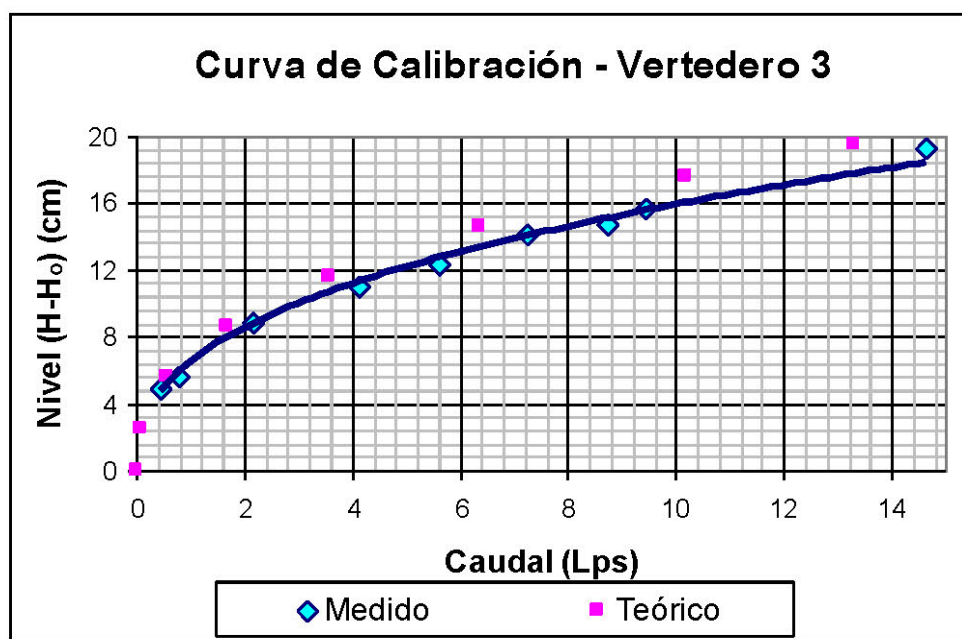
Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
8,40	4,97	0,05	0,431	0,0004
9,07	5,64	0,06	0,762	0,0008
12,30	8,87	0,09	2,144	0,0021
14,47	11,04	0,11	4,104	0,0041
15,80	12,37	0,12	5,597	0,0056
17,54	14,11	0,14	7,238	0,0072
18,21	14,78	0,15	8,721	0,0087
19,08	15,65	0,16	9,434	0,0094
22,75	19,32	0,19	14,630	0,0146

VERIFICACIÓN

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
22,31	22,31	0,22	16,449	0,0164
26,14	26,14	0,26	22,449	0,0224

TEÓRICO

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	Caudal (Lts/seg)
3,43	0	0,000
6	2,57	0,083
9	5,57	0,575
12	8,57	1,689
15	11,57	3,577
18	14,57	6,366
21	17,57	10,166
23	19,57	13,310



$$Q = 0.0121 (H - H_0)^{2.3812}$$

VERTEDERO 4: Tubería PVC 2.5"

h_0 (cm) <u>2,77</u>					
Apertura V (vueltas)	Nivel (cm)	Volumen (Lts)	Tiempo (seg)	Tiempo Prom. (seg)	Caudal Lts/seg)
1	8,45	12	15,01	15,08	0,796
			15,32		
			15,06		
			14,98		
			15,05		
1,25	9,67	12	9,37	9,42	1,274
			9,46		
			9,37		
			9,38		
			9,5		
1,5	11,5	12	6,19	6,14	1,954
			6,18		
			6,25		
			6,03		
			6,05		
1,75	12,17	12	4,43	4,40	2,727
			4,3		
			4,32		
			4,5		
			4,45		
2	13,15	12	3,4	3,37	3,557
			3,24		
			3,53		
			3,4		
			3,3		
2,25	14,13	12	2,78	2,69	4,454
			2,64		
			2,89		
			2,61		
			2,55		
2,75	15,9	12	1,83	1,86	6,445
			1,9		
			1,86		
			1,85		
			1,87		
3,25	16,49	12	1,5	1,44	8,345
			1,41		
			1,41		
			1,43		
			1,44		

VERIFICACIÓN

-	15,92	12	1,65	1,71	7,031
			1,75		
			1,72		

VERTEDERO 4: Tubería PVC 2.5"

EXPERIMENTAL

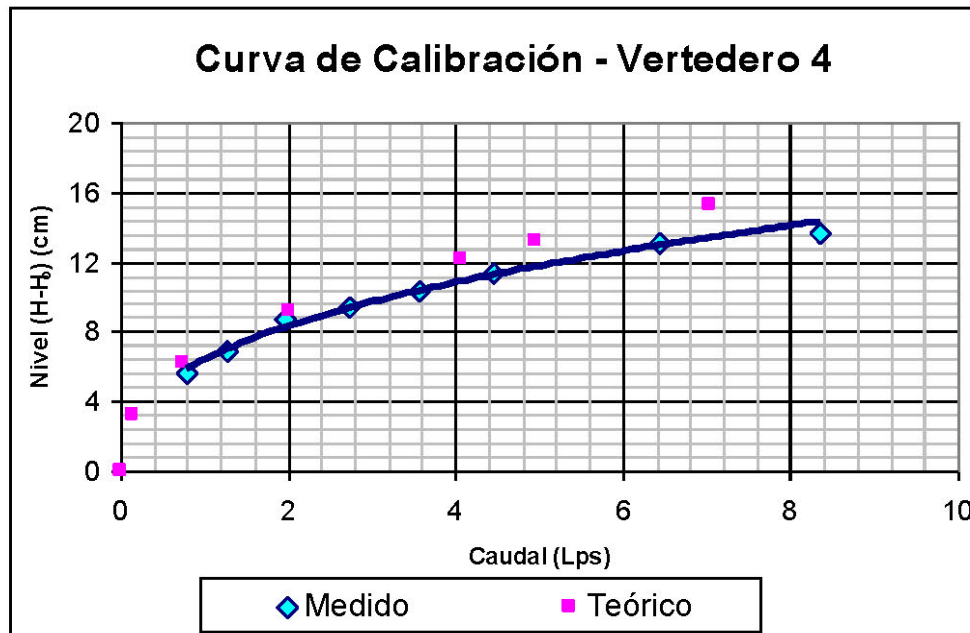
Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
8,45	5,68	0,06	0,796	0,0008
9,67	6,90	0,07	1,274	0,0013
11,50	8,73	0,09	1,954	0,0020
12,17	9,40	0,09	2,727	0,0027
13,15	10,38	0,10	3,557	0,0036
14,13	11,36	0,11	4,454	0,0045
15,90	13,13	0,13	6,445	0,0064
16,49	13,72	0,14	8,345	0,0083

VERIFICACIÓN

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	H-Ho (m)	Caudal (Lts/seg)	Caudal (m3/s)
15,92	15,92	0,16	7,031	0,0070

