

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

Biopelículas en Alcantarillados: Efecto de Medios de Soporte sobre la Capacidad Hidráulica de Sistemas de Alcantarillado

**Tesis desarrollada por: María Carolina Pulido
(Postgrado en Ingeniería Civil)**

Enero de 2005

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	5
2	OBJETIVOS	6
2.1	Objetivos Generales.....	6
2.2	Objetivos Específicos	6
2.3	Alcance	6
3	ANTECEDENTES.....	7
4	MARCO TEÓRICO.....	8
4.1	Hidráulica de Alcantarillados.....	8
4.1.1	Ecuación de Manning.....	8
4.1.2	Propiedades geométricas de la sección transversal en tuberías circulares parcialmente llenas	9
4.1.3	Flujo Gradualmente Variado (FGV)	11
4.2	Aspectos Generales de Aguas Residuales	12
4.2.1	Transporte y producción de Aguas Residuales	12
4.2.2	Composición de Aguas Residuales	12
4.2.3	Ventajas del tratamiento de aguas residuales dentro del alcantarillado	13
4.3	Procesos dentro del alcantarillado.....	14
4.3.1	Características Generales de los microorganismos	14
4.3.1.1	Bacterias.....	14
4.3.1.2	Protozoos	15
4.3.1.3	Hongos.....	15
4.3.1.4	Algas.....	15
4.3.2	Transformaciones del agua residual dentro del alcantarillado.....	15
4.3.2.1	Procesos Aerobios	18
4.3.2.2	Procesos Anóxicos	18
4.3.2.3	Procesos Anaerobios	18
4.3.2.4	Ejemplos de transformaciones del agua residual dentro de las tuberías de alcantarillado.....	20
4.4	Biopelícula	24
4.4.1	Descripción general del desarrollo de la biopelícula.....	24
4.4.2	Etapas del desarrollo de la biopelícula	24
4.4.2.1	Acondicionamiento de la superficie	25
4.4.2.2	Adhesión de bacterias “pioneras”	26
4.4.2.3	Formación del Glicocalix.....	27
4.4.2.4	Crecimiento y colonizadores secundarios.....	28
4.4.2.5	Desprendimiento y nueva colonización.....	28
4.5	Estructuras de soporte.....	28
4.5.1	Factores que afectan la adhesión y el crecimiento de la biopelícula.....	30
4.5.1.1	Material de la superficie	30
4.5.1.2	Área superficial	30
4.5.1.3	Lisura de la superficie.....	30

4.5.2	Comparación del tamaño y la proporción de una bacteria individual con la rugosidad de la superficie, espesor de la biopelícula y diámetro del tubo	30
4.5.2.1	Acabado de la superficie y tamaño de la célula	30
4.5.2.2	Lisura del tubo de plástico	31
4.5.2.3	Tamaño típico de las células bacteriales de la biopelícula	31
4.5.2.4	Comparación del perfil de la superficie con el tamaño de las células bacteriales	31
4.5.3	Crecimiento de biopelícula en diferentes medios de soporte.....	32
4.6	Efecto hidráulico de la formación de biopelículas	33
4.7	Efecto hidráulico de los medios de soporte para formación de biopelículas.....	34
4.8	Parámetros de control de la calidad del agua residual.....	34
4.8.1	Demanda química de oxígeno (DQO).....	34
4.8.2	pH	35
5	METODOLOGÍA	36
5.1	Modelo Hidráulico	36
—	Modelación Matemática	36
5.1.1.1	Ecuación de Flujo Gradualmente Variable (FGV).....	36
5.1.1.2	Leyes de fricción	37
5.1.2	Modelo Físico.....	38
5.1.2.1	Tuberías utilizadas para las pruebas	38
5.1.2.2	Montaje para las pruebas	38
5.2	Descripción de las mediciones	43
5.2.1.1	Medición de caudales	44
5.2.1.2	Medición de la pendiente	45
5.2.1.3	Medición de la profundidad del flujo	46
5.2.1.4	Mediciones de la biopelícula.....	47
5.3	Procedimiento de cálculo del coeficiente de Manning.....	48
5.3.1	Método de Runge Kutta.....	50
5.3.2	Cálculo del Error Cuadrático Medio (ECM)	51
5.4	Preparación del Agua Residual Sintética.....	52
6	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	53
6.1	Variación del n de Manning con respecto a la pendiente	53
6.2	Variación del n de Manning con respecto al caudal.....	55
6.2.1	Resultados Tubería Agua Potable Sin Biopelícula	55
6.2.2	Resultados del mes de septiembre.....	57
6.2.3	Resultados del mes de octubre	59
6.2.4	Resultados para el mes de noviembre.....	64
6.3	Análisis del n de Manning con respecto al tiempo de recirculación.....	68
6.4	Variación del n de Manning con respecto a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$	73
6.5	Evolución de la biopelícula y su efecto sobre el n de Manning.....	75
6.6	Análisis de los parámetros de calidad del agua.....	82
6.7	Comparación del efecto de medios de soporte sobre la capacidad hidráulica.....	84
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86

8	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	ANEXO 1- TABLA DE DISTANCIAS ENTRE PIEZÓMETROS	I
	ANEXO 2 – DATOS PRUEBAS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS IV	
	ANEXO 3 – GRÁFICAS DE PERFILES EXPERIMENTALES Y PERFILES TEÓRICOS V	

1 INTRODUCCIÓN

En la medida en que aumenta la población de las ciudades, aumenta proporcionalmente la cantidad de aguas residuales que deben ser tratadas antes de ser vertidas a los afluentes naturales. Debido a que estos tratamientos de agua resultan enormemente costosos, día a día se busca encontrar soluciones que abaraten estos costos.

Se han hecho profundos estudios para determinar la necesidad de encontrar tratamientos de aguas residuales más económicos, estos han llevado a los investigadores a reconocer que el aprovechamiento de las biopelículas que se forman en las tuberías de los sistemas de alcantarillado, es en sí mismo una alternativa de pretratamiento del agua residual ya que los tiempos de retención hidráulicos que estos sistemas presentan debido a sus extensas longitudes, permiten que los procesos químicos, físicos y microbiológicos de descomposición ocurran dentro del sistema y de esta forma se evita el vertimiento de las aguas residuales bien sea a una planta de tratamiento o a un cuerpo de agua sin antes haber sido sometidas a un pretratamiento.

La instalación de un medio de soporte en la superficie interna de una tubería de alcantarillado es una forma de mejorar las ventajas de utilizar la biopelícula como un pretratamiento del agua residual, debido a que dicho medio facilita el crecimiento de la película biológica ofreciendo una mayor área superficial para su desarrollo. Los medios de soporte sin embargo, afectan la capacidad hidráulica de la tubería y del sistema de tuberías. Uno de los parámetros más afectados por la presencia de estas estructuras de soporte es la rugosidad.

En esta investigación, se estudiará la posibilidad de implementar un medio de soporte en tuberías de alcantarillado compatible con el material de las mismas y que pueda ser instalado desde la planta de producción. Se busca que dicho medio de soporte favorezca en gran medida el crecimiento de biopelícula en la superficie interna del tubo y que se cause el menor efecto posible sobre la capacidad hidráulica de la tubería.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Generales

Estudiar el efecto que puede causar un medio de soporte que promueve la formación de biopelícula en tubería de alcantarillado, sobre el comportamiento hidráulico de la misma, así como determinar la capacidad de fijación de biomasa por parte de dicho medio de soporte y los beneficios que traería sobre el pretratamiento del agua residual dentro del alcantarillado.

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar en forma experimental (mediante pruebas de laboratorio) el efecto que un medio de soporte “corrugado” para biopelículas genera sobre el n de Manning de una tubería de alcantarillado NOVALOC – PAVCO.
- Evaluar el efecto que sobre el n de Manning tiene el tiempo de circulación del agua residual sintética dentro de la tubería, así como el crecimiento de la biopelícula sobre el medio de soporte.
- Determinar el tipo de estructura de soporte, que ofrece las mejores características hidráulicas o las menores resistencias al flujo, comparando los resultados de tesis anteriores con los resultados de este trabajo de grado.

2.3 Alcance

Establecer la variación que se genera en el n de Manning debido a la formación de la biopelícula adherida a un medio de soporte corrugado, y por lo tanto analizar el efecto hidráulico causado por este medio de soporte sobre la tubería de alcantarillado. Las pruebas se realizarán tanto con agua limpia como con agua residual sintética y el periodo durante el cual se realizarán las pruebas estará limitado al tiempo en el cual se establezca el crecimiento de la biopelícula.

3 ANTECEDENTES

La Universidad de los Andes ha venido desarrollando con el apoyo de PAVCO una serie de investigaciones que pretenden analizar el efecto de la película biológica sobre la rugosidad de las tuberías de alcantarillado.

La primera consistió en un modelo físico realizado por Unger, 1995 con una tubería NOVAFORT de 6" en donde se realizaron 120 pruebas con 30 días de recirculación. La conclusión de esta investigación fue que el coeficiente de Manning disminuyó en un 9.05% en comparación con el valor original del coeficiente calculado con agua limpia.

En 1996, se construyó un modelo similar en la planta de bombeo de aguas residuales el Salitre, donde se compararon los resultados obtenidos en la Universidad con agua residual sintética y los obtenidos en la Planta El Salitre.

Las pruebas realizadas hasta el año 1998 en tuberías NOVAFORT desde 10" hasta 16" mostraron un aumento inicial en la rugosidad para los primeros días de recirculación, y después una disminución muy notoria.

En los años 2000 y 2001, las investigaciones pretendían realizar un estudio de los sistemas de alcantarillado como una alternativa de pretratamiento de las aguas residuales. En estas investigaciones se utilizó como medio de soporte de biopelículas filamentos de Nylon de 0.5mm en el interior de la tubería, los ensayos se realizaron para un diámetro de 12 pulgadas y las eficiencias de remoción logradas llegaron hasta el 40%.

En el segundo semestre de 2001, se analizó el efecto que generaba el medio de soporte de filamentos de Nylon de 0.5mm sobre la hidráulica de las tuberías de alcantarillado. La conclusión de esta investigación fue, que dichos filamentos causaron el aumento notable del n de Manning a un valor de 0.0152.

En el año 2003, se realizó una tesis de Maestría titulada "Efecto Hidráulico de estructuras de soporte de biopelícula en tuberías de alcantarillado", en la cual se realizaron pruebas con tuberías NOVALOC de 24" utilizando dos medios de soporte diferentes, el primero de ellos consistía en un geodren enrollado entre dos perfiles (ancho de 15 cm y grosor de 2 mm) y el segundo fue un geotextil (grosor de 3 mm) adherido totalmente a la superficie interior del tubo. Las conclusiones fueron que el medio de soporte que produjo menor efecto hidráulico fue el geotextil, el n de Manning calculado para este medio de soporte fue de 0.02 para condiciones de agua limpia y de 0.0192 para agua residual, mientras que el geodren generó valores de n de Manning de 0.023 para agua limpia y agua residual.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Hidráulica de Alcantarillados

La teoría que se explicará a continuación, será la base para comprender el procedimiento de cálculo del n de Manning como el procedimiento de calibración.

Como primera medida, se explicará la ecuación de Manning ya que es una herramienta hidráulica básica para la descripción del flujo de agua residual en una tubería de alcantarillado bajo flujo uniforme y estacionario:

4.1.1 Ecuación de Manning

El ingeniero irlandés Robert Manning presentó por primera vez la ecuación durante la lectura de un artículo el 4 de diciembre de 1889. La ecuación era compleja al principio, pero después se simplificó y fue modificada y expresada en unidades métricas.

El Ingeniero Manning se basó en el trabajo de Darcy y Bazin sobre canales experimentales reales realizado entre 1855 y 1860.

Posteriormente, en el año 1981 Flamant publicó la siguiente ecuación: $V = C_1 \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$, donde:

V : Velocidad

C_1 : Coeficiente que depende de la rugosidad

R : Radio Hidráulico

S : Pendiente

Esta ecuación fue llamada “Ecuación de Manning”, sin embargo, en una tesis realizada por Williams en 1970, se descubrió que existían otras diez investigaciones que sugirieron una ecuación de este tipo, lo que implicaba que el Ing. Manning no había sido el único en proponer dicha ecuación.

La primera sugerencia del exponente de 2/3 para el radio hidráulico fue realizada por Gauckler en 1867, pero nunca fue tomada en cuenta, debido a la existencia de una ecuación propuesta por Ganguillet y Kutter creada para el C de Chézy.

Flamant sugirió que el coeficiente C_1 debía expresarse como el recíproco del n de Kuttler en unidades simétricas, de forma que la ecuación de Manning que se conoce hoy en día es de la forma:

$$V = \frac{K_n}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

donde:

V : Velocidad

R : Radio Hidráulico

S : Pendiente

$K_n = 1.0$ para V en (m/s) y R en (m)

(Saldarriaga, 2004)

Años más tarde en 1918, el americano King, hidráulico de la época, llamó el n como “ n de Manning”.

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

El n de Manning es una medida de la rugosidad de las paredes de la tubería y se utiliza en condiciones de flujo uniforme, de forma que, si el n de Manning aumenta, la velocidad disminuye y la profundidad normal aumenta y si el n de Manning disminuye, la velocidad aumenta y la profundidad normal disminuye, es decir que hay mayor caudal, luego la capacidad hidráulica aumenta (Metcalf and Eddy, 1995).

Lo anterior indica que, podemos saber el efecto que genera un cierto medio de soporte para biopelículas sobre la capacidad hidráulica de la tubería, si analizamos la variación del n de Manning debido al crecimiento de la biopelícula sobre dicho medio de soporte.

Algunos de los factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning son:

- Rugosidad superficial, es decir el tamaño y forma de los granos del material que forman el perímetro mojado (granos finos generan n de Manning bajos y viceversa)
- Irregularidades de un canal en el perímetro mojado y en la sección transversal
- Nivel y caudal: A mayor nivel y caudal menor valor de n de Manning y por el contrario, si el agua tiene poca profundidad las irregularidades del fondo del canal son más notorias

En segundo lugar, es importante conocer las propiedades geométricas de la sección de una tubería circular parcialmente llena, como es el caso de la tubería de alcantarillado utilizada en este trabajo de grado, por esta razón a continuación se describen las mismas.

4.1.2 Propiedades geométricas de la sección transversal en tuberías circulares parcialmente llenas

El diseño de las tuberías de alcantarillado se realiza mediante la teoría de flujo parcialmente lleno. Las ecuaciones de este tipo de flujo se calculan mediante la geometría de la sección transversal que se muestra en la siguiente figura:

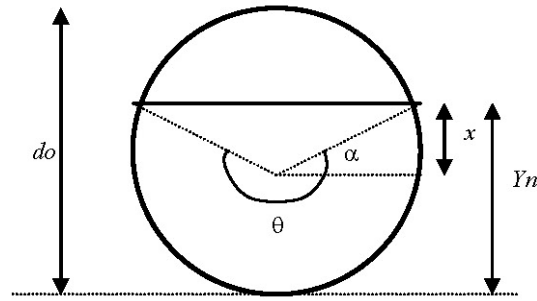


Figura 4.1. Sección transversal de una tubería parcialmente llena

El ángulo θ se puede calcular como:

$$\theta = \pi + 2\alpha \quad (4.1)$$

donde:

- θ está en radianes y α se puede obtener de: $\text{sen } \alpha = \frac{x}{d/2}$ (4.2)

de donde
$$\alpha = \arcsen \frac{x}{d/2} \quad (4.3)$$

- La distancia x según la figura se puede expresar como:

$$x = Y - \frac{d}{2} \quad (4.4)$$

- Si se reemplaza la ecuación 4.4 en la ecuación 4.3. se obtiene:

$$\alpha = \arcsen \frac{Y - d/2}{d/2} \quad (4.5)$$

- Si se reemplaza la ecuación 4.5 en la ecuación 4.1 el resultado es:

$$\theta = \pi + \arcsen \frac{Y - d/2}{d/2}$$

El área mojada se expresa entonces como: $A = \frac{1}{8}(\theta - \text{sen } \theta) \cdot d^2$

El perímetro mojado se calcula de la siguiente manera: $P = \frac{1}{2} \theta \cdot d$

Por lo tanto, el radio hidráulico se expresa como: $R = \frac{A}{P} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta} \right) \cdot d$

La profundidad hidráulica tiene un valor igual a: $D = \frac{(\theta - \text{sen } \theta)}{8 \cdot \cos \left(\arcsen \frac{Y_n - d/2}{d/2} \right)}$

El ancho de la superficie se expresa como: $T = d \cdot \cos \left(\arcsen \frac{Y_n - d/2}{d/2} \right)$

(Saldarriaga, 1995)

4.1.3 Flujo Gradualmente Variado (FGV)

El flujo gradualmente variado se define como el flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo de la longitud del canal, como es el caso del modelo físico que se implementó para la simulación del comportamiento hidráulico de una tubería de alcantarillado.