TEÓRICO

Nivel (cm)	H-Ho (cm)	Caudal (Lts/seg)
2,77	0	0,000
6	3,23	0,146
9	6,23	0,753
12	9,23	2,012
15	12,23	4,067
16	13,23	4,950
18	15,23	7,037



$$Q = 0.0129 (H - H_0)^{2.3812}$$

ANEXO 2

Bitácora diaria de actividades

Día	Fecha	ACTIVIDADES					
		Recirculación	Nutrientes	Lecturas Piezómetros	Pesaje Testigos	Lavado	Otros
1	11/03/2005	Primer día de recirculación. Se prendió el montaje a las 12 y se apaga a las 5	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Se cuenta con el peso inicial de los testigos con anillos dado que es el primer día de recirculación	---	---
4	14/03/2005	Segundo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:20 y se apaga a las 12	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
5	15/03/2005	---	---	---	---	---	Se despresurizaron las tuberías para reparar los piezómetros
6	16/03/2005	---	---	---	---	---	Se despresurizaron las tuberías para reparar los piezómetros
7	17/03/2005	Tercer día de recirculación. Se prendió el montaje a las 11 y se apaga a las 4:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Se realizó el primer pesaje de los testigos con anillos	---	---
13	23/03/2005	Cuarto día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10:20 y se apaga a las 12:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	Se realizó la primera prueba de piezómetros variando 10 caudales en un rango pequeño	---	---	---
16	26/03/2005	Quinto día de recirculación. Se prendió el montaje a las 2:30 y se apaga a las 5:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	Se realizó la segunda prueba de piezómetros variando 10 caudales en un rango pequeño	Se realizó el segundo pesaje de los testigos del borde.	---	---
18	28/03/2005	Sexto día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9:20 y se apaga a las 12	---	---	---	---	---
19	29/03/2005	Séptimo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10:30 y se apaga a las 2:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Tercer pesaje de los testigos del borde.	---	---
20	30/03/2005	Octavo día de recirculación. Se prendió el montaje a las ? y se apaga a las ?	---	Tercera prueba de piezómetros variando 10 caudales en un rango pequeño	---	---	---
21	31/03/2005	Noveno día de recirculación. Se prendió el montaje a las 11 y se apaga a las 4:45	---	---	Cuarto pesaje de los testigos del borde.	---	---
22	01/04/2005	Décimo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10 y se apaga a las 4:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
23	02/04/2005	Se prendió el montaje para hacer pruebas únicamente.	---	Cuarta prueba de piezómetros variando 10 caudales en un rango pequeño	Quinto pesaje de los testigos del borde.	---	Registro Fotográfico
25	04/04/2005	Onceavo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10 y se apaga a las 12	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---

Día	Fecha	ACTIVIDADES					
		Recirculación	Nutrientes	Lecturas Piezómetros	Pesaje Testigos	Lavado	Otros
26	05/04/2005	Doceavo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10:30 y se apaga a las 4	---	---	Sexto pesaje de los testigos del borde.	---	---
28	07/04/2005	Treceavo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 3:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Sptimo pesaje de los testigos del borde.	---	---
32	11/04/2005	Catorceavo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:30 y se apaga a las 10:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	Quinta prueba de piezómetros variando 10 caudales en un rango pequeño	Octavo pesaje de los testigos del borde.	---	Se lavó el vertedero 1 sin despresurizar. Registro fotográfico
33	12/04/2005	15vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:30 y se apaga a las ?	---	---	Noveno pesaje de los testigos del borde.	---	---
35	14/04/2005	16vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 3:00 y se apaga a las 6:00	---	---	---	---	Se lavaron los otros tres vertederos sin despresurizar.
37	16/04/2005	17vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9:30 y se apaga a las 11:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
39	18/04/2005	18vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:30 y se apaga a las 11:30	---	Sexta prueba de piezómetros variando 10 caudales en un rango pequeño	Décimo pesaje de los testigos del borde.	---	---
40	19/04/2005	19vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:30 y se apaga a las 11:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
42	21/04/2005	Sólo se prendió el montaje para la prueba	---	Séptima prueba de piezómetros variando 10 caudales en un rango pequeño	---	---	---
43	22/04/2005	20vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 2:00 y se apaga a las 6:15	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Onceavo pesaje de los testigos del borde.	---	---
47	26/04/2005	21vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 2:00 y se apaga a las 6:15	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
48	27/04/2005	22vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 2:00 y se apaga a las 6:15	---	---	---	---	---
49	28/04/2005	23vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 11:30 y se apaga a las 3:40	---	---	---	---	---

Día	Fecha	ACTIVIDADES					
		Recirculación	Nutrientes	Lecturas Piezómetros	Pesaje Testigos	Lavado	Otros
50	29/04/2005	24vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:30 y se apaga a las 5	---	Se realizó una prueba de piezómetros antes del lavado	Se pesaron los testigos del borde antes y después del lavado, se pesaron los testigos 1a y 1b. Se determinó densidad en los testigos 1a	Se realizó un lavado de 20 min en cada tubería	Registro Fotográfico
51	30/04/2005	25vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 12	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	Novena prueba de piezómetros. Primera después del lavado	Doceavo pesaje de los testigos del borde.	---	---
53	02/05/2005	26vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:45 y se apaga a las ?	---	---	---	---	---
61	10/05/2005	27vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10 y se apaga a las 3	---	---	---	---	---
65	14/05/2005	28vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 11:30	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	Décima prueba de piezómetros	Treceavo pesaje de los testigos del borde y se pesaron los testigos 2b como control intermedio	---	---
68	17/05/2005	29vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 4	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
69	18/05/2005	30vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9:30 y se apaga a las 5	---	Onceava prueba de piezómetros	---	---	---
70	19/05/2005	32vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10 y se apaga a las 3	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	Se realizó una prueba de piezómetros antes del lavado	Se pesaron los testigos del borde antes del lavado, se pesaron los testigos 3b	Segundo Lavado durante 20 minutos en cada tubería	Registro Fotográfico antes del lavado
74	23/05/2005	33vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:30 y se apaga a las 4	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Se pesaron los testigos del borde después del lavado, se pesaron los testigos 3a	---	Registro Fotográfico después del lavado
77	26/05/2005	34vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 11 y se apaga a las 4	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	Treceava prueba de piezómetros	---	---	Registro Fotográfico del montaje
83	01/06/2005	35vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10 y se apaga a las 3	---	---	---	---	---
84	02/06/2005	36vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 4	---	---	---	---	---
85	03/06/2005	37vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 4	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Se pesaron los testigos del borde y los testigos 2a como control intermedio	---	---
89	07/06/2005	37vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 4	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
90	08/06/2005	38vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 4	---	Se realizó una prueba de piezómetros antes del lavado	Se pesaron los testigos del borde antes del lavado, se pesaron los testigos 4b	Tercer Lavado durante 20 minutos en cada tubería	---

Día	Fecha	ACTIVIDADES					
		Recirculación	Nutrientes	Lecturas Piezómetros	Pesaje Testigos	Lavado	Otros
91	09/06/2005	39vo día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10 y se apaga a las 1	---	Se realizó una prueba de piezómetros después del lavado	Se pesaron los testigos del borde después del lavado, se pesaron los testigos 4a	---	Se dañó la válvula de regulación de la tubería de 4" en PVC Biaxial.
92	10/06/2005	40 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 4	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
95	13/06/2005	41 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 11 y se apaga a las 5	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
99	17/06/2005	42 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 10 y se apaga a las 6	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Se pesaron los testigos del borde	---	---
102	20/06/2005	43 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 4	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	16va Prueba de Piezómetros	---	---	---
105	23/06/2005	44 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 11 y se apaga a las 3	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	Se pesaron los testigos del borde y los testigos 6b como control intermedio	---	---
109	27/06/2005	45 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 8:30 y se apaga a las 12	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
110	28/06/2005	46 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 9 y se apaga a las 5	---	Se realizó una prueba de piezómetros antes y otra después del lavado	Se pesaron los testigos del borde antes y después del lavado, se pesaron los testigos 5 a y b.	Cuarto Lavado durante 20 minutos en las tres tuberías.	---
113	01/07/2005	47 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 2 y se apaga a las 6	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
116	05/07/2005	48 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 2 y se apaga a las 6	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	---	---	---	---
120	08/07/2005	49 día de recirculación. Se prendió el montaje a las 3 y se apaga a las 6	Se agregaron nutrientes en el tanque alto: 21 g de DAP y 25 g de Panela	19va Prueba de Piezómetros	Se pesaron los testigos del borde	---	---

ANEXO 3

Velocidades de Recirculación de las tuberías del montaje

VELOCIDAD DE RECIRCULACIÓN

Ho 3 D 0.0792 Ho 4.02 D 0.1039

Día	Vertedero 1: Tubería PVC 3"				Vertedero 2: Tubería PVC 4"			
	Nivel Leído	Nivel H - Ho	Caudal	Velocidad	Nivel Leído	Nivel H - Ho	Caudal	Velocidad
4	11.32	8.32	0.0018	0.36	15.19	11.17	0.0043	0.50
7	11.84	8.84	0.0021	0.42	14.9	10.88	0.0040	0.47
13	12.09	9.09	0.0022	0.46	14.97	10.95	0.0041	0.48
16	11.91	8.91	0.0021	0.43	14.82	10.8	0.0039	0.46
18	12.02	9.02	0.0022	0.45	14.82	10.8	0.0039	0.46
21	12.1	9.1	0.0023	0.46	14.85	10.83	0.0039	0.47
22	12.14	9.14	0.0023	0.46	14.68	10.66	0.0038	0.45
25	12.12	9.12	0.0023	0.46	14.74	10.72	0.0038	0.45
26	11.8	8.8	0.0021	0.42	14.78	10.76	0.0039	0.46
28	11.96	8.96	0.0022	0.44	14.76	10.74	0.0039	0.46
32	12.15	9.15	0.0023	0.46	14.69	10.67	0.0038	0.45
33	12.01	9.01	0.0022	0.45	14.78	10.76	0.0039	0.46
35	12.77	9.77	0.0027	0.56	15.12	11.1	0.0042	0.50
39	12.98	9.98	0.0029	0.59	15.09	11.07	0.0042	0.49
40	12.39	9.39	0.0025	0.50	15.15	11.13	0.0042	0.50
42	12.37	9.37	0.0024	0.50	15.17	11.15	0.0042	0.50
47	12.47	9.47	0.0025	0.51	15.19	11.17	0.0043	0.50
48	12.44	9.44	0.0025	0.51	15.05	11.03	0.0041	0.49
50	12.41	9.41	0.0025	0.50	15.15	11.13	0.0042	0.50
51	12.42	9.42	0.0025	0.50	15.17	11.15	0.0042	0.50
53	12.36	9.36	0.0024	0.49	15.26	11.24	0.0043	0.51
65	12.52	9.52	0.0025	0.52	15.22	11.2	0.0043	0.51
69	12.45	9.45	0.0025	0.51	15.15	11.13	0.0042	0.50
74	12.37	9.37	0.0024	0.50	15.2	11.18	0.0043	0.50
77	12.4	9.4	0.0025	0.50	15.18	11.16	0.0043	0.50
84	12.39	9.39	0.0025	0.50	15.16	11.14	0.0042	0.50
85	12.39	9.39	0.0025	0.50	15.28	11.26	0.0044	0.51
95	12.48	9.48	0.0025	0.51	15.22	11.2	0.0043	0.51
99	12.46	9.46	0.0025	0.51	15.23	11.21	0.0043	0.51
102	12.44	9.44	0.0025	0.51	15.2	11.18	0.0043	0.50
105	12.45	9.45	0.0025	0.51	15.25	11.23	0.0043	0.51
109	12.4	9.4	0.0025	0.50	15.18	11.16	0.0043	0.50
110	12.38	9.38	0.0024	0.50	15.21	11.19	0.0043	0.51
113	12.39	9.39	0.0025	0.50	15.16	11.14	0.0042	0.50
116	12.37	9.37	0.0024	0.50	15.15	11.13	0.0042	0.50
120	12.46	9.46	0.0025	0.51	15.2	11.18	0.0043	0.50
			0.49				0.49	

VELOCIDAD DE RECIRCULACIÓN

Ho 3.43 D 0.1073 Ho 2.77 D 0.0655

Día	Vertedero 3: Tubería Biaxial 4"				Vertedero 4: Tubería PVC 2.5"			
	Nivel Leído	Nivel H - Ho	Caudal	Velocidad	Nivel Leído	Nivel H - Ho	Caudal	Velocidad
4	15.53	12.1	0.0049	0.54	11.03	8.26	0.0020	0.59
7	15.13	11.7	0.0045	0.50	11.16	8.39	0.0021	0.62
13	15.22	11.79	0.0046	0.51	11.67	8.9	0.0024	0.72
16	14.57	11.14	0.0040	0.44	11.11	8.34	0.0020	0.61
18	14.74	11.31	0.0041	0.46	10.89	8.12	0.0019	0.56
21	13.45	10.02	0.0030	0.33	9.91	7.14	0.0014	0.40
22	14.2	10.77	0.0036	0.40	10.9	8.13	0.0019	0.57
25	14.66	11.23	0.0041	0.45	10.85	8.08	0.0019	0.56
26	14.49	11.06	0.0039	0.43	10.59	7.82	0.0017	0.51
28	14.73	11.3	0.0041	0.46	10.02	7.25	0.0014	0.42
32	14.75	11.32	0.0041	0.46	11.5	8.73	0.0023	0.68
33	14.95	11.52	0.0043	0.48	10.37	7.6	0.0016	0.47
35	15.51	12.08	0.0049	0.54	11	8.23	0.0020	0.58
39	15.25	11.82	0.0046	0.51	12.37	9.6	0.0030	0.88
40	15.06	11.63	0.0044	0.49	10.63	7.86	0.0017	0.52
42	15.2	11.77	0.0046	0.51	10.72	7.95	0.0018	0.53
47	15.22	11.79	0.0046	0.51	10.12	7.35	0.0015	0.43
48	15.08	11.65	0.0045	0.49	10.26	7.49	0.0015	0.46
50	15.07	11.64	0.0045	0.49	10.54	7.77	0.0017	0.50
51	15.15	11.72	0.0045	0.50	10.52	7.75	0.0017	0.50
53	15.07	11.64	0.0045	0.49	10.53	7.76	0.0017	0.50
65	14.8	11.37	0.0042	0.46	10.59	7.82	0.0017	0.51
69	14.65	11.22	0.0040	0.45	10.6	7.83	0.0017	0.51
74	14.13	10.7	0.0036	0.40	10.51	7.74	0.0017	0.50
77	14.35	10.92	0.0038	0.42	10.55	7.78	0.0017	0.50
84	14.4	10.97	0.0038	0.42	10.48	7.71	0.0017	0.49
85	13.3	9.87	0.0029	0.32	10.69	7.92	0.0018	0.53
95	13	9.57	0.0027	0.30	10.57	7.8	0.0017	0.51
99					10.5	7.73	0.0017	0.50
102					10.55	7.78	0.0017	0.50
105					10.48	7.71	0.0017	0.49
109					10.52	7.75	0.0017	0.50
110					10.5	7.73	0.0017	0.50
113					10.58	7.81	0.0017	0.51
116					10.56	7.79	0.0017	0.51
120					10.62	7.85	0.0017	0.52

0.46

0.53

ANEXO 4

Pruebas de piezómetros realizadas durante la experimentación

VELOCIDAD DE REGENERACIÓN DE BIOPELÍCULAS

Lecturas de Piezómetros

FECHA Marzo 23, 2005
PRUEBAS REALIZADAS 10

VERTEDERO 1: TUBERÍA DE PVC 3" Ho 3

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	1 5/8	1 3/4	1 7/8	2	2 1/8
Hini	4.03	3.9	5.19	9.62	11.22	12.26	12.85	13.3	13.79	14.37
Hfin	4.03	3.81	6.22	9.6	11.14	12.25	12.9	13.3	13.79	14.29
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
1	27	26.8	28.4	32.3	34.5	36.15	37.2	37.9	38.9	40.05
2	27.1	26.5	28.45	32.35	34.6	36.3	37.35	38.1	39.2	40.4
3	27.15	26.6	28.5	32.7	35.3	37.4	38.8	39.9	41.4	43.1

VERTEDERO 2: TUBERÍA DE PVC 4" Ho 4.02

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas	1/2	3/4	7/8	1	1 1/4	1 1/2	1 5/8	1 3/4	1 7/8	2
Hini	5	6.05	7.6	9.29	11.75	13.32	14.1	14.66	15.1	15.67
Hfin	5	6.14	8	9.4	11.77	13.37	14.17	14.61	15.18	15.64
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
4	28.1	28.7	30.45	31.95	34.5	36.4	37.35	38.1	38.8	39.4
5	28.2	28.8	30.5	32	34.6	36.5	37.5	38.3	39.1	39.8
6	28.2	28.65	30.5	32.1	34.8	36.8	37.9	38.65	39.6	40.3