En este tipo de flujo las características hidráulicas de flujo permanecen constantes para un cierto intervalo de tiempo (flujo permanente).

La suposición básica que se tiene en cuenta para el FGV, consiste en que “la pérdida de altura en una sección es la misma que para un flujo uniforme que tiene la velocidad y el radio hidráulico de la sección, según esta suposición, la ecuación de flujo uniforme puede utilizarse para evaluar la pendiente de energía de un flujo gradualmente variado y el correspondiente coeficiente de rugosidad desarrollado en principio para flujo uniforme se aplica al flujo variado”, es decir que se puede utilizar el coeficiente de Manning. Además de la anterior suposición básica, existen otras suposiciones como que la pendiente del canal es baja, el canal tiene alineamiento y forma constantes, la distribución de la velocidad en la sección del canal es fija, etc.¹

¹ Hidráulica de Canales Abiertos. Ven Te Chow.

La modelación matemática de las pruebas de este trabajo de grado se realizaron con las ecuaciones del flujo gradualmente variado que se encuentran en el numeral 5.1.1.4. de este documento.

4.2 Aspectos Generales de Aguas Residuales

4.2.1 Transporte y producción de Aguas Residuales

La clasificación de los sistemas de alcantarillado según el tipo de agua que transportan, se describe a continuación:

Alcantarillado sanitario: Es un sistema de recolección diseñado para transportar exclusivamente aguas residuales domésticas e industriales.

Alcantarillado pluvial: Es un sistema de evacuación de la escorrentía superficial que se produce por la lluvia. El agua se capta al inicio mediante sumideros ubicados en las calles y después se transporta a una red de tuberías que va ampliando su área.

Alcantarillado combinado: Es el sistema que conduce simultáneamente las aguas residuales (domésticas e industriales) y las aguas lluvias.

El tamaño, la topografía y los recursos económicos son los factores principales que influyen en la elección del tipo de alcantarillado a construir. En zonas pequeñas la prioridad es el alcantarillado sanitario, mientras que el sistema pluvial puede esperar a que las necesidades se hagan notar.

El sistema de alcantarillado combinado es una solución benéfica desde el punto de vista económico, sin embargo, puede generar problemas de dilución de las aguas residuales que en el momento de su tratamiento en plantas podría causar inconvenientes en los procesos.

El diseño de los colectores de un sistema de alcantarillado se realiza para flujo uniforme por gravedad, basándose en la ecuación de Manning. El coeficiente de rugosidad de Manning depende directamente del material y los acabados de la tubería (asbesto – cemento, concreto reforzado, gres, etc). Sin embargo, debería tenerse en cuenta el efecto que la biopelícula genera sobre el coeficiente de Manning, ya que ésta influye sobre el comportamiento hidráulica del sistema.

(Orozco, 2003)

4.2.2 Composición de Aguas Residuales

El sistema de alcantarillado consiste en una serie de tuberías y obras complementarias, que reciben y evacuan las aguas residuales de la población y las aguas lluvias. Su existencia es vital para evitar los riesgos de salud en las personas que habitan una población.

Las aguas residuales pueden tener varios orígenes:

Aguas residuales domésticas: Son las que provienen de elementos domésticos como inodoros, cocinas, lavamanos, etc. Están compuestas por sólidos suspendidos (materia orgánica biodegradable), sólidos sedimentables (materia inorgánica), nutrientes (nitrógeno y fósforo) y organismos patógenos.

Aguas residuales industriales: Proviene de desechos de procesos industriales o manufactureros y debido a su naturaleza, pueden contener a diferencia de las aguas residuales domésticas, elementos tóxicos como mercurio, cobre, níquel, plomo y otros que deberán ser removidos antes de ser vertidos al sistema de alcantarillado.

Aguas lluvias: Como su nombre lo indica, provienen de la precipitación pluvial y puede contener una gran cantidad de sólidos suspendidos a causa de su efecto de lavado sobre tejados, calles y suelos, también pueden contener metales pesados debido a la alta contaminación atmosférica de la zona.

(Orozco, 2003)

4.2.3 Ventajas del tratamiento de aguas residuales dentro del alcantarillado

Hoy en día la idea del tratamiento de las aguas residuales dentro de las tuberías es una excelente posibilidad de mejorar la calidad del agua residual de forma previa al tratamiento realizado en la planta de tratamiento.

Los alcantarillados pueden ser llamados digestores de materia orgánica y las biopelículas que se forman dentro pueden lograr actividades una o dos veces mayores que las que realizan los microorganismos de plantas de tratamiento de lodos activados (*Chen y Leung 2000*).

El concepto del tratamiento dentro de la tubería no es nuevo y actualmente se está utilizando como un pretratamiento o un proceso de tratamiento a pequeña escala (*Warith et al. 1998*).

La simplificación de los diseños de las plantas de tratamiento de aguas residuales puede ser uno de los beneficios del tratamiento en línea. Otro de los beneficios es que el tratamiento aerobio dentro de la tubería podría utilizarse para remover la DBO soluble y las plantas de tratamiento de aguas residuales se utilizarían entonces para remover los contaminantes particulados mediante técnicas de separación de partículas, esto reduciría el tamaño de las plantas considerablemente y tendría mucha aplicación para zonas en donde existe poca disponibilidad de tierra para construcción de estas plantas.

El tratamiento en línea puede permitir la descentralización del tratamiento de las aguas residuales y esta a su vez puede reducir el tamaño y la longitud de las tuberías requeridas

antes del tratamiento y reducir el volumen de aguas residuales enviadas a tratamientos posteriores así como el costo de la infraestructura.

4.3 Procesos dentro del alcantarillado

4.3.1 Características Generales de los microorganismos

Los microorganismos que hacen parte de una biopelícula son bacterias, protozoos, hongos y algas. (Fuchs S. *et al.*, 1996). Estos microorganismos pueden ser *Procariotas* si su material genético no tiene protección, es decir, si no tienen estructuras subcelulares o *Eucariotas* si tienen núcleo verdadero, estructuras subcelulares y su material genético se encuentra protegido por una membrana.

A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos:

4.3.1.1 Bacterias

Las bacterias pueden ser autótrofas o heterótrofas, las autótrofas obtienen su energía de la luz solar, el CO₂ es su fuente de carbono orgánico. Las heterótrofas obtienen su energía a través de la oxidación de la materia orgánica, es decir que requieren compuestos sintetizados por organismos autótrofos.

Son organismos procariotas unicelulares. Constan de una membrana celular que está protegida por una pared celular. Las bacterias son en un 75 a 80% agua y el otro 15 a 20% está compuesto de material seco, que a su vez puede ser orgánico (en un 80 a 90%) o inorgánico (10 a 20%). En lo que respecta a los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, las bacterias son uno de los principales microorganismos. Se pueden clasificar según su forma en cocos, bacilos, coco – bacilos y filamentosas. Los cocos tienen un diámetro entre 1 y 3 micras. Los bacilos tienen tamaños variables, un ancho aproximado de 0,5 a 2 micras y una longitud entre 1 y 10 micras. Las dimensiones aproximadas de los coco – bacilos varían entre 0.6 a 10 micras de ancho y 2 a 6 micras de longitud. Las filamentosas son las más largas, ya que alcanzan longitudes de hasta 100 micras.

Los organismos patógenos se presentan en las aguas residuales y contaminadas en cantidades muy pequeñas, por lo que resulta difícil su identificación. Con el propósito de cuantificarlos, se utiliza el organismo coliforme como indicador ya que su presencia es más fácil de detectar. La bacteria más común de este tipo que se encuentra en heces humanas es *Escherichia Coli*, sus dimensiones aproximadas son 0.5 micras de ancho y 2 micras de longitud.

4.3.1.2 Protozoos

Son microorganismos unicelulares, eucariotas. La mayoría de los protozoos son organismos aerobios. Su estructura está formada por una sola célula abierta. Los protozoos más importantes para la ingeniería sanitaria son: *Amebas* que son parásitos vertebrados, *Flagelados* los cuales se mueven a través del flagelo (látigo) y pueden ser patógenos y *Ciliados* que pueden ser fijos o libres. Los protozoos se alimentan de bacterias y otros microorganismos. Son muy importantes en el funcionamiento de tratamientos biológicos y en la purificación de cuerpos de agua.

4.3.1.3 Hongos

Son organismos eucariotas aerobios y multicelulares. Su tamaño es superior al de los demás microorganismos. La mayoría de ellos se alimenta de materia orgánica muerta. Los hongos así como las bacterias son los principales responsables de la descomposición del carbono presente en la biosfera, sin su participación en estos procesos de degradación, se vería interrumpido el ciclo del carbono. Otra de las características importantes de los hongos es que pueden crecer en zonas de baja humedad y pH bajos.

4.3.1.4 Algas

Son organismos eucariotas. Se encuentran generalmente en aguas superficiales como lagos, lagunas, ríos y océanos. Presentan una gran diversidad morfológica. Cuando cuentan con los nutrientes necesarios pueden generar crecimiento excesivo, lo cual se convierte en un problema llamado eutroficación.

(Orozco, 2003), (Metcalf & Eddy, 1995)

4.3.2 Transformaciones del agua residual dentro del alcantarillado

Los procesos que ocurren dentro del alcantarillado son de gran importancia, aún durante tiempos de transporte cortos (Henze, 1992) y pueden contribuir al pretratamiento de los sistemas de alcantarillado (Kaijun et al., 1995). Estos procesos químicos y microbiológicos ocurren en las siguientes fases: la fase de contacto con el líquido, la biopelícula, los sedimentos del tubo, la atmósfera del tubo y las paredes del tubo. Dichas fases se pueden observar en la Figura 4.2.

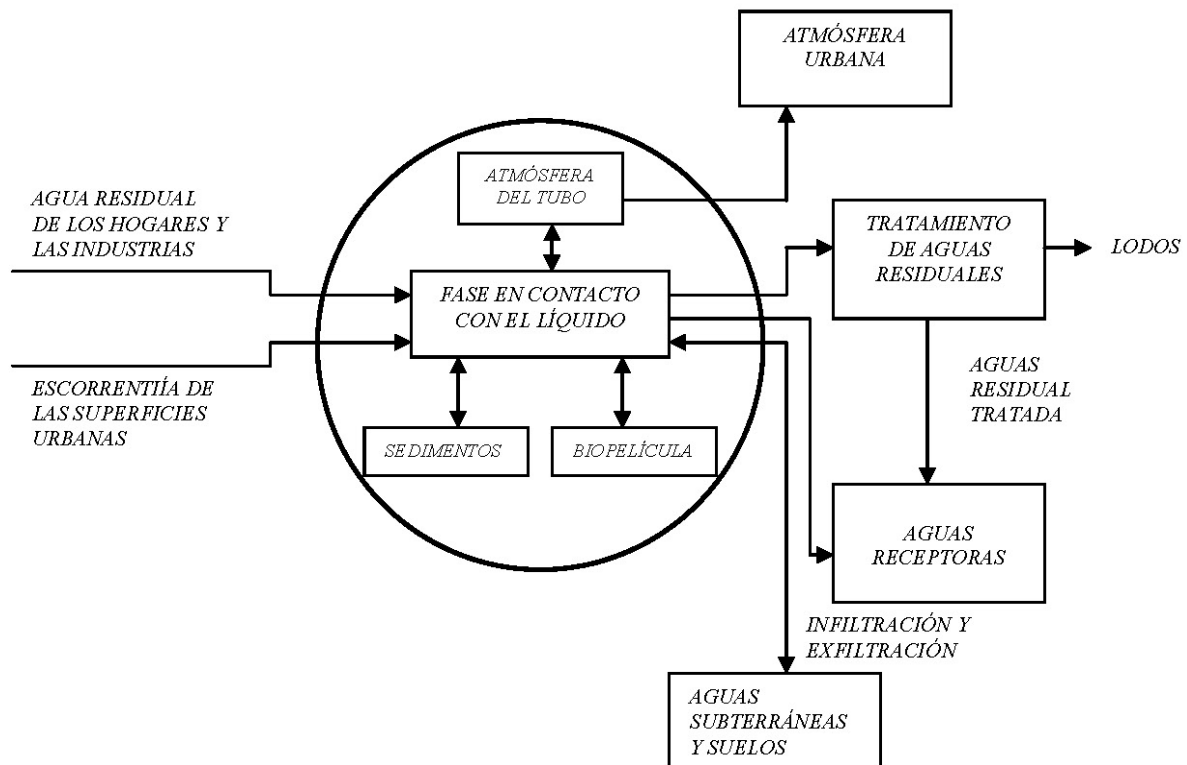


Figura 4.2. - Flujo de agua residual y subsistemas para los procesos dentro de la red de alcantarillado²

Debido a las transformaciones que suceden dentro de la tubería de alcantarillado se recomienda la integración de la tubería de alcantarillado como un bioreactor para la remoción de materia orgánica (Hvitved-Jacobsen *et al.*, 1995; Ristenpart, 1995).

La figura 4.3. muestra que las tuberías de alcantarillado, las plantas de tratamiento y los sistemas de cuerpos de agua receptoras no deberían ser vistos como unidades separadas de tratamiento sino como un sistema integrado.

² "The sewer as a bioreactor – a dry weather approach". T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen and J.S. Matos. Water Science and Technology. 2002.

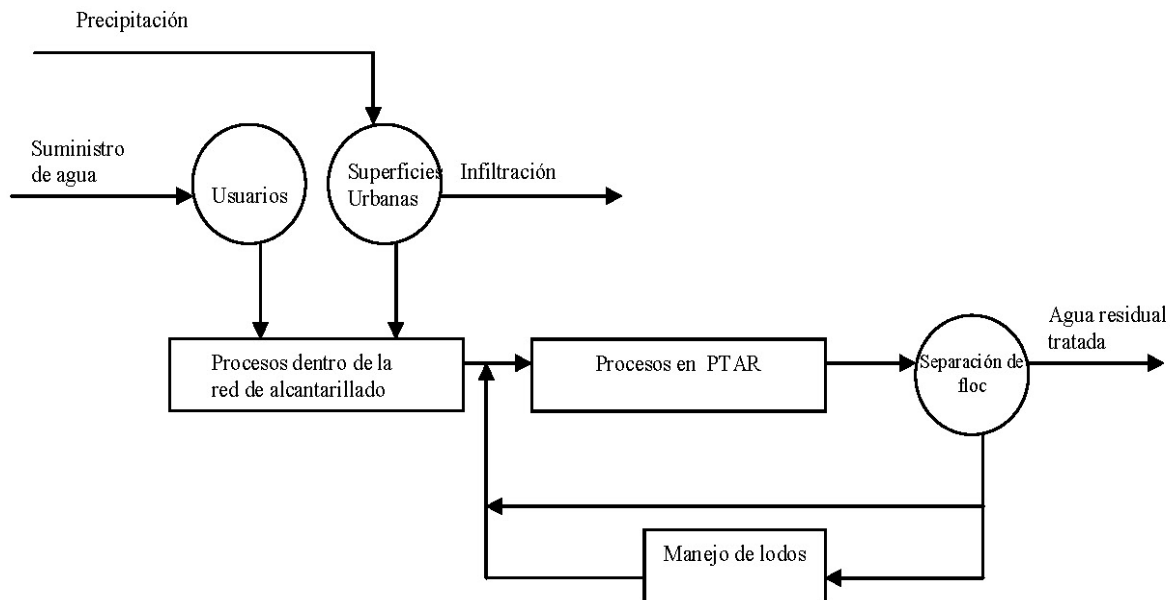


Figura 4.3.- Sistema integrado de procesos del alcantarillado donde la tubería actúa como un reactor para procesos químicos y biológicos³

Los microorganismos heterótrofos predominan en las tuberías del alcantarillado y son los que degradan y transforman los componentes de las aguas residuales. Las transformaciones de materia orgánica dentro de las tuberías de alcantarillado ocurren bajo diferentes condiciones según el aceptor de electrones disponible, por lo cual pueden ser: aeróbicas, anóxicas o anaeróbicas. Los aceptores de electrones se utilizan en una secuencia fija: oxígeno para respiración aerobia, nitrato para desnitrificación, compuestos orgánicos para fermentación, sulfato para reducción de sulfato y dióxido de carbono para metanogénesis. (Bentzen *et al.*, 1995).

Las características de diseño y el modo de operación de una red de alcantarillado determina las condiciones redox (aerobias, anóxicas o anaerobias) que prevalecen. La tabla 4.1 muestra las características del sistema de alcantarillado asociadas con las condiciones del proceso. Las condiciones aerobias y anaerobias prevalecen, mientras que las condiciones anóxicas solo ocurren si hay presencia de nitrato en el agua residual.