VERTEDERO 3: TUBERÍA BIAxIAL DE 4" Ho 3.43

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	1 3/4	2	2 1/8	2 1/4	2 3/8
Hini	4.72	4.59	5.48	9.1	11.9	12.92	14.23	14.89	15.48	16.03
Hfin	4.72	4.59	6.05	9.15	11.92	12.96	14.23	14.8	15.5	16.03
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
7	27.6	27.5	28.5	31.8	34.9	36.1	37.7	38.45	39.3	40
8	27.65	27.5	28.55	31.9	34.95	36.15	37.8	38.5	39.4	40.2
9	27.7	27.5	28.6	32	35.1	36.45	38.3	39.1	40.2	41.5

VERTEDERO 4: TUBERÍA DE PVC 2.5" Ho 2.77

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas	1/2	3/4	7/8	1	1 1/4	1 1/2	1 5/8	1 3/4	1 7/8	2
Hini	3.84	6.08	6.87	7.95	9.9	11	11.75	12.28	12.76	13.17
Hfin	3.84	6.09	6.96	7.92	9.91	11	11.74	12.29	12.67	13.12
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
10	26.8	29.2	30	31.2	33.6	35.9	37.5	39	40.2	41.7
11	26.4	28.6	29.5	30.8	33.8	36.1	37.7	39.2	40.7	42.3
12	26.5	28.8	29.9	31.3	35.1	38.8	41.6	44.8	46.6	49.6

VELOCIDAD DE REGENERACIÓN DE BIOPELÍCULAS

Lecturas de Piezómetros

FECHA Marzo 26, 2005
 PRUEBAS REALIZADAS 10

VERTEDERO 1: TUBERÍA DE PVC 3" Ho 3

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	10.13	10.16	10.63	11.28	11.63	11.9	12.16	12.48	12.89	13.33
Hfin	10.12	10.18	10.59	11.28	11.66	11.87	12.18	12.56	12.87	13.3
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
1	33	33	33.65	34.6	35.2	35.55	36.05	37.55	37.1	37.95
2	33.05	33.1	33.7	34.7	35.25	35.7	36.2	37.75	37.3	38.2
3	33.45	33.5	34.25	35.5	36.2	36.7	37.3	38	38.9	40.1

VERTEDERO 2: TUBERÍA DE PVC 4" Ho 4.02

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	11.63	11.79	12.73	13.43	13.98	14.39	14.64	15	15.35	15.65
Hfin	11.64	11.78	12.67	13.42	13.99	14.39	14.59	14.97	15.3	15.7
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
4	34.5	34.6	35.55	36.4	37.2	37.7	38	38.5	39	39.4
5	34.55	34.7	35.7	36.6	37.4	38	38.3	38.8	39.4	39.8
6	34.6	34.9	36	36.9	37.7	38.4	38.7	39.4	40	40.4

VERTEDERO 3: TUBERÍA BIAIXIAL DE 4" Ho 3.43

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	10.8	10	10.59	11.6	11.96	12.57	13	13.48	14.14	14.76
Hfin	10.79	10	10.54	11.62	11.94	12.57	12.99	13.48	14.09	14.77
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
7	33.75	33	33.45	34.55	35	35.7	36.2	36.9	37.5	38.3
8	33.85	33.05	33.5	34.6	35.05	35.75	36.25	36.9	37.6	38.4
9	34	33.1	33.6	34.75	35.2	36	36.6	37.2	38	38.9

VERTEDERO 4: TUBERÍA DE PVC 2.5" Ho 2.77

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	10.08	10.17	10.28	10.78	11.16	11.42	11.95	12.24	12.5	12.94
Hfin	10.08	10.09	10.3	10.78	11.2	11.45	11.94	12.21	12.5	12.9
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
10	34.1	34.1	34.4	35.35	36.3	37	38	38.9	39.7	41
11	34.25	34.2	34.5	35.5	36.45	37.1	38.2	39.05	39.9	41.25
12	36.1	36	36.5	37.9	39.8	40.8	42.5	43.9	45.5	48.3

VELOCIDAD DE REGENERACIÓN DE BIOPELÍCULAS

Lecturas de Piezómetros

FECHA Marzo 30, 2005
PRUEBAS REALIZADAS 10

VERTEDERO 1: TUBERÍA DE PVC 3" Ho 3.04

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas	1									
Hini	8.5	9.4	9.99	10.5	11.12	11.66	12.04	12.37	12.6	13.05
Hfin	8.64	9.64	9.89	10.55	11.18	11.68	12.07	12.35	12.7	13
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
1	31.35	32.35	32.8	33.6	34.5	35.2	35.85	36.3	36.8	37.5
2	31.4	32.4	32.85	33.7	34.6	35.4	36	36.5	37	37.8
3	31.5	32.75	33.3	34.3	35.4	36.3	37.1	37.8	38.4	39.5

VERTEDERO 2: TUBERÍA DE PVC 4" Ho 4.09

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	9.26	10.28	11.5	12.25	12.75	13.14	13.43	14.06	14.33	14.73
Hfin	9.49	10.37	11.53	12.26	12.77	13.13	13.43	14.1	14.36	14.77
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
4	32	33	34.4	35.1	35.95	36.2	36.6	37.5	37.8	38.35
5	32.05	33.1	34.5	35.25	36.1	36.3	36.8	37.7	38	38.7
6	32.1	33.2	34.6	35.4	36.2	36.7	37.1	38.2	38.4	39.2

VERTEDERO 3: TUBERÍA BIAIXIAL DE 4" Ho 3.53

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	8.9	11.39	11.84	12.36	12.93	13.47	14.07	14.46	14.98	15.43
Hfin	9.17	11.44	11.85	12.37	12.9	13.46	14.09	14.48	14.9	15.4
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
7	32	34.4	35	35.55	36.15	36.8	37.5	38.1	38.7	39.3
8	32.05	34.4	35.05	35.6	36.2	36.85	37.6	38.2	38.8	39.4
9	32.1	34.7	35.2	35.8	36.5	37.2	37.8	38.7	39.3	40.2

VERTEDERO 4: TUBERÍA DE PVC 2.5" Ho 2.7

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	7.2	9.14	9.51	10.16	10.98	11.37	11.69	12.08	12.46	13
Hfin	7.2	9.1	9.54	10.18	10.96	11.35	11.68	12.09	12.44	12.93
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
10	31	32.3	33.2	34.25	35.8	36.81	37.3	38.4	39	40.3
11	31.1	32.45	33.3	34.45	35.9	36.9	37.5	38.5	39.7	41.2
12	31.7	33.6	34.8	36.4	38.9	40.5	41.8	43.6	46.2	48.9

Lecturas de Piezómetros

FECHA Mayo 20, 2005
 PRUEBAS REALIZADAS 10

VERTEDERO 1: TUBERÍA DE PVC 3" Ho 3

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	9.84	11.45	12.38	12.55	12.91	13.16	13.77	14.06	14.4	14.73
Hfin	9.84	11.45	12.38	12.55	12.91	13.16	13.77	14.06	14.4	14.73
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
1			36.8	37.3	37.7	38.35	39.7	40.7	41.8	42.8
2	32.4	34.9	36.85	37.5	38.1	38.6	40.2	41	42.2	43.1
3	33	36.2	38.7	39.35	40.2	41.1	43.4	44.6	46.3	47.6

VERTEDERO 2: TUBERÍA DE PVC 4" Ho 4.02

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	11.59	12.77	13.6	14.24	15.04	15.56	15.89	16.38	17.07	17.45
Hfin	11.59	12.77	13.6	14.24	15.04	15.56	15.89	16.38	17.07	17.45
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
4				38.08		39.7	40.5	41.3	42.5	43.4
5	34.1	35.7	36.65	38.1	39.2	39.8	40.7	41.6	43	44
6	34.5	36.3	37.5	38.5	40.1	40.85	41.9	43.1	44.6	46.2

VERTEDERO 3: TUBERÍA BIAIXIAL DE 4" Ho 3.43

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	11.33	12.54	13.19	12.97	14.07	14.04	14.32	15.13	15.5	18.87
Hfin	11.33	12.54	13.19	12.97	14.07	14.04	14.32	15.13	15.5	18.87
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
7	34.2	35.7	36.5	36.4	37.7	37.9	38.1	39	39.8	46
8	34.4	35.75	36.55	36.45	37.8	37.95	38.2	39.2	39.9	46.2
9	34.5	36.2	36.9	36.7	38.3	38.5	38.65	40.3	41	49.3

VERTEDERO 4: TUBERÍA DE PVC 2.5" Ho 2.77

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	8.15	10.12	10.63	10.75	11.01	11.46	11.82	12.41	12.89	13.12
Hfin	8.15	10.12	10.63	10.75	11.01	11.46	11.82	12.41	12.89	13.12
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
10		34.3	35	35.9	36.8	37.8	39.2	40.9	42.9	43.7
11	31.2	34.45	35.5	36	36.95	37.9	39.3	41	43.1	43.9
12	31.7	36.6	38.4	39.2	41	42.5	45.2	48.5	52.6	54

VELOCIDAD DE REGENERACIÓN DE BIOPELÍCULAS

Lecturas de Piezómetros

FECHA Junio 8, 2005
 PRUEBAS REALIZADAS 10

VERTEDERO 1: TUBERÍA DE PVC 3" Ho 3

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	10.11	11.07	11.85	12.46	13.19	13.71	14.19	14.68	15.2	15.68
Hfin	10.11	11.07	11.85	12.46	13.19	13.71	14.19	14.68	15.2	15.68
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
1	33.1	34	35.55	36.7	37.7	38.9	40.3	41.65	42.8	44.2
2	33.2	34.1	35.6	36.75	37.8	39.15	40.6	42.1	43.4	44.9
3	33.4	35.1	37.1	38.8	40.6	42.5	45	47.25	49.4	52.1

VERTEDERO 2: TUBERÍA DE PVC 4" Ho 4.02

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	11.68	12.94	13.8	14.48	14.84	15.36	15.91	16.37	16.87	17.38
Hfin	11.68	12.94	13.8	14.48	14.84	15.36	15.91	16.37	16.87	17.38
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
4	34.4	36.15	37.25	37.9	38.4	39.2	40	40.85	41.7	42.7
5	34.7	36.3	37.4	37.95	38.55	39.3	40.35	41.3	42.3	43.3
6	34.8	36.55	37.75	38.65	39.4	40.5	41.4	42.75	43.95	45.2

VERTEDERO 3: TUBERÍA BIAxIAL DE 4" Ho 3.43

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	9.8	11.11	11.82	12.03	13.02	12.96	13.35	13.46	13.7	13.8
Hfin	9.8	11.11	11.82	12.03	13.02	12.96	13.35	13.46	13.7	13.8
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
7	32.2	33.3	34.35	34.55	35.65	35.85	36.8	37.1	37.35	37.3
8	32.22	33.4	34.45	34.7	35.9	36.05	36.9	37.15	37.4	37.4
9	32.9	34.3	35.3	35.5	36.7	36.9	37.3	37.5	37.9	38

VERTEDERO 4: TUBERÍA DE PVC 2.5" Ho 2.77

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	8.76	9.76	10.45	11.3	11.83	12.37	12.95	13.55	13.98	14.16
Hfin	8.76	9.76	10.45	11.3	11.83	12.37	12.95	13.55	13.98	14.16
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
10	32	33.5	34.8	36.6	37.85	39.4	40.95	42.8	44.5	45.6
11	32.05	33.55	34.9	36.7	37.9	39.42	41.3	42.85	44.55	45.65
12	32.9	35.3	37.6	41	43.1	45.8	49.2	53.1	56.6	59.4

VELOCIDAD DE REGENERACIÓN DE BIOPELÍCULAS

Lecturas de Piezómetros

FECHA Junio 9, 2005
 PRUEBAS REALIZADAS 9

VERTEDERO 1: TUBERÍA DE PVC 3" Ho 3

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	10.24	11.3	12.38	13.15	13.7	14.18	14.88	15.43	15.9	
Hfin	10.24	11.3	12.38	13.15	13.7	14.18	14.88	15.43	15.9	
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
1		34.8	35.9	37.4	38.6	39.8	41.4	42.95	44.1	
2	32	35	36	37.6	38.9	40.2	41.95	43.6	44.9	
3	32.5	35.45	37.6	39.75	41.1	43.35	46.2	48.4	51.2	

VERTEDERO 2: TUBERÍA DE PVC 4" Ho 4.02

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	12.28	13.32	14.19	14.86	15.43	15.9	16.47	17.04	17.53	
Hfin	12.28	13.32	14.19	14.86	15.43	15.9	16.47	17.04	17.53	
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
4		36.4	37.3	38.2	39	39.8	40.5	41.55	42.3	
5	34.4	36.7	37.4	38.4	39.2	40.15	40.95	42.15	43	
6	35.1	37.05	37.9	39	40.3	41	42.1	43.7	44.3	

VERTEDERO 3: TUBERÍA BIAxIAL DE 4" Ho 3.43

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini										
Hfin										
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
7										
8										
9										

VERTEDERO 4: TUBERÍA DE PVC 2.5" Ho 2.77

PRUEBA No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. de vueltas										
Hini	9.25	10.35	11.06	11.69	12.25	12.76	13.2	13.6	14.02	
Hfin	9.25	10.35	11.06	11.69	12.25	12.76	13.2	13.6	14.02	
PIEZÓMETRO	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)
10	32.5	34.3	35.6	37.05	38.4	40.05	41.35	42.7	44	
11	32.55	34.4	35.65	37.1	38.5	40.15	41.6	43	44.3	
12	33.8	36.6	39.1	41.4	43.9	46.6	49.8	52.7	56.1	

ANEXO 5

Pesos de los testigos del borde para las cuatro tuberías

PESO DE LOS TESTIGOS DE ANILLOS

PI (g)	<u>112.7066</u>	<u>133.2493</u>
área (cm ²)	<u>57.65</u>	<u>52.85</u>

Día	Tubería PVC 3"			Tubería PVC 4"		
	Peso Total	Peso Biomasa	Espesor	Peso Total	Peso Biomasa	Espesor
1	112.7066	0	0	133.2493	0	0
7	112.7764	0.0698	12.11	133.3301	0.0808	15.29
16	112.8074	0.1008	17.48	133.3668	0.1175	22.23
19	112.7986	0.092	15.96	133.3532	0.1039	19.66
21	112.8188	0.1122	19.46	133.3678	0.1185	22.42
23	112.7962	0.0896	15.54	133.3598	0.1105	20.91
26	112.819	0.1124	19.50	133.3734	0.1241	23.48
28	112.8318	0.1252	21.72	133.4707	0.2214	41.89
32	112.8338	0.1272	22.06	133.4553	0.206	38.98
39	112.8352	0.1286	22.31	133.4492	0.1999	37.83
42	112.8577	0.1511	26.21	133.4879	0.2386	45.15
50	112.8568	0.1502	26.05	133.5046	0.2553	48.31
50	112.7568	0.0502	8.71	133.4245	0.1752	33.15
51	112.7634	0.0568	9.85	133.4232	0.1739	32.91
65	112.8333	0.1267	21.98	133.4266	0.1773	33.55
70	113.0771	0.3705	64.27	133.5936	0.3443	65.15
70	112.9452	0.2386	41.39	133.5469	0.2976	56.31
77	112.9541	0.2475	42.93	133.5605	0.3112	58.89
85	112.9606	0.254	44.06	133.5722	0.3229	61.10
90	112.9522	0.2456	42.60	133.5889	0.3396	64.26
90	112.8577	0.1511	26.21	133.4249	0.1756	33.23
99	112.9096	0.203	35.21	133.6239	0.3746	70.88
105	112.9438	0.2372	41.14	133.6287	0.3794	71.79
110	112.9587	0.2521	43.73	133.6324	0.3831	72.49
110	112.8452	0.1386	24.04	133.5286	0.2793	52.85
120	112.9112	0.2046	35.19	133.5896	0.3403	64.39