³ "The sewer as a bioreactor – a dry weather approach". T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen and J.S. Matos. Water Science and Technology. 2002.

Tabla 4.1 – Aceptores de electrones y condiciones correspondientes para los procesos microbiológicos redox en las redes de alcantarillado.⁴

Condiciones del proceso	Aceptor de electrones	Características típicas del sistema de alcantarillado
Aeróbico	+ Oxígeno	Alcantarillado por gravedad parcialmente lleno
Anóxico	- Oxígeno + Nitrato	Alcantarillado presurizado con adición de nitrato
Anaeróbico	- Oxígeno - Nitrato + Sulfato + (CO ₂)	Alcantarillado presurizado Alcantarillado por gravedad completamente lleno Alcantarillado por gravedad con baja pendiente

4.3.2.1 Procesos Aerobios

La transformación aerobia trae como resultado la remoción de la materia orgánica y los procesos que se llevan a cabo en esta transformación pueden desarrollarse aún más con un tratamiento mecánico posterior. Las tasas de transformación aeróbica varían entre 2 – 20 gO₂/ m³.h y dependen en gran parte de la calidad del agua residual.

Bajo condiciones aerobias, el consumo de oxígeno y los procesos de intercambio dentro de la fase líquida, la biopelícula y el sedimento juegan un papel importante dentro de los cambios de la composición del agua residual. Estos procesos hacen que las concentraciones de DQO del agua residual disminuyan.

Las bacterias aerobias son las responsables de estos procesos y son las primeras en formarse en la biopelícula sobre la superficie interna de la tubería.

4.3.2.2 Procesos Anóxicos

Debido a que el contenido de nitrato en las aguas residuales es bajo, en el alcantarillado no existen normalmente las condiciones para el proceso de denitrificación.

4.3.2.3 Procesos Anaerobios

Como se muestra en la tabla 1, cuando no hay presencia de nitratos ni de oxígeno disuelto los procesos son anaerobios y se genera sulfuro de hidrógeno, así como durante la

⁴ The sewer as a bioreactor – a dry weather approach”. T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen and J.S. Matos. Water Science and Technology. 2002

fermentación se generan malos olores. Los subprocesos que hacen parte de los procesos anaerobios son:

Hidrólisis anaerobia: Transforma los biopolímeros y compuestos orgánicos complejos en sustratos orgánicos simples.

Fermentación: Los sustratos orgánicos simples son descompuestos y transformados en productos de la fermentación mediante los procesos metabólicos básicos.

Metanogénesis: Los productos de la fermentación son transformados en metano.

Reducción de sulfato. Proceso en el que se produce sulfuro de hidrógeno. La formación de sulfuro produce problemas de salud, corrosión de las tuberías y generación de olores.

Las bacterias anaerobias son las responsables de este tipo de procesos y son las últimas en formarse y se localizan justo sobre el medio de soporte de la tubería.

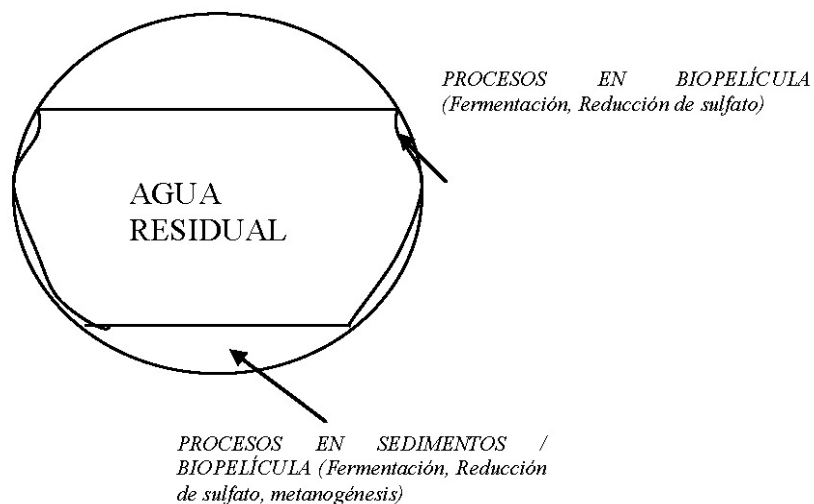


Figura 4.4 – Ocurrencia de los procesos microbiológicos en un alcantarillado por gravedad bajo condiciones anaerobias.⁵

La composición del agua residual bajo condiciones anaerobias cambia de una forma más lenta. La producción de sulfuro a partir del sulfato en el agua residual y el consumo de orgánicos biodegradables ocurre predominantemente en las biopegículas en la pared de las tuberías.

Las siguientes características del alcantarillado influyen las condiciones de los procesos:

⁵ "The sewer as a bioreactor – a dry weather approach". T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen and J.S. Matos. Water Science and Technology. 2002.

- La velocidad de las aguas residuales y el esfuerzo cortante afecta la formación de biopelícula
- La relación profundidad / diámetro y la relativa cantidad de biopelícula
- La ventilación del sistema de alcantarillado afecta la liberación de sustancias olorosas y tóxicas a la atmósfera urbana
- La turbulencia y el flujo de aguas residuales afecta la reaireación y liberación de sustancias olorosas dentro de la atmósfera del alcantarillado

4.3.2.4 Ejemplos de transformaciones del agua residual dentro de las tuberías de alcantarillado

El primer ejemplo es un estudio realizado sobre la utilización del oxígeno en una tubería de alcantarillado sanitario (G.H. Chen, D.H.W.Leung, 2000) en el cual se concluyó que “A través de una tubería de alcantarillado sanitario por gravedad de 1.5 Km de longitud y durante 18 minutos, el carbono orgánico disuelto en el agua residual disminuye un 14%. También se estimó que la fase líquida de agua residual contribuye en un 40% de la remoción de carbono orgánico disuelto, mientras el sedimento de agua residual contribuye en un 60% de dicha remoción”⁶.

Un segundo ejemplo es el estudio sobre la capacidad de auto-purificación de las tuberías de alcantarillado por inmovilización de microorganismos en la superficie de un tubo. Los análisis de esta investigación realizada en el Instituto de Tecnología de Tokio en el año 2002, se realizaron en un canal rectangular (para simular el desarrollo de una tubería de alcantarillado) de 1m de largo, 2 cm de ancho y 2.5 cm de profundidad sobre el cual se instalaron bloques de cerámica de 0.02 m² de área superficial y 0.5 cm de espesor para el crecimiento e inmovilización de microorganismos. Se utilizó agua residual sintética y se llevó a cabo la remoción de carbono y nitrógeno orgánico con y sin reaireación.

Debido a que la biopelícula formada juega un papel muy importante en la remoción de carbono y nitrógeno, se estudió su estructura mediante microelectrodos de pH y de oxígeno disuelto.

En la siguiente figura se muestra el esquema del canal rectangular descrito anteriormente y el recipiente de prueba donde después de haber sido extraído un bloque de 0.02m² de recubrimiento de cerámica porosa, se llevaron a cabo las mediciones de OD y pH bajo diferentes medios.

⁶ “Augmentation of self – purification capacity of sewer pipe, by immobilizing microbes on the pipe surface”.
Biochemical Engineering Journal. October 2002.

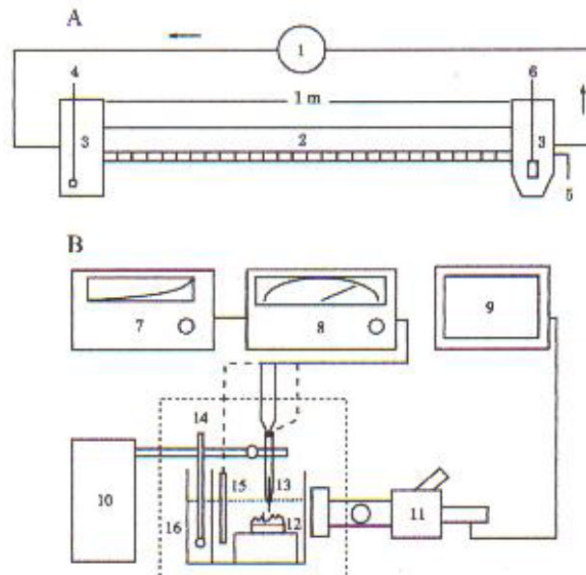


Figura 4.5. -(A) Diagrama esquemático del canal rectangular, (B) Diagrama esquemático de la medición con microelectrodo del pH y el OD. (1)Bomba peristáltica, (2) Reactor rectangular, (3) Tanque buffer, (4) Inyector de aire, (5) Puerto efluente, (6) Sensor de OD, (7) Grabadora, (8) Micro amperímetro de voltaje, (9) Monitor de TV, (10) Micromanipulador, (11) Microscopio, (12) Bloque de muestra con biopelícula, (13) Microelectrodo de OD y pH, (14) Inyector de aire, (15) Electrodo de referencia para pH, (16) Recipiente de prueba, (- - -)Medición del pH con microelectrodo, (---) Medición del OD con microelectrodo

Los medios utilizados para las mediciones de OD y pH dentro del recipiente de prueba fueron:

- Medio para la prueba de nitrificación (conversión de amoníaco a nitrito y luego a nitrato) que contenía 37.2 mg/L de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, equivalente a 10 mg/L de amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$) como una sola fuente de nitrógeno y otros componentes usados para el agua residual sintética.
- Medio para la prueba de denitrificación (conversión de nitrato a nitrógeno molecular) que contenía 15 mg/L de NaNO_2 equivalente a 10 mg/L de nitrato ($\text{NO}_2\text{-N}$) como una sola fuente de nitrógeno y otros componentes usados para el agua residual sintética
- Medio circulante en el reactor por 1 día (no se detectaron fuentes de nitrógeno no carbono en este medio).

La nitrificación se evaluó basada en la conversión de $\text{NH}_4\text{-N}$ a $\text{NO}_2\text{-N}$ o $\text{NO}_3\text{-N}$ en el medio de la prueba de nitrificación. La denitrificación se evaluó en el medio usado para la prueba de nitrificación. También se evaluaron los efectos de la aireación sobre la nitrificación y denitrificación.

Los resultados mostraron que la biopelícula está compuesta por cuatro capas:

- Capa en contacto con el agua
- Capa heterogénea no – densa: biopelícula rugosa y aerobia, compuesta principalmente de microorganismos filamentosos, donde las concentraciones de OD y COT disminuían debido a la oxidación biológica.
- Capa densa: biopelícula densa y anaerobia donde sucede la denitrificación (conversión de NO_2 o NO_3 en gas N_2).
- Capa sobre el recubrimiento de cerámica porosa

Las concentraciones de OD encontradas se comportaron de la siguiente forma en cada medio:

Cuando se suministra medio fresco de nitrificación o denitrificación, ocurre una rápida disminución de la concentración de OD cerca de la superficie de la biopelícula, mientras en la mitad de la biopelícula dicha concentración llegó a ser cero, región donde las bacterias aerobias están activas en la asimilación de las fuentes de carbono.

Cuando se utilizó el medio circulante obtenido del canal se observó una disminución gradual de la concentración de OD por encima de la mitad de la biopelícula, mientras que se presentó una rápida disminución de la misma en la capa densa – anaerobia.

Las conclusiones de esta investigación demostraron que:

- La combinación de aireación y desarrollo de biopelícula aumentaron simultáneamente la remoción de carbono y nitrógeno orgánico de la siguiente forma:
 - En la prueba de nitrificación, cuando no se suministró oxígeno se removió el 38% de amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$) en 180 minutos y se removió aproximadamente el 54% de carbono orgánico después de 60 minutos, mientras que cuando se suministró aireación se removió el 56% de amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$) en 180 minutos y el carbono orgánico después de 60 minutos fue removido en un 79% aproximadamente.
 - En la prueba de denitrificación, sin aireación se removió un 66% de nitrito (NO_2) después de 180 minutos y de carbono orgánico un 30% aproximadamente después de 60 minutos, mientras que cuando se suministró oxígeno la reducción de nitrito fue de 83% luego de 180 minutos y de carbono orgánico 66% al pasar 60 minutos.
- Las pruebas de nitrificación / denitrificación y el análisis de la estructura de la biopelícula mediante los microelectrodos de pH y OD revelaron que la biopelícula, que consta de región aeróbica y anaeróbica y el incremento del suministro de oxígeno promueven la conversión y remoción del carbono y nitrógeno orgánico en el agua residual sintética.

- Durante el periodo de aclimatación de 8 semanas se formó una biopelícula de 2.5 a 5 mm de espesor en la base cerámica.
- La inmovilización de microorganismos permite la formación de dos zonas importantes: la zona aerobia en la cual se oxidan sustancias de nitrógeno y se remueve la DBO y DQO, y la zona anaerobia en la que se lleva a cabo la denitrificación.
- El estudio sugiere también que la inmovilización de microorganismos dentro de la tubería de alcantarillado puede ser efectiva para la remoción simultánea de carbono y nitrógeno orgánico en la línea de alcantarillado.

El último ejemplo de tratamiento de las aguas residuales que se puede lograr dentro del alcantarillado lo muestran los resultados obtenidos en la modelación de los procesos de degradación dentro del alcantarillado de la Costa de Estoril. Dicho alcantarillado cuya longitud es de 25 km, cuenta con 19 estaciones de bombeo y una planta de tratamiento de aguas residuales como se muestra en siguiente figura:

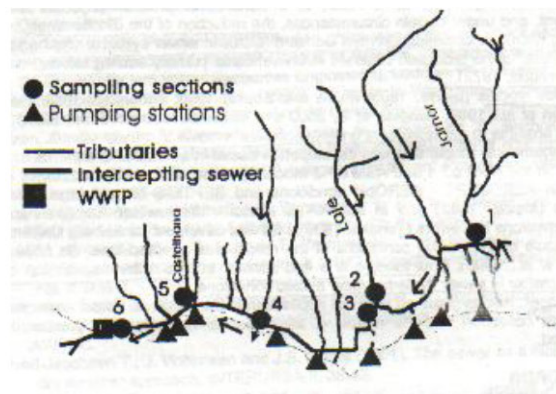


Figura 4.6. – Esquema de la tubería interceptada y principales tributarios del sistema de alcantarillado de la Costa de Estoril⁷

La modelación realizada arrojó los siguientes resultados:

- Reducción promedio *observada* de DQO total y DQO disuelta de 13 y 21% respectivamente.
- Reducción promedio *modelada* de DQO total y DQO disuelta de 4 y 25% respectivamente.
- La diferencia entre los resultados observados y modelados radica en las entradas de oxígeno al sistema de alcantarillado causadas por turbulencias en las entradas de los tributarios al alcantarillado interceptado, lo que indica que la reaireación es un factor clave en las transformaciones bioquímicas.

⁷ “Modelling in-sewer pollutant degradation processes in the Costa do Estoril sewer system”. S Mourato, M Almeida, J Matos y T-Hvitved-Jacobsen. Sewer Processes and Networks. Paris, France 2002

- Prevalecen las condiciones anaeróbicas a lo largo de gran parte de la tubería interceptada en la época de verano.
- La reducción significativa de la DQO aguas arriba de la PTAR, indica según la Directiva Europea No. 91/271/CE, que solo se requiere un tratamiento primario para el efluente en época diferentes al verano. Durante el verano se propuso un tratamiento fisico-químico avanzado para la PTAR.

4.4 Biopelícula

La biopelícula se forma cuando la bacteria se adhiere a las superficies en ambientes acuosos y comienza a excretar una sustancia pegajosa y viscosa que se puede adherir a toda clase de materiales como: metales, plásticos, suelo y partículas. Una biopelícula se puede formar por una simple especie de bacterias, pero es más común que conste de muchas especies de bacterias, como hongos, algas, protozoos, desechos y productos de corrosión.

En sistemas de tuberías de alcantarillado, la morfología de la célula de filamento dominante es redonda, de 1.2 a 2.0 μm de diámetro y 2 a 5 μm de longitud. El filamento dominante más identificado ha sido probablemente *Sphaerotilus natans*, una bacteria también llamada “hongo de agua residual” (Cao Y. S. y Alaerts G. J., 1995).