PESO DE LOS TESTIGOS DE ANILLOS

PI (g)	129.458	62.4287
área (cm ²)	54.74	50.56

Día	Tubería Biaxial 4"			Tubería PVC 2.5"		
	Peso Total	Peso Biomasa	Espesor	Peso Total	Peso Biomasa	Espesor
1	129.458	0	0	62.4287	0	0
7	129.5655	0.1075	19.64	62.4914	0.0627	12.40
16	129.6311	0.1731	31.62	62.5178	0.0891	17.62
19	129.5988	0.1408	25.72	62.5023	0.0736	14.56
21	129.6176	0.1596	29.16	62.5219	0.0932	18.44
23	129.5962	0.1382	25.25	62.4936	0.0649	12.84
26	129.626	0.168	30.69	62.5027	0.074	14.64
28	129.648	0.19	34.71	62.517	0.0883	17.47
32	129.6881	0.2301	42.04	62.5227	0.094	18.59
39	129.7154	0.2574	47.02	62.561	0.1323	26.17
42	129.6835	0.2255	41.20	62.5487	0.12	23.74
50	129.715	0.257	46.95	62.5629	0.1342	26.55
50	129.5984	0.1404	25.65	62.4858	0.0571	11.29
51	129.6404	0.1824	33.32	62.4905	0.0618	12.22
65	129.6755	0.2175	39.73	62.5212	0.0925	18.30
70	129.8204	0.3624	66.21	62.6506	0.2219	43.89
70	129.792	0.334	61.02	62.5676	0.1389	27.47
77	129.8243	0.3663	66.92	62.5831	0.1544	30.54
85	129.8628	0.4048	73.95	62.6004	0.1717	33.96
90	129.6503	0.1923	35.13	62.6334	0.2047	40.49
90				62.5722	0.1435	28.38
99				62.7011	0.2724	53.88
105				62.6968	0.2681	53.03
110				62.7053	0.2766	54.71
110				62.5821	0.1534	30.34
120				62.5996	0.1709	33.80

ANEXO 6

Pesos de los testigos desechables durante los lavados

TUBERÍA DE 2.5" EN PVC

Testigos tipo b: Antes del lavado

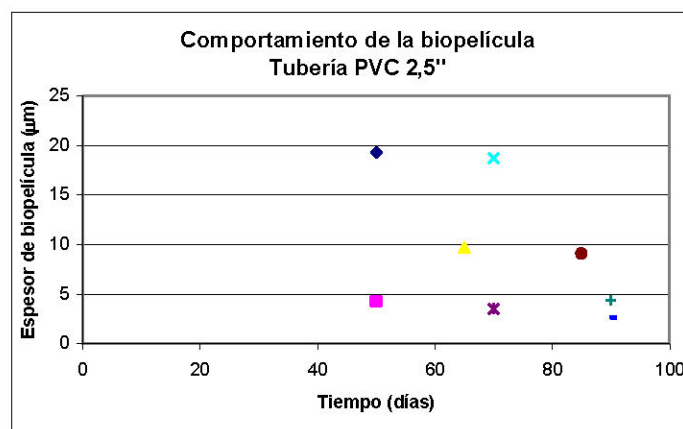
Lavado Número	Día	Tubería PVC 2,5"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	41.0647	40.9883	0.0764
-	65	43.6193	43.5798	0.0395
2	70	42.4519	42.3769	0.075
-	85	43.4992	43.4596	0.0396
3	90	45.0866	45.0695	0.0171
-				

Testigos tipo a: Después del lavado

Lavado Número	Día	Tubería PVC 2,5"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	39.9938	39.9745	0.0193
2	70	42.5013	42.4857	0.0156
3	90	46.5082	46.497	0.0112
4				0
5				0
6				

Tabla de lavado normalizada por el área de los testigos

Lavado Número	Día	Testigos tipo b				Testigos tipo a			
		Peso de la biomasa (g)	Área del testigo (cm ²)	peso / área	Espesor (μm)	Peso de la biomasa	Área del testigo	peso / área	Espesor (μm)
1	50	0.0764	39.55	0.0019	19.3186	0.0193	45.84248	0.000421007	4.210068914
-	65	0.0395	40.77906	0.00096863	9.686343923				
2	70	0.075	40.11902	0.00186944	18.69437489	0.0156	44.54803	0.000350184	3.501838353
-	85	0.0396	43.80753	0.00090395	9.039541832				
3	90	0.0171	38.96133	0.0004389	4.388967214	0.0112	43.24827	0.00025897	2.589698964
-									



TUBERÍA DE 3" EN PVC

Testigos tipo b: Antes del lavado

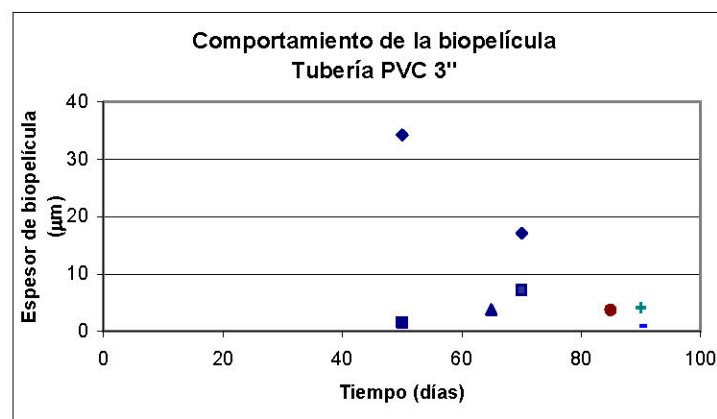
Lavado Número	Día	Tubería PVC 3"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	63.8333	63.689	0.1443
-	65	68.0775	68.0615	0.016
2	70	68.8122	68.74	0.0722
-	85	66.168	66.1523	0.0157
3	90	62.7995	62.783	0.0165
-				

Testigos tipo a: Después del lavado

Lavado Número	Día	Tubería PVC 3"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	63.2897	63.284	0.0057
2	70	61.8275	61.7958	0.0317
3	90	62.5151	62.5114	0.0037
4	110			
5				
6				

Tabla de lavado normalizada por el área de los testigos

Lavado Número	Día	Testigos tipo b				Testigos tipo a			
		Peso de la biomasa (g)	Área del testigo (cm ²)	peso / área	Espesor (μm)	Peso de la biomasa	Área del testigo	peso / área	Espesor (μm)
1	50	0.1443	42.18	0.00342	34.2079	0.0057	38.82	0.00015	1.4684
-	65	0.016	42.97	0.00037	3.7233				
2	70	0.0722	42.37	0.00170	17.0407	0.0317	44.12	0.00072	7.1857
-	85	0.0157	42.9479	0.0003656	3.6556				
3	90	0.0165	40.78466	0.0004046	4.0456	0.0037	43.58885	8.48841E-05	0.8488
-		0		#DIV/0!					



TUBERÍA DE 4" EN PVC

Testigos tipo b: Antes del lavado

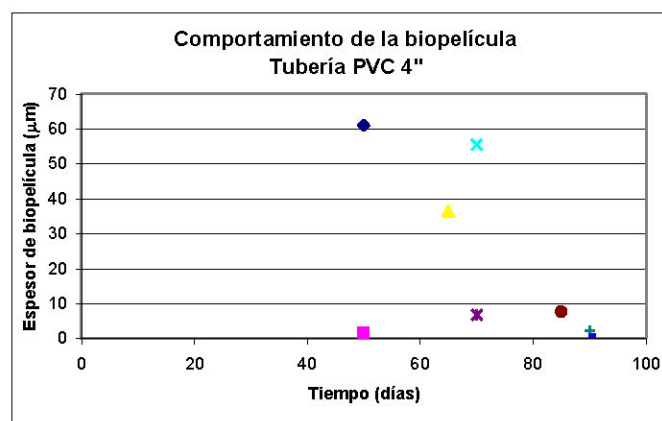
Lavado Número	Día	Tubería PVC 4"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	58.2785	58.0203	0.2582
-	65	58.2048	58.0501	0.1547
2	70	56.415	56.1836	0.2314
-	85	61.3793	61.3477	0.0316
3	90	59.3768	59.3687	0.0081
-				

Testigos tipo a: Después del lavado

Lavado Número	Día	Tubería PVC 4"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	59.6527	59.6338	0.0189
2	70	58.7785	58.7508	0.0277
3	90	55.1594	55.1564	0.003
4				
5				
6				

Tabla de lavado normalizada por el área de los testigos

Lavado Número	Día	Testigos tipo b				Testigos tipo a			
		Peso de la biomasa (g)	Área del testigo (cm ²)	peso / área	Espesor (μm)	Peso de la biomasa	Área del testigo	peso / área	Espesor (μm)
1	50	0.2582	42.32	0.0061	61.0168	0.0189	42.89672	0.000440593	4.405931269
-	65	0.1547	42.43625	0.00364547	36.45468202				
2	70	0.2314	41.73059	0.00554509	55.4509294	0.0277	41.779	0.000663013	6.630125183
-	85	0.0316	42.04966	0.00075149	7.514924021				
3	90	0.0081	40.74462	0.0001988	1.987992525	0.003	41.57526	7.21583E-05	0.72158298
-		0		#DIV/0!					



TUBERÍA DE 4" EN BIAxIAL

Testigos tipo b: Antes del lavado

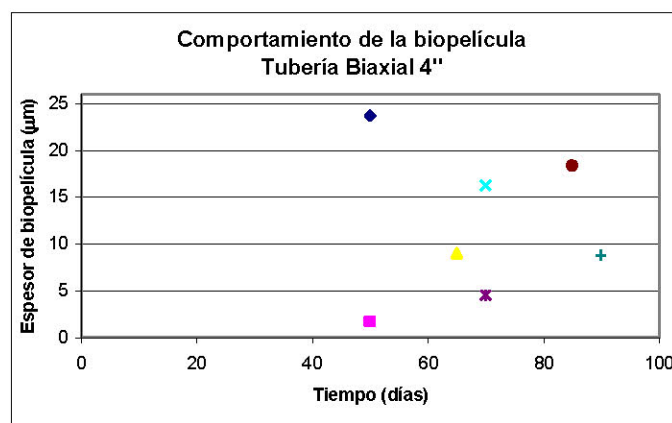
Lavado Número	Día	Tubería BIAxIAL 4"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	49.2701	49.1613	0.1088
-	65	48.3325	48.291	0.0415
2	70	47.599	47.5232	0.0758
-	85	48.1246	48.0386	0.086
3	90	52.4312	52.387	0.0442
-				

Testigos tipo a: Después del lavado

Lavado Número	Día	Tubería BIAxIAL 4"		
		Peso Con biopelícula	Peso sin biopelícula	Peso Biomasa
1	50	46.6775	46.6696	0.0079
2	70	47.2328	47.2139	0.0189
3				0
4				0
5				0
6				

Tabla de lavado normalizada por el área de los testigos

Lavado Número	Día	Testigos tipo b				Testigos tipo a			
		Peso de la biomasa (g)	Área del testigo (cm ²)	peso / área	Espesor (µm)	Peso de la biomasa	Área del testigo	peso / área	Espesor (µm)
1	50	0.1088	45.89	0.0024	23.7065	0.0079	45.8945	0.000172134	1.721339158
-	65	0.0415	45.96387	0.000902883	9.028830688				
2	70	0.0758	46.58592	0.001627101	16.27101064	0.0189	42.0417	0.000449554	4.495536574
-	85	0.086	46.82183	0.00183675	18.3675008				
3	90	0.0442	50.11827	0.000881914	8.819139208	0			
-		0		#i DIV/0!					



ANEXO 7

Tablas de cálculo de la subcapa laminar viscosa con base en la velocidad de recirculación

CÁLCULO DE LA SUBCAPA LAMINAR VISCOSA

Tubería 2.5" PVC

Día	v (m/s)	Re	f	V*	δ' (m)	δ' (μ m)	0,305 δ' (m)
4	0.59	33879	0.0229	0.0316	4.19E-04	419.25	127.87
7	0.62	35307	0.0227	0.0327	4.04E-04	404.20	123.28
13	0.72	41266	0.0219	0.0376	3.52E-04	352.00	107.36
16	0.61	34753	0.0228	0.0323	4.10E-04	409.90	125.02
18	0.56	32382	0.0231	0.0303	4.36E-04	436.34	133.09
21	0.40	23051	0.0251	0.0225	5.89E-04	588.96	179.63
22	0.57	32488	0.0231	0.0304	4.35E-04	435.09	132.70
25	0.56	31963	0.0232	0.0300	4.41E-04	441.41	134.63
26	0.51	29316	0.0237	0.0278	4.76E-04	476.46	145.32
28	0.42	24001	0.0248	0.0233	5.68E-04	568.38	173.35
32	0.68	39215	0.0221	0.0359	3.68E-04	368.29	112.33
33	0.47	27186	0.0241	0.0260	5.09E-04	509.26	155.32
35	0.58	33555	0.0229	0.0313	4.23E-04	422.83	128.96
39	0.88	50407	0.0209	0.0449	2.95E-04	294.65	89.87
40	0.52	29714	0.0236	0.0281	4.71E-04	470.81	143.60
42	0.53	30621	0.0234	0.0289	4.58E-04	458.46	139.83
47	0.43	24886	0.0246	0.0240	5.51E-04	550.54	167.91
48	0.46	26158	0.0243	0.0251	5.27E-04	526.86	160.69
50	0.50	28823	0.0238	0.0274	4.84E-04	483.64	147.51
51	0.50	28627	0.0238	0.0272	4.87E-04	486.56	148.40
53	0.50	28725	0.0238	0.0273	4.85E-04	485.10	147.96
65	0.51	29316	0.0237	0.0278	4.76E-04	476.46	145.32
69	0.51	29415	0.0237	0.0279	4.75E-04	475.04	144.89
74	0.50	28530	0.0238	0.0271	4.88E-04	488.03	148.85
77	0.50	28921	0.0237	0.0274	4.82E-04	482.19	147.07
84	0.49	28238	0.0239	0.0269	4.92E-04	492.47	150.20
85	0.53	30317	0.0235	0.0286	4.63E-04	462.53	141.07
95	0.51	29118	0.0237	0.0276	4.79E-04	479.31	146.19
99	0.50	28432	0.0238	0.0270	4.90E-04	489.50	149.30
102	0.50	28921	0.0237	0.0274	4.82E-04	482.19	147.07
105	0.49	28238	0.0239	0.0269	4.92E-04	492.47	150.20
109	0.50	28627	0.0238	0.0272	4.87E-04	486.56	148.40
110	0.50	28432	0.0238	0.0270	4.90E-04	489.50	149.30
113	0.51	29217	0.0237	0.0277	4.78E-04	477.88	145.75
116	0.51	29019	0.0237	0.0275	4.81E-04	480.75	146.63
120	0.52	29614	0.0236	0.0280	4.72E-04	472.22	144.03