4.4.1 Descripción general del desarrollo de la biopelícula

Primero que todo, los microorganismos se multiplican y colonizan sobre el soporte (la cuenca de un río, las paredes de una tubería). Cuando la capa de bacterias ya está establecida, excretan una matriz de polímeros mucilaginosos extracelulares, los exopolisacáridos. (Scott J. A *et al.*, 1995). Los exopolisacáridos están compuestos por polisacáridos, proteínas, ácidos uránicos, ADN y fragmentos celulares (Späth R. *et al.*, 1998). El nombre que reciben las células que se encuentran dentro de la matriz de exopolisacáridos (EPS), es “biopelícula microbiana” (Decho A.W., 2000 : Fuchs S. *et al.*, 1996). La matriz de EPS forma un microambiente estable y protector y puede proporcionar una gran variedad de funciones específicas a las células. Los EPSs poseen propiedades físicas muy cohesivas. Por lo tanto, los sedimentos o partículas que están embebidos en la matriz se establecen en contra de la resuspensión. Adicionalmente, los EPSs altamente hidratados pueden prevenir la desecación celular debido a periodos de exposición prolongados (Decho A.W., 2000 : Scott J.A. *et al.*, 1995).

4.4.2 Etapas del desarrollo de la biopelícula

La biopelícula se empieza a formar desde el mismo instante en que un tubo limpio se llena con agua, este desarrollo ocurre en diferentes etapas. Las tres etapas principales del

desarrollo de la biopelícula son adherencia, colonización y crecimiento, como se muestra en la siguiente figura:

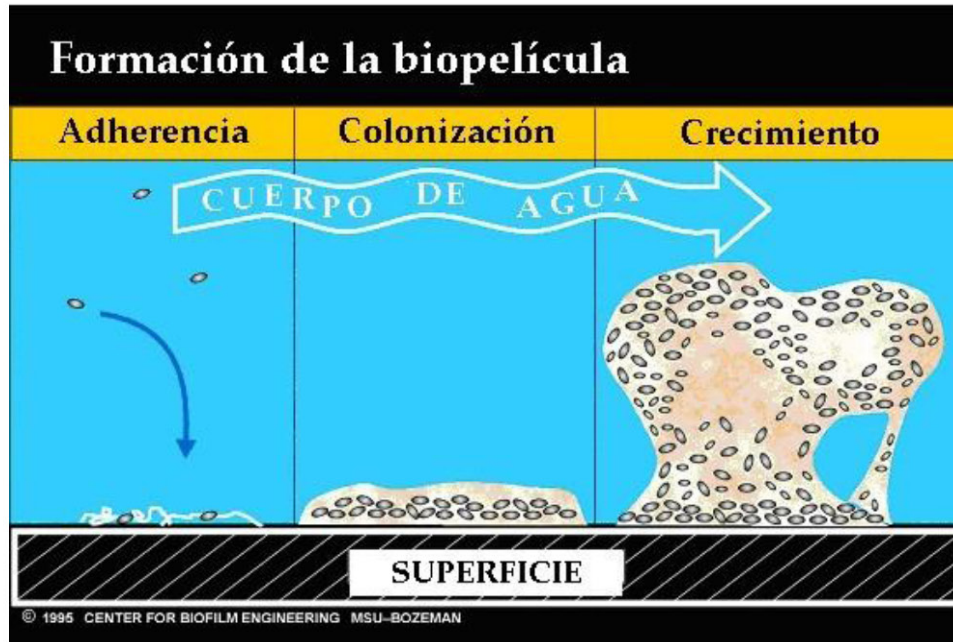


Figura 4.7. Formación de biopelícula - The Center of biofilm- 1995

A continuación se encuentra una descripción más específica de las etapas de desarrollo de una biopelícula:

4.4.2.1 Acondicionamiento de la superficie

En esta primera fase del desarrollo de la biopelícula, las sustancias que se asocian a la superficie son trazadores orgánicos y no bacterias. Esta asociación consiste en la adsorción de los compuestos orgánicos existentes sobre el material que va a ser colonizado (Trulear & Characklis, 1982). Las sustancias orgánicas forman una “capa acondicionadora” que neutraliza la carga excesiva y la energía libre presentes en la superficie y dicha carga y energía impiden la adherencia de las células bacterianas a las paredes, ya que generan un campo eléctrico al que las células no pueden acercarse lo suficiente para entrar en contacto con la superficie. Además las moléculas de carbono absorbidas sirven como fuente de nutrientes para las bacterias. Cuando esta etapa termina, comienza el desarrollo de la biopelícula.

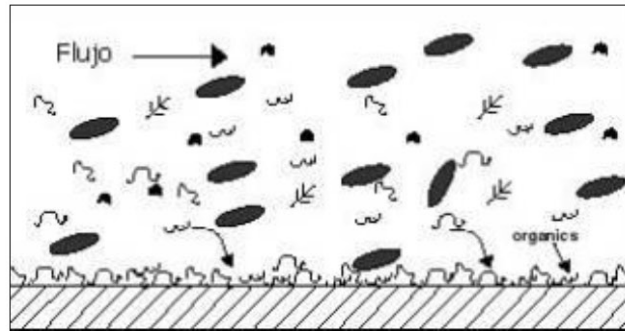


Figura 4.8. La adsorción de moléculas orgánicas sobre una superficie limpia forma una película de acondicionamiento. (Characklis 1990)

4.4.2.2 Adhesión de bacterias "pioneras"

La segunda fase en el desarrollo de la biopelícula es la adherencia. Inicialmente una colonización de bacterias se posicionan en irregularidades del medio de soporte, tales como uniones, en donde la rugosidad es favorable para la adherencia.

En un tubo algunas de las bacterias que flotan libremente se aproximan a la pared del tubo y comienzan a hacer parte de la capa límite (zona de quietud donde la velocidad se hace cero). Algunas de estas células son absorbidas a la superficie por un tiempo y luego son liberadas, proceso llamado adsorción reversible. Esta adhesión inicial está basada en la atracción electrostática y las fuerzas físicas. Algunas células absorbidas reversiblemente forman estructuras que pueden adherir la célula permanentemente a la superficie. Estas células se convierten en células absorbidas de forma irreversible.

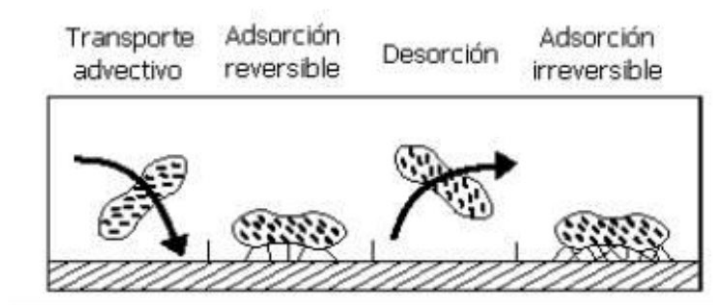


Figura 4.9. Transporte de células bacteriales a la superficie acondicionada, adsorción, desorción y adsorción irreversible

4.4.2.3 Formación del Glicocalix

Las bacterias de una biopelícula excretan unas sustancias poliméricas extracelulares o polímeros pegajosos, llamados también glicocalix, que sujetan la biopelícula a la pared del tubo. Los polímeros atrapan nutrientes escasos y protegen a las bacterias de los biocidas. De acuerdo con Mittelman (1985), "La adhesión es realizada por polímeros extracelulares que se extienden fuera de la pared celular bacteriana (como la estructura de una telaraña). El glicocalix también es llamado matriz."

A medida que los nutrientes se acumulan, las células pioneras se reproducen. Las células hija producen su propio glicocalix. Muy pronto se establece una próspera colonia de bacterias. (Mayette 1992).

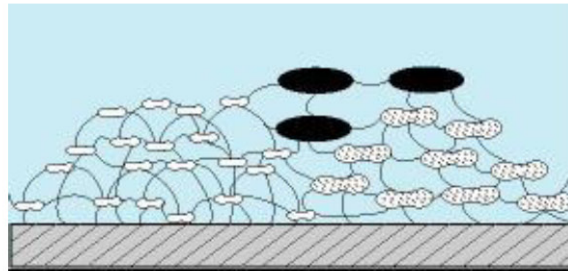


Figure 4.10. La biopelícula ya constituida por microorganismos y una "telaraña" o matriz de polímeros extracelulares

En una biopelícula madura, la matriz de glicocalix ocupa del 75 al 95% mientras que la capa bacteriana ocupa entre un 5 a 25%.

En un estudio realizado recientemente (2000) sobre el sistema de recolección de aguas residuales St. Gilles de la ciudad de París, el objetivo era describir la arquitectura de la biopelícula de alcantarillado utilizando un microscopio de transmisión electrónica.

Una matriz orgánica (glicocalix) se formó entre la capa celular y la pared de la tubería. Esta matriz tiene una estructura fibrosa y está compuesta principalmente por fibra vegetal y materia orgánica. Su espesor alcanzó varios milímetros. Una película uniforme de bacterias cubrió totalmente la superficie de la matriz orgánica, esta película mostró un espesor delgado de aproximadamente 5 a 10 μm y parecía estar compuesta de una monocapa de bacterias. En esta capa celular un gran número de bacterias estaban unidas en forma compacta por una capa de polisacárido.

La matriz orgánica, la capa celular y los materiales abióticos estaban fuertemente unidos. Los experimentos realizados sobre la biopelícula recolectada de la tubería de St. Gilles mostraron que la gran cohesión que existe entre la capa celular y la matriz orgánica se debe a los exopolisacáridos que producen las bacterias y que actúan específicamente como un "pegante". Estas propiedades cohesivas permitieron que el complejo estuviera lo suficientemente adherido a las paredes de la tubería y se evitara cualquier posibilidad de

erosión causada por el flujo de agua residual, de forma que la arquitectura de la biopelícula adherida a la tubería de alcantarillado no fue muy diferente a la biopelícula microbiana encontrada en otros ecosistemas. Sin embargo, la biopelícula en el caso de los sistemas de alcantarillado no estaba directamente adherida a la pared de la tubería, que es inorgánica, sino a una gruesa matriz orgánica.⁸

4.4.2.4 Crecimiento y colonizadores secundarios

El glicocalix atrapa otro tipo de células microbianas mediante resistencia física e interacción electrostática. Estos microorganismos son llamados colonizadores secundarios y metabolizan los desperdicios de los colonizadores primarios, así como producen los suyos propios.

Esta fase de crecimiento se divide en dos pasos, el primero es el de crecimiento logarítmico de la película bacteriana, y el segundo consiste en una tasa constante de acumulación de biopelícula, que continúa hasta su desprendimiento parcial o hasta que llega a su espesor suficiente.

4.4.2.5 Desprendimiento y nueva colonización

Una biopelícula puede extenderse a la velocidad que lo dicte su división celular y también deja escapar periódicamente nuevas células pioneras, que inician la colonización en secciones aguas abajo en la tubería. Además, a medida que la biopelícula gana un espesor suficiente que le permita extenderse hacia zonas de mayor velocidad y turbiedad, fuera de la capa límite, algunas células se desprenderán por los efectos de fuerza cortante, y serán arrastradas aguas abajo para cumplir una función; bien sea como recubrimiento orgánico inicial de la superficie, como células pioneras, o como nutrientes.

Un factor que favorece el desprendimiento de la biopelícula es la velocidad de flujo. Si la velocidad de flujo se encuentra en un rango entre 3 y 4 m/s es muy factible que se produzca desprendimiento de la película biológica.

4.5 Estructuras de soporte

La biopelícula puede formarse sobre cualquier superficie expuesta a bacterias y cierta cantidad de agua.

La fase inicial del desarrollo de la biopelícula, consiste en la adsorción de compuestos orgánicos sobre el material que será colonizado (Trulear y Characklis, 1982). La capa orgánica inicial es necesaria para la adhesión microbiana posterior. (Baier, 1972; Fletcher, 1980). El desarrollo de la biopelícula comienza después de esa fase. La adherencia, que está

-
- ⁸ Biofilm in combined sewers: wet weather pollution source and/or dry weather pollution indicator?. V. Rocher, S. Azimi, R. Moilleron y G. Chebbo. *Water Science and Technology*.

fuertemente influenciada por la carga de la superficie (Capdeville y Nguyen, 1990), sucede inmediatamente sobre superficies cargadas positivamente pero puede demorarse varias horas si la superficie está cargada negativamente. La duración de esta fase de adherencia depende de varios factores: la naturaleza del soporte (Zobell, 1943; Wood, 1950; Fletcher y Floodgate, 1976; Beachy, 1981), la carga de la superficie (Belkhadir, 1986), la naturaleza y la concentración del alimento, etc. La colonización inicial de la superficie ocurre en orificios dentro del medio de soporte, que tienen una rugosidad de superficie favorable para su desarrollo y el tiempo que tarda esta colonización en realizarse es inferior al tiempo de formación de la biopelícula. (Tijhuis *et al.*, 1994). (La rapidez con que se forma la matriz no indica que la biopelícula crecerá a la misma velocidad).

La fase de crecimiento es la suma de reproducción celular y la producción extracelular polimérica (Trulear y Characklis, 1982). Durante esta fase, ocurre un rápido desarrollo de la película biológica debido al crecimiento de microcolonias y a la adherencia de las nuevas bacterias (Capdeville y Nguyen, 1990), de forma que al final de esta fase, la superficie está totalmente cubierta por la biopelícula con una estructura compleja de grupos celulares microbianos (Beer *et al.*, 1994).

La biopelícula se puede adherir a toda clase de materiales como metales, plásticos, suelo y partículas.

Según Mittelman (1985), el desarrollo de una biopelícula madura puede tomar varias horas o semanas, dependiendo del sistema. *Pseudomonas aeruginosa* es una bacteria “pionera” comúnmente usada en muchas investigaciones sobre biopelículas. En un experimento (Vanhaecke 1990), los investigadores encontraron que las *Pseudomonas* se adhieren a superficies como acero inoxidable y electropolichadas después de 30 segundos de exposición.

Una estructura de soporte brinda a la biopelícula la estabilidad y rigidez necesaria para su adherencia y presta área superficial al flujo líquido que circula por la tubería. Dicha estructura debe ser inerte de forma que no altere el crecimiento de los microorganismos.

La adhesión de la biopelícula a la estructura de soporte se debe al llamado glicocalix (J.J. Heijuen 1984), lo que indica que no importa el material de la tubería (acero o plástico), la biopelícula crecerá de todas formas (Mayette 1992).

La tasa de crecimiento de la biopelícula es directamente proporcional a la rugosidad de la superficie de soporte. Pederson en 1990 concluyó después de estudios realizados con agua potable sobre superficies de acero y PVC que las superficies rugosas proporcionan mayor área específica y brindan mayor protección a la biopelícula ante los esfuerzos cortantes.

4.5.1 Factores que afectan la adhesión y el crecimiento de la biopelícula

4.5.1.1 Material de la superficie

Una tubería de acero inoxidable es tan susceptible como una de plástico. De acuerdo con Mayette (1992), "el material de la tubería al cual lo microorganismos no se pueden adherir no ha sido descubierto todavía. Los estudios han mostrado que los microbios se adhieren en la misma medida al acero inoxidable, teflón, PVC y PVDF (Kynar)".

4.5.1.2 Área superficial

Los sistemas industriales de agua, a diferencia de la mayoría de ambientes naturales (lagos y ríos), ofrecen una cantidad muy grande de área superficial para adhesión. Los tanques de almacenamiento, filtros y sistemas de tuberías proveen superficies apropiadas para la adhesión y el crecimiento de bacterias (Mittelman 1985).

4.5.1.3 Lisura de la superficie

Aunque las superficie lisas demoran la acumulación inicial de bacterias, la lisura no parece tener un efecto significativo sobre la cantidad total de biopelícula que se adhiere a la superficie. De acuerdo con Meltzer (1993), "La estructura de la superficie no parece influenciar la tasa de formación de biopelícula, sino únicamente durante las primeras horas de exposición. En general, en las superficies lisas se forma biopelícula a una tasa más lenta que una superficie rugosa, pero la formación de biopelícula después de un periodo de varios días es inevitable." Esta conclusión se basa en una investigación realizada acerca de la adhesión de *Pseudomonas* al acero inoxidable.

4.5.2 Comparación del tamaño y la proporción de una bacteria individual con la rugosidad de la superficie, espesor de la biopelícula y diámetro del tubo

4.5.2.1 Acabado de la superficie y tamaño de la célula

Por muchos años, el acabado de las superficies de acero inoxidable fue un estándar definido por un número o grit como el #4 o 150 grit. El acabado Grit se usa con pulimento mecánico y se refiere al número de líneas grit por pulgada de abrasivo; entre más alto el número, el acabado es más liso.

4.5.2.2 Lisura del tubo de plástico

De acuerdo con Gillis (1996), los tubos de polipropileno son tan lisos como los de acero inoxidable electropolichados. No hay irregularidades de magnitudes significativas en rangos de tamaño de las células bacteriales.

4.5.2.3 Tamaño típico de las células bacteriales de la biopelícula

Una de las bacterias más comunes son las *Pseudomonas aeruginosa*. Las células de *Pseudomonas* tienen forma de barra y un ancho de aproximadamente 0.3-0.8 micrones por 1.0-1.2 micrones de largo. Esto es equivalente a 12-31 micropulgadas de ancho por 40-47 micropulgadas de largo.