CÁLCULO DE LA SUBCAPA LAMINAR VISCOSA

Tubería 3" PVC

Día	v (m/s)	Re	f	V*	δ' (m)	δ' (μ m)	0,3058' (m)
4	0.36	24942	0.0246	0.0199	6.65E-04	664.51	202.67
7	0.42	29393	0.0236	0.0230	5.75E-04	574.91	175.35
13	0.46	31699	0.0232	0.0246	5.38E-04	537.79	164.03
16	0.43	30027	0.0235	0.0235	5.64E-04	564.16	172.07
18	0.45	31042	0.0233	0.0242	5.48E-04	547.84	167.09
21	0.46	31793	0.0232	0.0247	5.36E-04	536.37	163.59
22	0.46	32173	0.0232	0.0249	5.31E-04	530.77	161.88
25	0.46	31983	0.0232	0.0248	5.34E-04	533.56	162.74
26	0.42	29034	0.0237	0.0228	5.81E-04	581.18	177.26
28	0.44	30486	0.0234	0.0238	5.57E-04	556.66	169.78
32	0.46	32269	0.0231	0.0250	5.29E-04	529.38	161.46
33	0.45	30949	0.0234	0.0241	5.49E-04	549.29	167.53
35	0.56	38539	0.0222	0.0293	4.52E-04	452.36	137.97
39	0.59	40824	0.0219	0.0308	4.30E-04	429.83	131.10
40	0.50	34613	0.0228	0.0266	4.98E-04	497.53	151.75
42	0.50	34414	0.0228	0.0265	5.00E-04	500.08	152.53
47	0.51	35418	0.0226	0.0271	4.88E-04	487.52	148.69
48	0.51	35114	0.0227	0.0269	4.91E-04	491.24	149.83
50	0.50	34813	0.0227	0.0267	4.95E-04	495.00	150.98
51	0.50	34913	0.0227	0.0268	4.94E-04	493.74	150.59
53	0.49	34314	0.0228	0.0264	5.01E-04	501.37	152.92
65	0.52	35926	0.0226	0.0275	4.81E-04	481.40	146.83
69	0.51	35215	0.0227	0.0270	4.90E-04	489.99	149.45
74	0.50	34414	0.0228	0.0265	5.00E-04	500.08	152.53
77	0.50	34713	0.0228	0.0267	4.96E-04	496.27	151.36
84	0.50	34613	0.0228	0.0266	4.98E-04	497.53	151.75
85	0.50	34613	0.0228	0.0266	4.98E-04	497.53	151.75
95	0.51	35519	0.0226	0.0272	4.86E-04	486.28	148.32
99	0.51	35316	0.0227	0.0271	4.89E-04	488.75	149.07
102	0.51	35114	0.0227	0.0269	4.91E-04	491.24	149.83
105	0.51	35215	0.0227	0.0270	4.90E-04	489.99	149.45
109	0.50	34713	0.0228	0.0267	4.96E-04	496.27	151.36
110	0.50	34513	0.0228	0.0265	4.99E-04	498.81	152.14
113	0.50	34613	0.0228	0.0266	4.98E-04	497.53	151.75
116	0.50	34414	0.0228	0.0265	5.00E-04	500.08	152.53
120	0.51	35316	0.0227	0.0271	4.89E-04	488.75	149.07

CÁLCULO DE LA SUBCAPA LAMINAR VISCOSA

Tubería 4" PVC

Día	v (m/s)	Re	f	V*	δ' (m)	δ' (μ m)	0,3058' (m)
4	0.50	45818	0.0214	0.0260	5.09E-04	509.14	155.29
7	0.47	42868	0.0217	0.0245	5.40E-04	540.15	164.74
13	0.48	43569	0.0216	0.0249	5.32E-04	532.42	162.39
16	0.46	42074	0.0218	0.0241	5.49E-04	549.17	167.50
18	0.46	42074	0.0218	0.0241	5.49E-04	549.17	167.50
21	0.47	42371	0.0217	0.0243	5.46E-04	545.76	166.46
22	0.45	40708	0.0219	0.0234	5.66E-04	565.50	172.48
25	0.45	41290	0.0219	0.0237	5.58E-04	558.42	170.32
26	0.46	41681	0.0218	0.0239	5.54E-04	553.77	168.90
28	0.46	41485	0.0218	0.0238	5.56E-04	556.09	169.61
32	0.45	40805	0.0219	0.0235	5.64E-04	564.31	172.11
33	0.46	41681	0.0218	0.0239	5.54E-04	553.77	168.90
35	0.50	45095	0.0214	0.0256	5.16E-04	516.39	157.50
39	0.49	44788	0.0215	0.0255	5.20E-04	519.54	158.46
40	0.50	45404	0.0214	0.0258	5.13E-04	513.26	156.55
42	0.50	45611	0.0214	0.0259	5.11E-04	511.20	155.92
47	0.50	45818	0.0214	0.0260	5.09E-04	509.14	155.29
48	0.49	44379	0.0215	0.0253	5.24E-04	523.78	159.75
50	0.50	45404	0.0214	0.0258	5.13E-04	513.26	156.55
51	0.50	45611	0.0214	0.0259	5.11E-04	511.20	155.92
53	0.51	46549	0.0213	0.0264	5.02E-04	502.04	153.12
65	0.51	46131	0.0213	0.0262	5.06E-04	506.08	154.35
69	0.50	45404	0.0214	0.0258	5.13E-04	513.26	156.55
74	0.50	45922	0.0213	0.0260	5.08E-04	508.12	154.98
77	0.50	45715	0.0214	0.0259	5.10E-04	510.17	155.60
84	0.50	45508	0.0214	0.0258	5.12E-04	512.23	156.23
85	0.51	46759	0.0213	0.0265	5.00E-04	500.04	152.51
95	0.51	46131	0.0213	0.0262	5.06E-04	506.08	154.35
99	0.51	46235	0.0213	0.0262	5.05E-04	505.07	154.05
102	0.50	45922	0.0213	0.0260	5.08E-04	508.12	154.98
105	0.51	46444	0.0213	0.0263	5.03E-04	503.05	153.43
109	0.50	45715	0.0214	0.0259	5.10E-04	510.17	155.60
110	0.51	46026	0.0213	0.0261	5.07E-04	507.10	154.66
113	0.50	45508	0.0214	0.0258	5.12E-04	512.23	156.23
116	0.50	45404	0.0214	0.0258	5.13E-04	513.26	156.55
120	0.50	45922	0.0213	0.0260	5.08E-04	508.12	154.98

CÁLCULO DE LA SUBCAPA LAMINAR VISCOSA

Tubería 4" Biaxial

Día	v (m/s)	Re	f	V*	δ' (m)	δ' (μ m)	0,3058' (m)
4	0.54	51167	0.0208	0.0278	4.77E-04	476.67	145.38
7	0.50	46907	0.0212	0.0257	5.15E-04	514.97	157.07
13	0.51	47845	0.0211	0.0262	5.06E-04	505.98	154.32
16	0.44	41320	0.0219	0.0230	5.76E-04	576.35	175.79
18	0.46	42970	0.0217	0.0238	5.57E-04	556.66	169.78
21	0.33	31417	0.0233	0.0180	7.35E-04	734.59	224.05
22	0.40	37864	0.0223	0.0213	6.23E-04	622.75	189.94
25	0.45	42188	0.0218	0.0234	5.66E-04	565.81	172.57
26	0.43	40557	0.0219	0.0226	5.86E-04	585.96	178.72
28	0.46	42872	0.0217	0.0237	5.58E-04	557.80	170.13
32	0.46	43068	0.0217	0.0238	5.56E-04	555.54	169.44
33	0.48	45063	0.0214	0.0248	5.34E-04	533.64	162.76
35	0.54	50948	0.0209	0.0277	4.78E-04	478.48	145.94
39	0.51	48161	0.0211	0.0263	5.03E-04	503.03	153.42
40	0.49	46184	0.0213	0.0253	5.22E-04	522.12	159.25
42	0.51	47636	0.0212	0.0261	5.08E-04	507.96	154.93
47	0.51	47845	0.0211	0.0262	5.06E-04	505.98	154.32
48	0.49	46390	0.0213	0.0255	5.20E-04	520.06	158.62
50	0.49	46287	0.0213	0.0254	5.21E-04	521.09	158.93
51	0.50	47114	0.0212	0.0258	5.13E-04	512.95	156.45
53	0.49	46287	0.0213	0.0254	5.21E-04	521.09	158.93
65	0.46	43562	0.0216	0.0241	5.50E-04	549.94	167.73
69	0.45	42091	0.0218	0.0233	5.67E-04	566.96	172.92
74	0.40	37231	0.0224	0.0209	6.32E-04	632.13	192.80
77	0.42	39242	0.0221	0.0219	6.03E-04	603.32	184.01
84	0.42	39709	0.0221	0.0222	5.97E-04	597.04	182.10
85	0.32	30215	0.0235	0.0174	7.60E-04	760.35	231.91
95	0.30	27897	0.0239	0.0162	8.16E-04	815.85	248.83