4.5.2.4 Comparación del perfil de la superficie con el tamaño de las células bacteriales

El perfil de rugosidad de varios acabados de acero inoxidable utilizados en sistemas de agua se muestran en la figura 4.11. Note que el acabado de 32 micropulgadas o 180-grit (que es considerado para usos farmacéuticos, lácteos y alimenticios) tiene orificios lo suficientemente grandes para albergar bacterias. Un acabado de 12 micropulgadas (320-grit), que es típico para aplicaciones de inyecciones de agua, tiene orificios tan profundos como una célula. Por último, una superficie de 320 grit y electropolichada tiene solo unas variaciones menores relativas al tamaño de la célula.

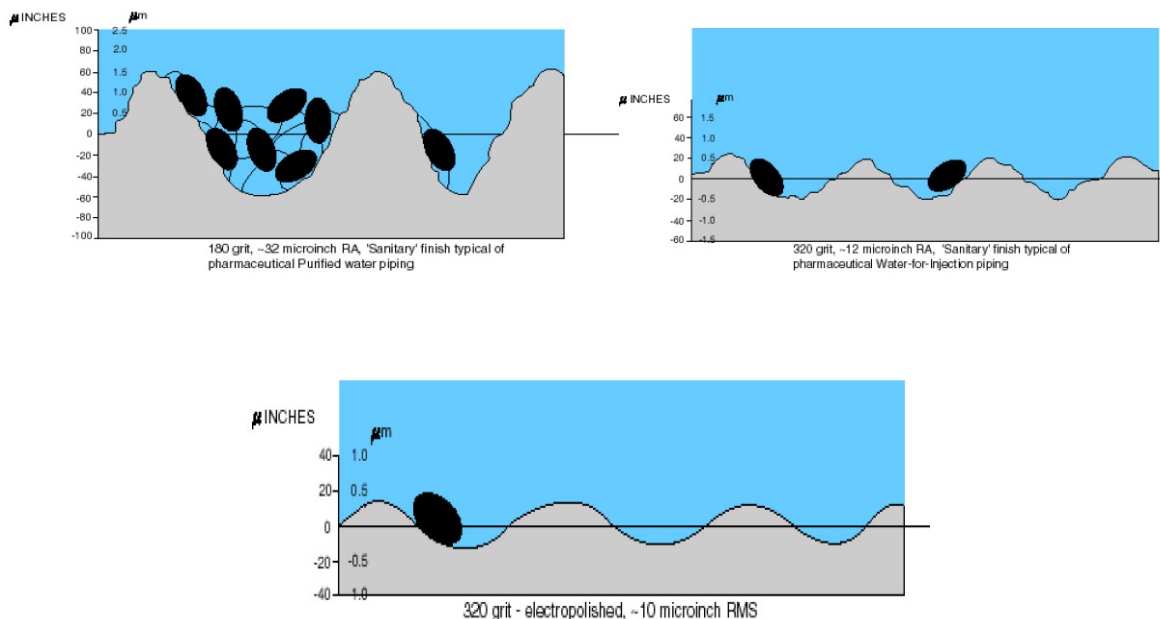


Figure 4.11. Diagrama de comparación del tamaño de una célula *Pseudomonas* con la rugosidad de varias superficies de acero inoxidable.

4.5.3 Crecimiento de biopelícula en diferentes medios de soporte

Debido a que las fases de formación de biopelícula están bien definidas, pero la influencia que tienen diferentes materiales sobre dichas fases no ha sido suficientemente estudiadas, se realizó un estudio por parte del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad de Oviedo en 1998, en el cual se analizó el crecimiento de biopelícula en un reactor biológico giratorio (también llamado sistema de biodiscos) con diferentes materiales sólidos sobre cada biodisco.

Los materiales utilizados fueron carbón activado, arena, partículas de vidrio y tierra diatomácea. Todos los resultados mostraron una fase inicial de adherencia con un ligero crecimiento de biopelícula y una segunda fase con un desarrollo mucho mayor de biopelícula. Además se concluyó que la formación de una capa inicial orgánica no determina el crecimiento posterior de biopelícula, ya que sobre la tierra diatomácea y las partículas de vidrio se observó una gran capa orgánica inicial pero al final presentaron menor formación de biopelícula que los discos de carbón activado y arena. Otra conclusión fue que la rugosidad del material puede ser un factor favorable para mejorar la adherencia. Los diámetros de partícula de muestras de tierra diatomácea eran considerablemente más pequeños que los otros materiales como se puede observar en la siguiente figura.

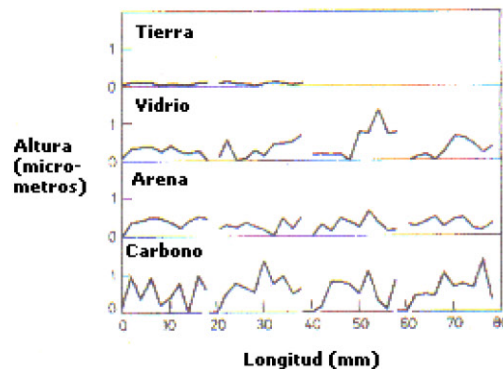


Figura 4-12. Perfiles de las superficies de los discos

Y estos diámetros favorecieron en menor medida la formación de biopelícula que los de carbón activado, material calificado como el mejor de los cuatro para formación de biopelícula.

4.6 Efecto hidráulico de la formación de biopelículas

La biopelícula que forman los microorganismos en la superficie de la tubería para adherirse, protegerse y atrapar los nutrientes necesarios para su supervivencia, aumenta la fricción y por lo tanto las pérdidas de energía del sistema de tuberías.

Los cambios en las condiciones de operación, por ejemplo el incremento del esfuerzo cortante en la pared de la tubería genera cambios en el espesor y la morfología de la biopelícula y por lo tanto, el valor de la rugosidad equivalente se ve afectada.

Cuando se realizan experimentos a una tasa de flujo constante, aumenta la resistencia del fluido a la fricción debido a la acumulación de biopelícula y por lo tanto, la fuerza necesaria para mover las partículas de flujo (presión) es mayor y las necesidades de energía son mayores también. El incremento de la resistencia a la fricción se puede deber a:

- Reducción de la sección transversal de la tubería debido a la biopelícula.
- Cambio en la viscosidad del fluido debido a generación de macromoléculas disueltas provenientes de la biopelícula
- Aumento en la disipación del fluido debido al incremento de la rugosidad de la superficie causado por la presencia de biopelícula

La capacidad de flujo disminuye cuando la presión se mantiene constante debido a la presencia de biopelícula.

Según la investigación realizada por Characklis en 1980, la rugosidad K_s aumenta con respecto al tiempo en todas las pruebas realizadas sobre el efecto hidráulico de las biopelículas en tuberías, de forma que, se puede afirmar que el K_s depende del espesor de la biopelícula.

Otras conclusiones obtenidas en esta investigación fueron las siguientes:

- La formación de biopelícula genera un efecto mínimo sobre la reducción en el diámetro
- La resistencia a la fricción y la rugosidad dependen del espesor de la biopelícula

Existe cierta dificultad para determinar que tanto depende el K_s del espesor de la biopelícula y esto puede deberse a las siguientes razones:

- La medición del espesor de la biopelícula arroja un valor promedio y no mide la altura real de los picos de rugosidad por lo que, el espesor promedio de la biopelícula puede ser menor que cualquiera de dichos picos de rugosidad de la biopelícula
- La medición del espesor de la biopelícula in-situ puede generar un valor mayor, ya que la muestra estaría saturada con agua, a diferencia de la medición que se realiza sin flujo alguno para poder extraer una muestra de biopelícula.

4.7 Efecto hidráulico de los medios de soporte para formación de biopelículas

Según los resultados de la tesis “Efecto Hidráulico de estructuras de soporte de película biológica en tuberías de alcantarillado” de 2003, algunos de los efectos hidráulicos más claros que ocurren debido a la película biológica son:

- El Coeficiente de Manning depende claramente del espesor de la biopelícula, primordialmente durante su crecimiento.
- Las condiciones climáticas afectan el crecimiento de la biopelícula, y por lo tanto el n de Manning, lo anterior se estableció debido a que en periodos secos se desprendía biopelícula, la superficie de la tubería se secaba y se formaban protuberancias aumentando de esta manera el n de Manning.
- En superficies no lisas, la biopelícula se acumula en los orificios donde el esfuerzo cortante no puede alcanzarlas de forma que la biopelícula consigue un mayor espesor cuanto más rugosa es la superficie, lo que favorecería el tratamiento del agua residual dentro de las tuberías de alcantarillado.

Según la tesis “Efecto que genera el medio de soporte de filamentos de Nylon de 0.5mm sobre la hidráulica de las tuberías de alcantarillado” de 2001, los filamentos causaron el aumento notable del n de Manning a un valor de 0.0152.

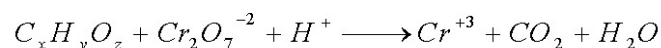
4.8 Parámetros de control de la calidad del agua residual

Los siguientes parámetros de control de la calidad del agua residual se analizaron durante las pruebas experimentales con el fin de garantizar el crecimiento de la película biológica.

4.8.1 Demanda química de oxígeno (DQO)

Es una forma indirecta de medir la materia orgánica presente en el agua residual. El ensayo emplea un agente químico fuertemente oxidante (dicromato de potasio) en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. Dicho ensayo debe realizarse a altas temperaturas y algunas veces para facilitar la oxidación de algunos compuestos orgánicos se requiere la utilización de un catalizador como lo es el sulfato de plata.

La reacción que se lleva a cabo entre la materia orgánica y el dicromato de potasio es como sigue:

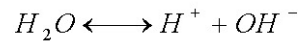


Donde el primer término representa la materia orgánica y el segundo es el agente químico oxidante.

Los resultados de los ensayos de la DQO generalmente arrojan valores superiores a los obtenidos en los ensayos de la DBO, debido principalmente a que en los ensayos de la DQO se oxidan mayor número de compuestos que los que se oxidan por vía biológica. El ensayo de la DQO tiene una gran ventaja, su tiempo de obtención de resultados de tan solo 3 horas frente a 5 días que tarda el ensayo de la DBO.

4.8.2 pH

El pH o concentración de iones hidrógeno es un parámetro de calidad del agua de gran importancia para las aguas residuales. Se puede definir como la cuantía en que se disocian las moléculas de agua (Metcalf & Eddy). El agua se disocia en iones hidroxilo e hidrógeno de la siguiente forma:



El producto de las concentraciones de los iones hidrógeno $[H^+]$ e hidroxilo $[OH^-]$ es una constante, por lo tanto, cuando aumenta un ión disminuye el otro (Orozco, 2003). Para que este equilibrio suceda, el agua actúa como ácido o como base. El pH entonces puede definirse como una medida de la acidez o la alcalinidad del agua.

La forma habitual de definir el pH es como el logaritmo decimal del ion hidrógeno con signo negativo.

$$pH = -\text{Log}_{10} [H]^+$$

La mayoría de las reacciones químicas se controlan mediante el pH. Por otro lado, la actividad biológica sucede sólo dentro de un rango estrecho de pH entre 6 y 8. Específicamente para favorecer la formación de biopelícula, el pH debe estar entre 6.5 y 7.5 (Metcalf & Eddy, 1995).

5 METODOLOGÍA

5.1 Modelo Hidráulico

Este modelo definirá el coeficiente de rugosidad de Manning como parámetro que describe la disipación de energía en el flujo de canales abiertos y describirá el movimiento del flujo dentro de la tubería.

Debido a que el objetivo de este trabajo de grado es encontrar como se ve afectada la capacidad hidráulica de una tubería NOVALOC (mediante el análisis del n de Manning) por la colocación de un medio de soporte para la formación de biopelícula, se requiere una calibración del coeficiente de Manning, que consiste en encontrar el perfil teórico que mejor se ajuste - tomando cierto rango de n de Manning - al perfil experimental que se obtiene mediante las pruebas. Dicha calibración se logrará utilizando los métodos de solución de flujo gradualmente variado para el cálculo del perfil teórico conocidos como método de paso fijo y método de Runge-Kutta.

Se requiere un conocimiento de los fundamentos del flujo en tuberías y la estructura matemática necesaria para el cálculo del coeficiente de Manning que se resume a continuación:

▪ Modelación Matemática

Los fundamentos del flujo gradualmente variado en tuberías son los siguientes:

5.1.1.1 Ecuación de Flujo Gradualmente Variable (FGV)

La ecuación que describe el flujo gradualmente variado visto en el numeral 4.1.3. está dada por el desarrollo de los términos de la ecuación de cantidad de movimiento, cuyo resultado en forma explícita es el siguiente:

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = \frac{S_o - S_f}{1 - F^2}$$

Donde F es el número de Froude, el cual relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de gravedad:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

v = velocidad media

D = profundidad hidráulica

Donde $\sqrt{gD} = \sqrt{g \frac{A}{l}} = V_0 =$ velocidad de la onda en un canal

Luego el número de Froude es igual a $F = \frac{V}{V_0}$, el cual depende del coeficiente de rugosidad de Manning.

El número de Froude indica el tipo de régimen del flujo de la siguiente forma:

- $Fr > 1 \Rightarrow$ flujo supercrítico o régimen de torrente (el agua escurre más rápido que una onda)
- $Fr < 1 \Rightarrow$ flujo subcrítico o régimen de río (la onda es mas rápida que el agua)
- $Fr = 1 \Rightarrow$ régimen crítico

En el caso de las pruebas experimentales de este estudio, se busca conservar un flujo subcrítico, ya que este tipo de flujo tiene una velocidad baja lo que implica menores posibilidades de generar un desprendimiento de biopelícula.

5.1.1.2 Leyes de fricción

El término S_f corresponde a la fricción dentro de la tubería y puede calcularse mediante la ecuación de Manning o mediante la ecuación de Darcy-Weisbach como se describe a continuación:

La ecuación de Manning tiene la forma: $V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$, si se despeja el término de la

fricción S y se le llama S_f de esta ecuación se llega a : $S_f = n^2 \cdot \frac{V^2}{R^{4/3}}$

Según la ecuación de Darcy-Weisbach, el término de la fricción tiene la siguiente forma:

$$S_f = f \frac{1}{4R} \frac{V^2}{2g}$$

5.1.2 Modelo Físico

5.1.2.1 Tuberías utilizadas para las pruebas

Las tuberías NOVALOC son tuberías de pared estructural con superficie lisa interna y externamente, construida a partir de un perfil extruido, que es acoplado helicoidalmente mediante un sistema de enganche mecánico.

A una de estas tuberías de 24 pulgadas de diámetro, se le colocaron, como medio de soporte, una serie de anillos concéntricos de tubería PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada sobre la superficie interna cada 10 centímetros. Este tipo de medio de soporte es de fácil colocación desde la planta de producción, presenta una alta compatibilidad con el material de la tubería y se piensa que favorecería aún más la formación de biopelícula. A continuación se muestra una fotografía de la tubería con su medio de soporte instalado.



Figura 5.1 – Tubería NOVALOC y medio de soporte utilizado

5.1.2.2 Montaje para las pruebas

La investigación se realizó en un modelo a escala real en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes (CITEC), para estudiar el efecto de un medio de soporte sobre la capacidad hidráulica de una tubería de alcantarillado, simulando el comportamiento hidráulico de la tubería NOVALOC para diferentes caudales y pendientes.

En el montaje se utilizaron los siguientes elementos:

- Tramo de 6.5 m de tubería NOVALOC, de 600 mm de diámetro, con un medio de soporte que consiste en una serie de anillos concéntricos de tubería PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada colocados cada 10 cm en la superficie interna de la tubería.
- Lodos espesados necesarios como inóculo para el crecimiento de bacterias.

- Melaza como alimento para las bacterias. Nutrientes como: fósforo, nitrógeno y otros minerales y carbonato de calcio
- Circuito cerrado de flujo, constituido por dos tanques, uno de almacenamiento (4m^3 de capacidad) y otro de cabeza hidráulica (para almacenamiento temporal para la conducción de agua residual en la tubería) y una motobomba de 30 L/s de capacidad y succión de 4" x 4".
- Tablero de lectura de piezómetros para la medición de niveles.
- Vertedero triangular de 90° y limnómetro para la medición de caudal
- Nivel de precisión para la lectura de la pendiente
- Cercha metálica como soporte de la tubería
- Gato hidráulico para la modificación de las pendientes
- Neumático para sellar la salida de la tubería del tanque aguas arriba
- Pantalla de quietamiento aguas abajo.

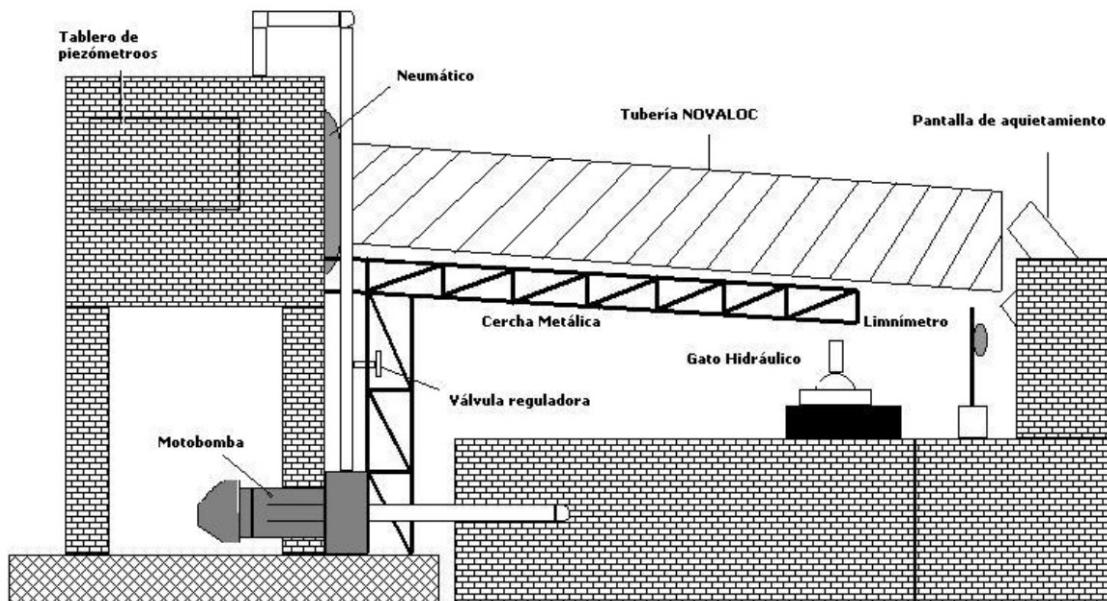


Figura 5.2 – Esquema del montaje para las pruebas

En la tubería NOVALOC se perforaron 27 orificios alineados y distanciados según se expresa en la tabla del Anexo 1. En dichos orificios se acoplaron mangueras transparentes de 4.7 mm de diámetro que funcionaron como piezómetros en un tablero de medición y son los que permiten obtener un perfil experimental en cada prueba realizada.



Figura 5.3. – Tablero de piezómetros

Dos tanques en mampostería hicieron parte del modelo, uno se encuentra al nivel del piso y el otro está elevado y cuenta con un área superficial de 1m x 1.15m. El canal de conducción tiene una longitud de 4.35 m y un ancho de 1.53 m. El pozo de succión cuenta con un área superficial de 2.92 m por 1.53 m.



Figura 5.4. – Tanque elevado



Figura 5.5. – Montaje completo de la tubería de agua residual

La tubería NOVALOC fue montada sobre una cercha metálica triangular de 15cm de base con el fin de asegurar su estabilidad y uniformidad en la pendiente. Esta cercha se pivoteó sobre una estructura metálica localizada aguas arriba de la tubería (hacia el tanque alimentador) y la pendiente se modificó en el extremo aguas abajo de la tubería mediante un gato hidráulico.



Figura 5.6. – Cercha metálica

El caudal fue suministrado por una bomba de potencial nominal de 12HP, capacidad máxima de 30 L/s y diámetro de succión e impulsión de 4". Se contó con una válvula de 4" de diámetro en la tubería de impulsión de la bomba para regular el caudal de entrada al tanque elevado.

Se contó también con un limnómetro para la medición del caudal y con un vertedero triangular de 90° que se muestra en la siguiente fotografía.



Figura 5.7. Vertedero triangular

Se utilizó un neumático inflado referencia 1100 L20 para acoplar y lograr la suficiente hermeticidad entre la tubería y la boca del tanque alimentador.



Figura 5.8. Acople de tubería al tanque mediante neumático

Un montaje muy similar se acopló para una tubería NOVALOC con el mismo medio de soporte, la diferencia de las pruebas a realizar radica en que en esta tubería no se permitió la formación de biopelícula mediante la adición de cloro semanalmente. A esta tubería se le dio el nombre de tubería agua potable sin biopelícula y se utilizó como referencia para las pruebas en la tubería de agua residual. A continuación se muestra una fotografía de los dos montajes:



Figura 5.9. Tubería Agua Residual (Izq.) y Tubería Agua Potable (Der.)

5.2 Descripción de las mediciones

Mediante las pruebas se quiere determinar el efecto que genera la utilización de un medio de soporte para favorecer la formación de biopelícula al interior de la tubería NOVALOC, sobre el coeficiente de rugosidad de Manning, determinado mediante un ajuste entre los datos experimentales y teóricos del perfil de flujo formado en toda la tubería, dado un caudal y una pendiente específicos.

Se realizaron pruebas hidráulicas para diferentes pendientes. La pendiente utilizada varió dentro de un rango de 0 a 1.1%, esta debe ser baja según las suposiciones del flujo gradualmente variado y se fijó considerando que la velocidad mínima para que exista autolimpieza en un alcantarillado sanitario es de 0.6 m/s a tubo lleno y además que haya siempre régimen de flujo subcrítico que implica velocidades de flujo bajas.

Antes de comenzar a realizar cada prueba, cuando no había flujo de agua en la tubería se determinaron los “ceros” de la misma (cota inferior interna de la tubería), ya que estos son el punto de referencia para encontrar el nivel del agua en cada punto de la tubería en el que se ha conectado un piezómetro. Los piezómetros se revisaron para sacar el aire que ha podido entrar en el proceso del cambio de pendiente.

Fijada la pendiente se realizaron 10 pruebas diarias, es decir una pendiente con 10 caudales, estos caudales variaron entre 5 y 20 LPS y se distribuyeron lo más uniformemente posible mediante la válvula de regulación. Para cada uno de los 10 caudales se tomó nota de las alturas de flujo sobre el tablero de piezómetros y el valor que mide la aguja limnimétrica en el vertedero de aforo de caudal.

Se graficó el perfil experimental de cada prueba y se simuló un rango de valores de coeficiente de rugosidad para determinar el perfil teórico que mejor se ajuste.

El agua residual se recirculó por periodos aproximados de 8 horas continuas durante la primera semana de pruebas para favorecer las posibilidades de colonización bacteriana en las paredes de los tubos. Las siguientes semanas se realizaron los experimentos pertinentes y se recirculó el agua durante periodos de 5 a 6 horas diarias.

Semanalmente se agregó al agua lodos espesados, melaza y nutrientes para que presentara las características típicas de un agua residual y para existiera alimento para los microorganismos que formaron la biopelícula.

El procedimiento anterior a excepción de la recirculación y alimentación del agua residual se siguió en las pruebas experimentales realizadas en la tubería agua potable sin biopelícula.

5.2.1.1 Medición de caudales

El vertedero triangular de 90° fue calibrado con la siguiente ecuación que relaciona el caudal con la profundidad de la lámina de agua medida por el limnómetro:

$$Q = 0.0205 \times (H - H_o)^{2.3198}$$

Donde:

Q = Caudal en LPS

H = Altura de la lámina de agua en cm

H_o = Cero del limnómetro (medición en el borde del vertedero) en cm = 28 cm

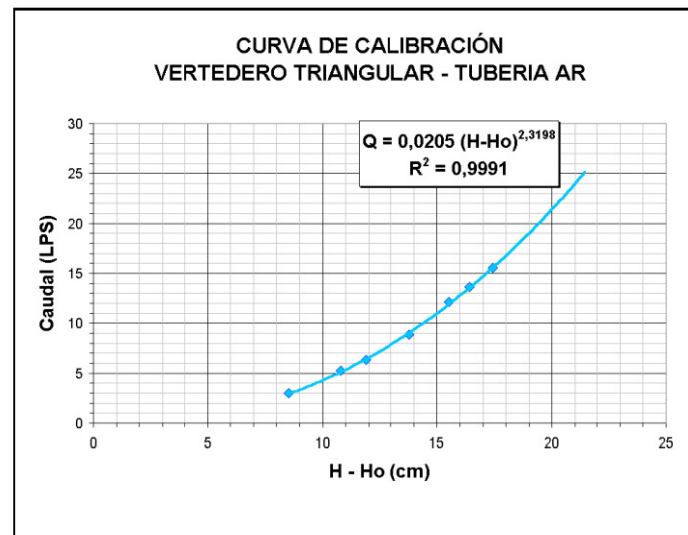


Figura 5.9. Curva de calibración del vertedero triangular

5.2.1.2 Medición de la pendiente

El procedimiento de cálculo de la pendiente, se muestra en la figura 5.10. y se describe a continuación:

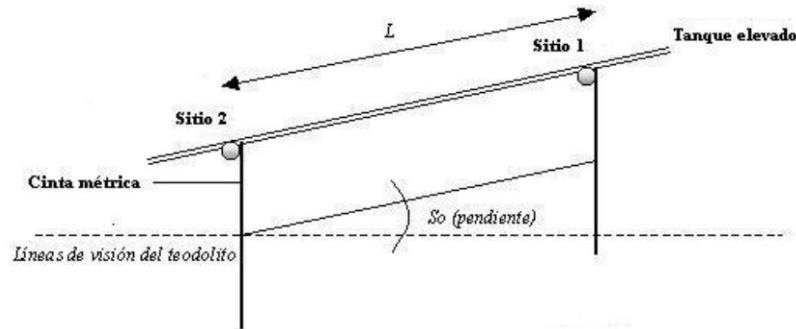


Figura 5.10.- Esquema para la determinación de la pendiente en un tramo de tubería

Se cuenta con dos cintas métricas colocadas a una distancia de 3,024 metros entre sí. Las mediciones para cada pendiente son H_1 y H_2 (lecturas de cotas realizadas con un nivel de precisión de 0.5 mm) y la pendiente entre estos dos puntos se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$S_o = \frac{H_2 - H_1}{L}$$

Donde S_o es la pendiente a calcular, L es la distancia entre las cintas métricas y H_1 y H_2 son las mediciones de cota para los sitios 1 y 2.

La siguiente es una fotografía de la tubería con sus cintas métricas para medición de pendiente.



Figura 5.11. Cintas métricas de la tubería para medición de pendiente

5.2.1.3 Medición de la profundidad del flujo

El tablero de piezómetros consta de 27 piezómetros, tiene una precisión de 1.0 mm y está marcado cada centímetro. Para determinar la profundidad de la lámina de agua en el interior de la tubería, se realizaron las correspondientes lecturas de los piezómetros, teniendo en cuenta la referencia de la cota inferior interna (cota cero).

Al realizar la lectura que se registra en el tablero de piezómetros, se obtienen mediciones P_i de altura en metros de agua y este valor menos la cota del fondo de la tubería Z_i , da como resultado la profundidad en el piezómetro Y_i , es decir, que la profundidad de la lámina de agua se calcula como sigue:

$$Y_i = P_i - Z_i$$

Las cotas de fondo de la tubería (Z), se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$Z_{i+1} = Z_i + \Delta x_{i,i+1} \cdot \frac{S_0}{\sqrt{1 + S_0}}$$

Donde S_0 es la pendiente de la tubería calculada anteriormente, $\Delta x_{i,i+1}$ es la distancia entre piezómetros i , $i+1$ medida en el fondo de la tubería y Z_i es la cota del fondo de la tubería en el piezómetro i .

La ecuación que permite calcular la cota de fondo Z_i , es decir la altura a la cual se encuentra el borde la de tubería con respecto al tablero de piezómetros es:

$$Z_i = \text{Cero_tablero} + [(Cero_tubería_1 - Cero_tubería_2) - (Diámetro + espesor)]$$

La siguiente figura explica con mayor detalle las variables de la ecuación anterior:

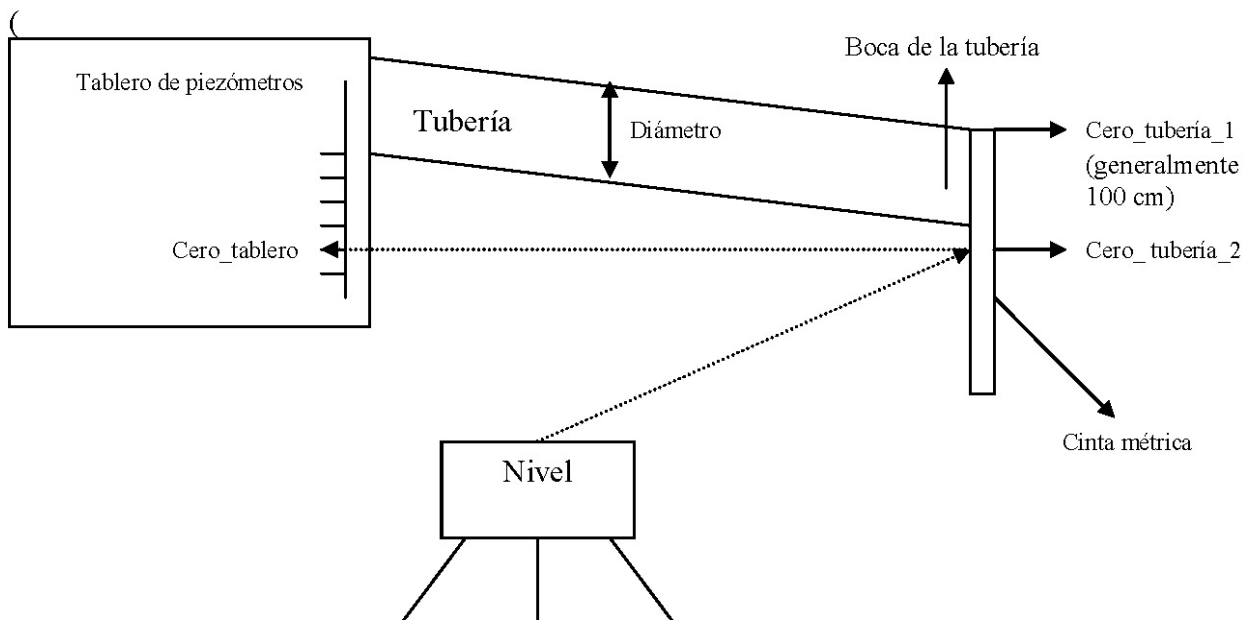


Figura 5.12. Medición de la cota de fondo de la tubería

5.2.1.4 Mediciones de la biopelícula

Mediante dos secciones rectangulares removibles o también llamadas muestreadores se midió la densidad y el peso de la película biológica que se forma sobre la superficie interna de la tubería, simultáneamente con las pruebas hidráulicas. La frecuencia de medición fue de aproximadamente cada 10 a 15 días.

El procedimiento de medición fue el siguiente:

Se calcula la densidad de la biopelícula de la siguiente forma:

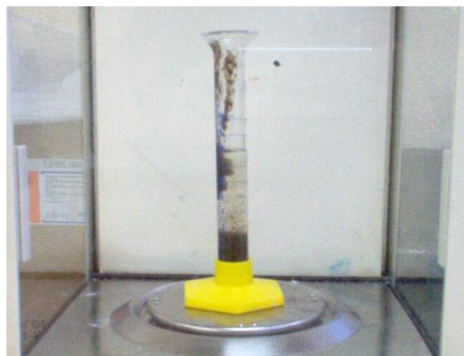
Se toma una muestra de biopelícula fuera de la zona de muestreadores, como se muestra en la figura 5.13.



Figura 5.13. Toma de la muestra de biopelícula para medición de densidad

En una probeta de 10 mL se agrega un volumen inicial conocido de agua. Se coloca la probeta con agua sobre una balanza, se hacen ceros. Se agrega cierta cantidad de la biopelícula recolectada. Se registra el peso obtenido después de agregar la biopelícula. Se observa después de unos minutos el volumen desplazado por el peso de la película biológica. (Ver fotografía 5.14).

$$\text{De forma que la densidad es } \rho = \frac{M}{V} = \frac{\text{Peso}_{\text{ biopelícula }}}{\text{Volumen}_{\text{ desplazado}}}$$



Fotografía 5.14. Medición del peso y el volumen de biopelícula

La medición del peso de la biopelícula consistió sencillamente en pesar cada muestreador en una balanza de 0.0005 gramos de exactitud y promediar el delta de peso de ambos muestreadores en cada medición así:

M_0 :Peso del muestreador sin biopelícula

M_1 :Peso del muestreador 1 con biopelícula

M_2 :Peso del muestreador 2 con biopelícula

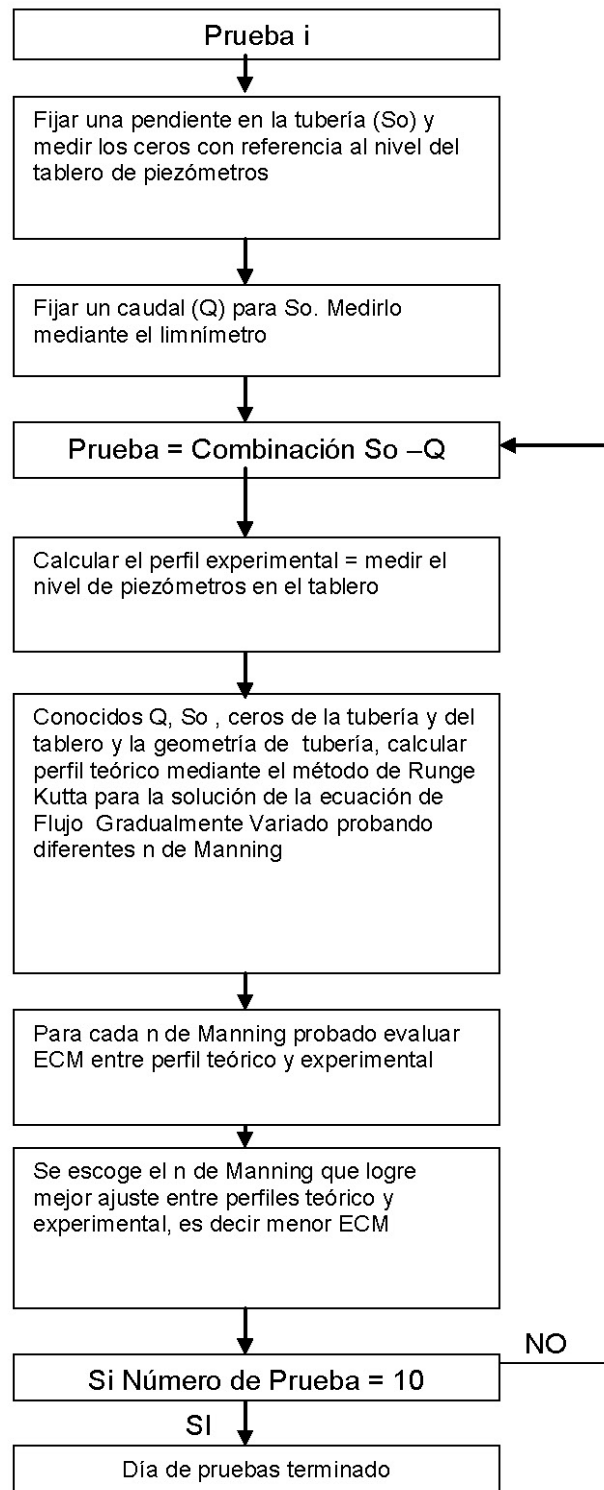
El incremento en peso del día de la medición será igual a:

$$\text{Incremento}_{\text{ peso}} = \frac{(M_1 - M_0) + (M_2 - M_0)}{2}$$

5.3 Procedimiento de cálculo del coeficiente de Manning

Después de seguir los pasos descritos en el capítulo 5.2. de descripción de las mediciones y mediante la aplicación de las fórmulas del FGV en una hoja de cálculo de excel desarrollada por los ingenieros de la Cátedra PAVCO, se realiza el cálculo del n de Manning.

Los datos necesarios son: diámetro y espesor de la tubería, altura de la lámina de agua sobre el vertedero y pendiente del fondo de la tubería. El procedimiento diario de pruebas que se llevó a cabo se describe en el siguiente diagrama de flujo:



Nota: Cada prueba se realiza para un caudal diferente, tratando de incluir el mínimo y máximo caudal que se puede obtener con la bomba.

A continuación se describe el método de Runge-Kutta y el método de cálculo del error cuadrático medio como complemento del diagrama de flujo anterior.

5.3.1 Método de Runge Kutta

Mediante la integración numérica de la ecuación del Flujo Gradualmente Variado se obtienen diferentes perfiles teóricos para cada prueba, utilizando ciertos coeficientes de rugosidad.

La integración consiste en una ecuación de diferencias finitas de la siguiente forma:

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{1}{6} [f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4] \cdot \Delta x_{i,i+1}$$

Donde:

Y_i : Y crítico

$$f_1 = F(Y_i)$$

$$f_2 = F(Y_i + f_1 \cdot \Delta x_{i,i+1})$$

$$f_3 = F(Y_i + f_2 \cdot \Delta x_{i,i+1})$$

$$f_4 = F(Y_i + f_3 \cdot \Delta x_{i,i+1})$$

$$F(Y) = \frac{S_0 - Sf}{1 - F^2} \text{ donde: } S_f = n \cdot \frac{V_i^2}{R_i^{4/3}}, V_i = \frac{Q}{A_i}, R_i = \frac{A_i}{P_i}, F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}}, D = \frac{A}{l}$$

A su vez A_i , R_i , y D se calculan mediante las ecuaciones de tuberías parcialmente llenas descritas en el capítulo 4.1.2.

Cabe anotar que tanto el perfil teórico como el experimental se grafican con respecto a la distancia. El perfil teórico se grafica a partir del Y crítico y según la teoría de Rouse “para pendientes pequeñas la profundidad crítica se localiza a aproximadamente 3 Y_c o 4 Y_c agua arriba del borde en el canal”⁹.

Se realizaron pruebas experimentales de medición de la distancia a la cual se da el Y crítico. Un ejemplo: para un caudal de 2.8 LPS, el $Y_c = 3.3$ cm, según esta teoría el Y crítico debería encontrarse a 9.9 cm agua arriba del borde de la tubería, sin embargo, este se encontró a 7 cm de distancia, este hecho puede deberse a que el primer anillo, utilizado como medio de soporte, se encuentra a 10 cm de distancia y hace que el nivel aumente en ese punto y por tanto el Y crítico se da más cerca del borde de la tubería.

⁹ Hidráulica de Canales Abiertos. VEN TE CHOW.

Adicional a esta prueba, se realizó un análisis de sensibilidad para establecer que tanto variaba el n de Manning con respecto a la distancia a la cual se colocaba el Y crítico y los resultados fueron los siguientes:

Distancia desde el borde de la tubería hasta el Yc (cm)	N de Manning
0	0.0745
5	0.0755
10	0.0760
18 (Ubicación Piezómetro 1)	0.0765

Estos resultados indican que el n de Manning resultante de ajustar un perfil teórico a un perfil experimental es poco sensible a la distancia a la cual se coloque el Y crítico a partir del cual inicia el perfil teórico de flujo.

De esta forma se decidió que para todas las pruebas el Y crítico se ubicaría a una distancia de 5 cm del borde de la tubería, como se muestra en la siguiente figura:

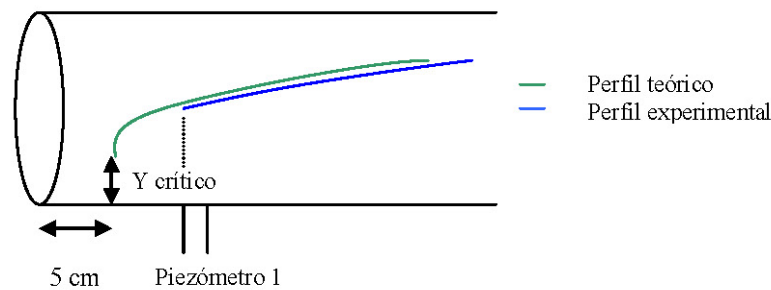


Figura 5.15. Ubicación del Y crítico para el perfil teórico de flujo

Sin embargo, una recomendación válida sería estudiar en próximos estudios los diferentes lugares donde se presenta el Y crítico experimental para todos los caudales medidos.

5.3.2 Cálculo del Error Cuadrático Medio (ECM)

Como se enunció en el número 5.3.1. mediante el método de Runge-Kutta, se obtienen varios perfiles teóricos, de forma que es necesario elegir el de mejor ajuste con respecto al perfil experimental de cada prueba, de modo que se obtenga un coeficiente de Manning para cada prueba. Se requiere entonces un indicador de ajuste entre el perfil teórico y el experimental llamado error cuadrático medio, el cual es una medida de la diferencia entre los valores medidos en la práctica y los valores calculados que tiene la siguiente forma:

$$ECM = \frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^P \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Donde:

Y_i : Profundidad medida en el piezómetro i de la prueba k

\hat{Y}_i : Profundidad calculada en el piezómetro i de la prueba k

P : Total de piezómetros utilizados en la prueba k

5.4 Preparación del Agua Residual Sintética

Es claro que un microorganismo necesita para reproducirse y funcionar de manera correcta: energía, carbono para la síntesis de materia celular nueva y elementos inorgánicos tales como nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio y magnesio.

En cuanto a las fuentes de carbono las principales son la materia orgánica y el dióxido de carbono, mientras que la energía necesaria para la síntesis celular se obtiene de la luz o de las reacciones químicas de oxidación.

Por las razones anteriores y con el propósito de lograr el crecimiento de los microorganismos y por consiguiente de la biopelícula dentro de la tubería, el agua residual se prepara adicionado lo siguiente:

- 3 kilos de melaza (alimento para las bacterias)
- $\frac{1}{4}$ de kilo de nutrientes (elementos inorgánicos)
- 5 galones aproximados de lodo espesado como inóculo (materia orgánica)

Algunas veces, los nutrientes pueden condicionar y limitar en mayor medida el crecimiento bacteriano, por esta razón es tan importante su adición al agua residual.

Los componentes anteriormente mencionados se adicionaron semanalmente al agua residual con el propósito de mantener las condiciones de abundancia de alimento y por lo tanto, garantizar el crecimiento de la biopelícula.

Por último, el agua residual requiere un proceso de recirculación diario para garantizar que el alimento circula por la superficie interna de la tubería y por lo tanto se genere un crecimiento de biopelícula dentro de la misma.

Los primeros 5 días el agua se recirculó durante 8 horas aproximadamente. Después de este periodo la recirculación se realizó de cinco a seis horas diarias.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El seguimiento del procedimiento diario de pruebas en la tubería con agua residual descrito en el numeral 5.3. se llevó a cabo durante un periodo de recirculación de 65 días. En total se recolectaron datos para 42 días de pruebas, es decir 420 pruebas, recordando que cada prueba significa una pendiente con un caudal (So-Q). Los caudales oscilaron entre 3.0 y 17 LPS hasta el día 27 de octubre, día a partir del cual la bomba aumentó su caudal mínimo a 7 LPS y su caudal máximo a 23 LPS aproximadamente. El rango de pendientes fue entre 0 y 1.1%.

Así mismo se recolectaron datos para 10 días de pruebas en una tubería con agua potable y sin biopelícula, siguiendo el mismo procedimiento utilizado para la tubería de agua residual, de modo que en total se obtuvieron resultados para 100 pruebas en esta tubería, que posteriormente serán comparados con los resultados de la tubería con agua residual y biopelícula.

El primer efecto claro de este tipo de medio de soporte fue la variación del n de Manning con el caudal. A mayor caudal menor n de Manning y viceversa. Una explicación a este fenómeno fue enunciada en el capítulo 4.1.1 y consiste en que “cuando el agua es poco profunda las irregularidades del fondo del canal quedan expuestas y sus efectos se vuelven más pronunciados”¹⁰. Este es el caso de este tipo de medio de soporte (anillos de tubería PVC de aproximadamente 2.8 cm), cuando el nivel y por consiguiente el caudal es bajo, los anillos producen un efecto más pronunciado sobre la rugosidad y viceversa. En el capítulo 6.2. se analiza con mayor detalle la variación del n de Manning con el caudal.

Se realizó un análisis acerca de la variación del n de Manning con respecto a la pendiente y este se encuentra en el siguiente capítulo.

6.1 Variación del n de Manning con respecto a la pendiente

Utilizando los resultados de la tubería con agua potable y sin biopelícula, se analizó en forma gráfica la variación del n de Manning con respecto a la pendiente

¹⁰ Hidráulica de Canales Abiertos. Ven Te Chow.

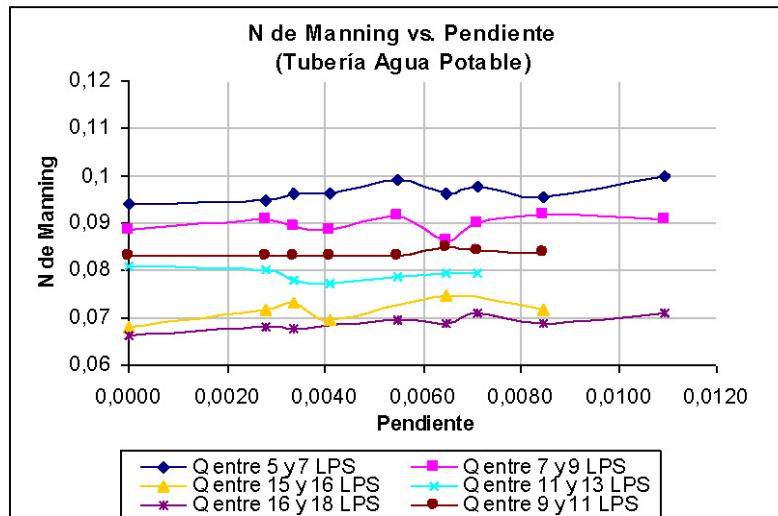
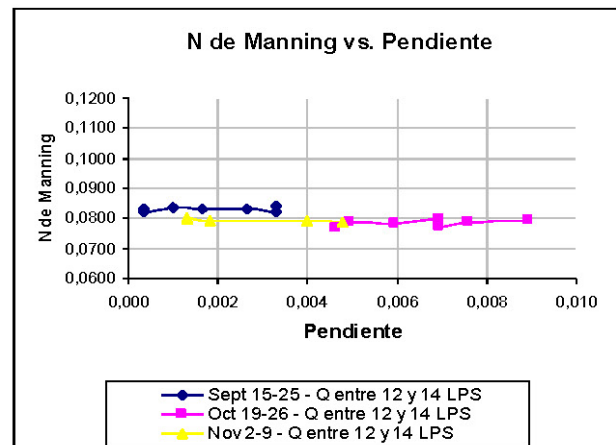
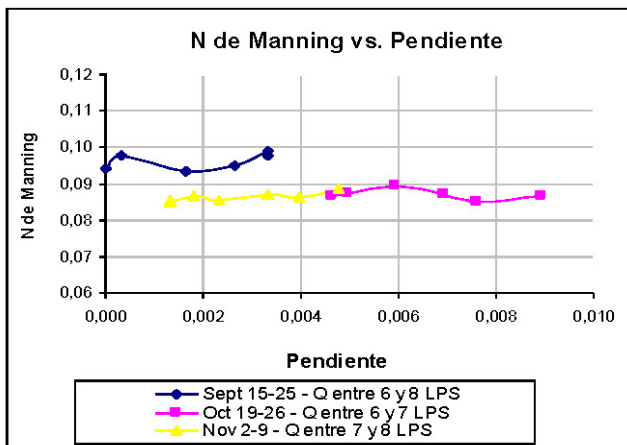


Figura 6.1. Variación del n de Manning con respecto a la Pendiente.
 Tubería Agua Potable Sin Biopelícula

En la figura 6.1. el n de Manning muestra una variación despreciable con respecto a las pendientes medidas en las pruebas experimentales, ya que a pesar de incrementar la misma el n de Manning permanece en valores muy similares. Así mismo se puede observar que a menor caudal mayor coeficiente de rugosidad.

Este mismo análisis se llevó a cabo en la tubería con agua residual y con biopelícula y los resultados fueron los siguientes:



Figuras 6.2 y 6.3. Variación del n de Manning con respecto a la pendiente. Tubería Agua Residual. Caudales entre 6 y 8 LPS y entre 12 y 14 LPS respectivamente.

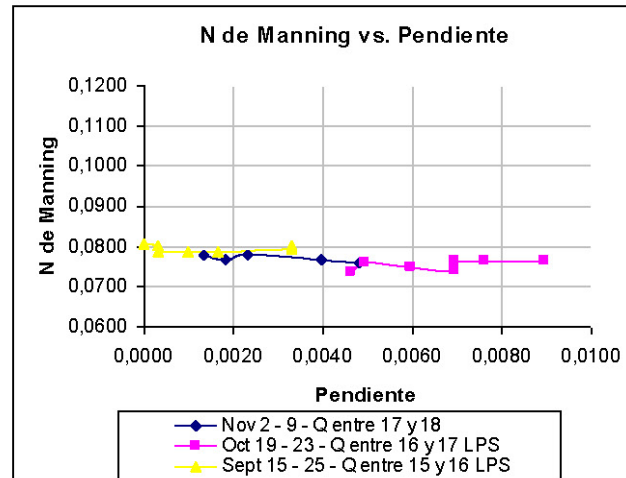


Figura 6.4. Variación del n de Manning con respecto a la pendiente.
 Tubería Agua Residual. Caudal entre 15 y 18 LPS.

De la misma forma se observa que la variación del n de Manning con respecto a la pendiente es mínima. Teniendo en cuenta estos resultados, el n de Manning no depende significativamente de la pendiente pero como se verá en el siguiente capítulo, este coeficiente si varía con el caudal.

6.2 Variación del n de Manning con respecto al caudal

6.2.1 Resultados Tubería Agua Potable Sin Biopelícula

Se presentan a continuación los resultados del coeficiente de Manning vs. el caudal. Para empezar, la figura 6.5 muestra los resultados obtenidos en la tubería con agua potable y sin biopelícula:

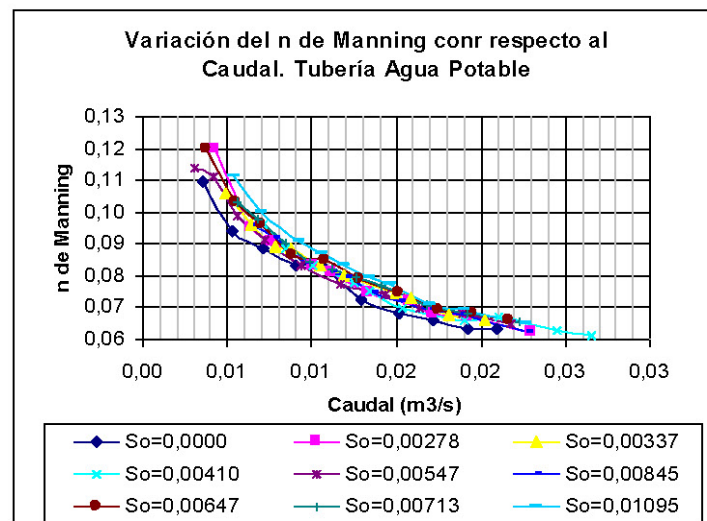


Figura 6.5. Variación del n de Manning con respecto al Caudal
 Tubería con agua potable y sin biopelícula

Estas pruebas se realizaron con el propósito de comparar el n de Manning producido únicamente por la presencia del medio de soporte dentro de la tubería, y tener pruebas de referencia que demuestren el verdadero efecto del crecimiento de la biopelícula sobre el medio de soporte.

Debido a la baja dependencia del coeficiente de rugosidad con respecto a la pendiente, se decidió que a pesar de que las pruebas en esta tubería fueron realizadas para diferentes pendientes, se podría obtener una regresión de todas ellas como se muestra en la siguiente figura:

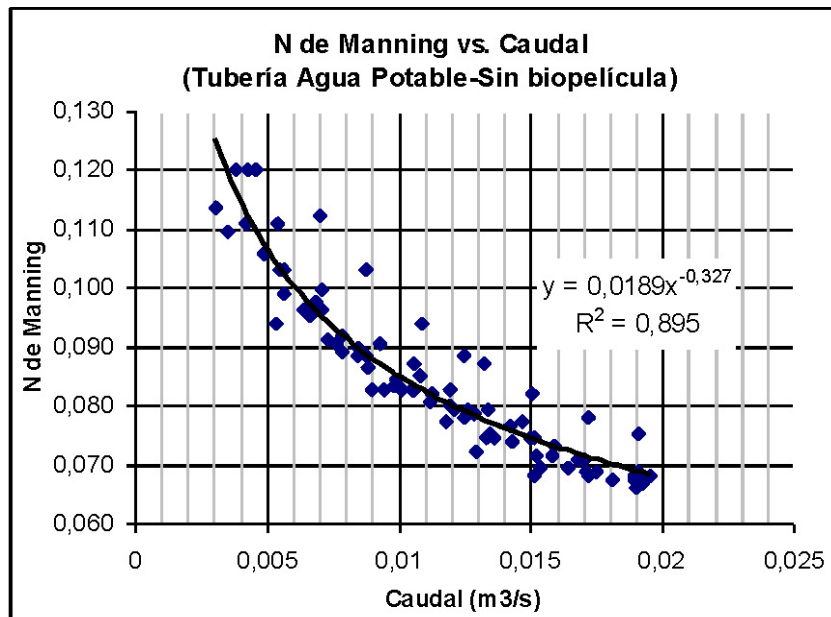


Figura 6.6. Variación del n de Manning con respecto al Caudal
 Tubería con agua potable y sin biopelícula

La ecuación obtenida es de tipo potencial de la forma $n = KQ^{-h}$ representa la variación del n de Manning con respecto al caudal para una tubería con un medio de soporte que consta de anillos de tubería PVC de $\frac{3}{4}$ " colocados cada 10 cm.

Se trata entonces de encontrar una relación entre la ecuación de Manning y la obtenida anteriormente.

Se sabe que la ecuación de Manning es: $Q = \frac{A}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$

donde:

Q: Caudal en m^3/s

n : Coeficiente de rugosidad

R: Radio Hidráulico :f(Q)

S: Pendiente

A: Área en m^2

Si se despeja el coeficiente de rugosidad se tiene que:

$$n = \frac{A}{Q} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \Rightarrow n = (A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}) \cdot Q^{-1}$$

Se sabe que el radio hidráulico es función del caudal de forma que:

$n = A \cdot S^{1/2} \cdot (f(Q))^{2/3} \cdot Q^{-1}$ donde $A \cdot S^{1/2}$ equivale a una constante y $f(Q)^{2/3} \cdot Q^{-1}$ podría tener la forma Q^{-h} , así que se puede percibir que la ecuación que representa la variación de n de Manning con respecto al caudal es del mismo tipo que la ecuación de Manning.

6.2.2 Resultados del mes de septiembre

La figura 6.7 muestra los resultados correspondientes al mes de septiembre:

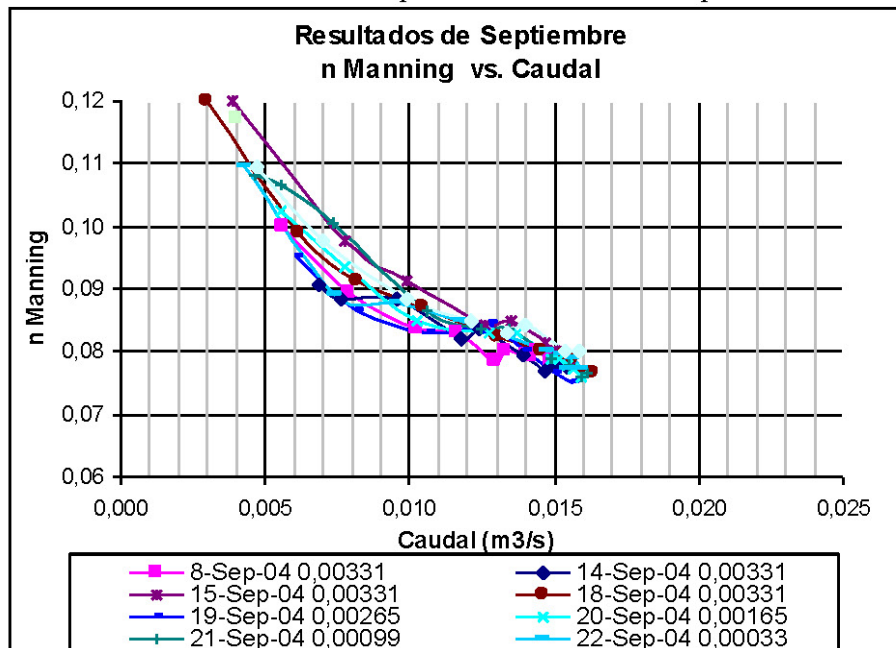


Figura 6.7 –Variación del n de Manning con respecto al Caudal
 Tubería Agua Residual – Mes de Septiembre

Para lograr un mejor análisis, se realizó una regresión de las pruebas entre la segunda y tercera semana de septiembre (2ª a 3ª Semana de recirculación) para la tubería con agua residual.

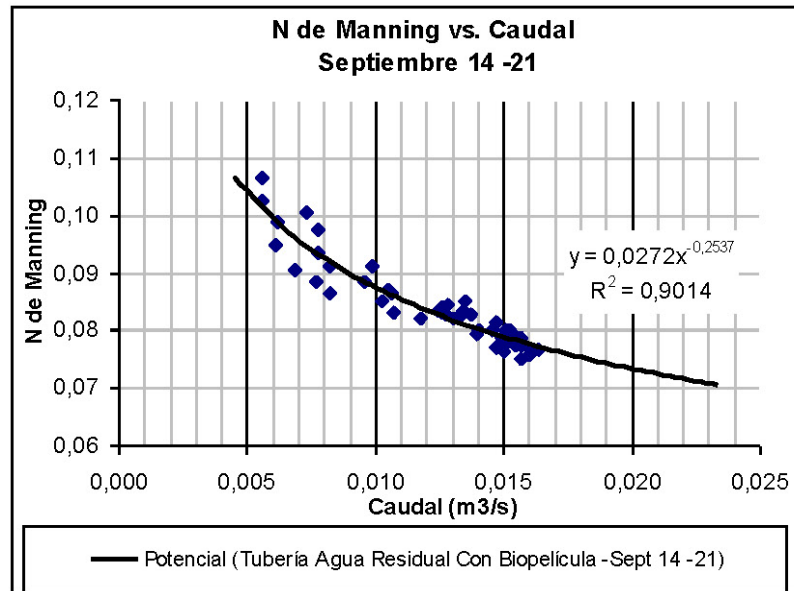


Figura 6.8. Variación del n de Manning con respecto al caudal- Septiembre 14-21

Esta regresión se comparó con la regresión obtenida para la tubería sin biopelícula (tubería de referencia), como se muestra en la siguiente figura:

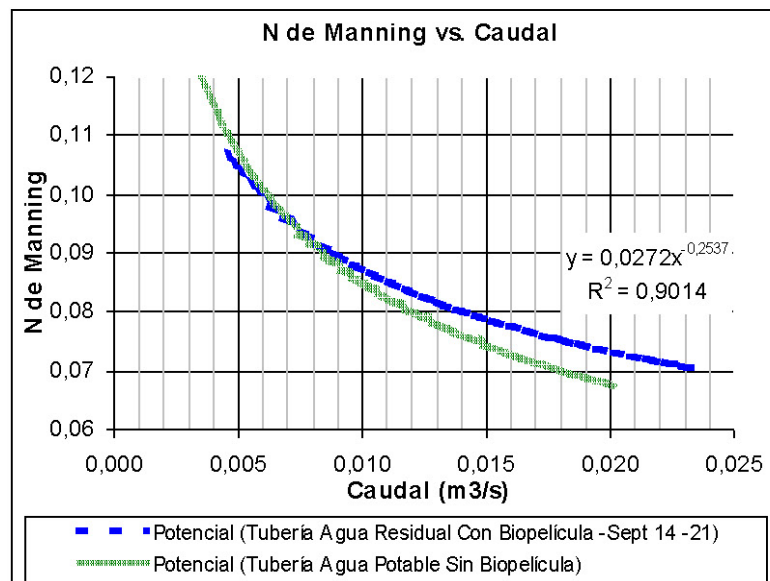


Figura 6.9 –Variación del n de Manning con respecto al Caudal Tubería Agua Residual (14 al 21 de Septiembre) vs. Tubería Agua Potable

Se aprecia que la mayoría de los coeficientes de la 2ª semana de recirculación son ligeramente superiores a los obtenidos en la tubería sin biopelícula (ver tabla 6.1).

Tabla 6.1. Comparación resultados 2ª semana de recirculación vs. Tubería sin biopelícula

Q (m ³ /s)	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013	0,015	0,017	0,019
Agua Residual	0,1043	0,0958	0,0899	0,0854	0,0819	0,0789	0,0765	0,0743
Agua Potable	0,1068	0,0956	0,0881	0,0824	0,0781	0,0745	0,0715	0,0689

Una explicación a este fenómeno es que en la etapa inicial de crecimiento de la biopelícula, esta presenta un crecimiento irregular el cual genera un leve incremento en la rugosidad de la tubería.

6.2.3 Resultados del mes de octubre

Los resultados de las pruebas del mes de octubre se subdividieron en dos. A continuación se muestran los resultados de la primera mitad del mes de octubre:

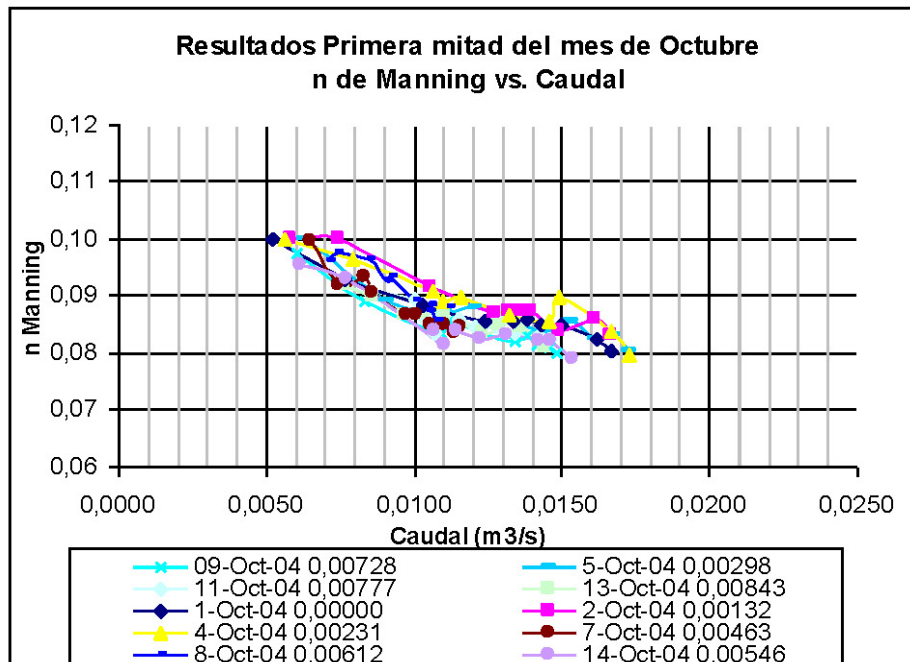


Figura 6.10 –Variación del n de Manning con respecto al Caudal Tubería Agua Residual – Octubre 1º-14

A primera vista, se puede observar que estas curvas muestran una pendiente menor que las curvas del mes de septiembre, lo que indica que la variación del n de Manning con el caudal se hace menor a medida que transcurre el tiempo, es decir a medida que crece la biopelícula.

Para un análisis más completo y para poder realizar una mejor comparación se realizó una regresión para la semana del 9 al 15 de octubre (5ª semana de recirculación).

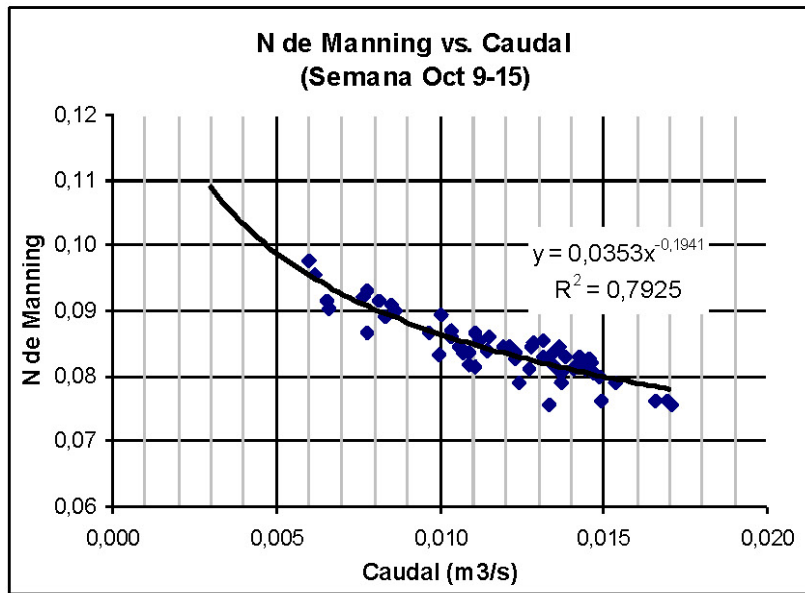


Figura 6.11 –Variación del n de Manning con respecto al Caudal
 Tubería Agua Residual – Semana Octubre 9-15

Se compararon los resultados anteriores con los obtenidos para la segunda y tercera semana de septiembre (2^a y 3^a semana de recirculación) en la siguiente figura:

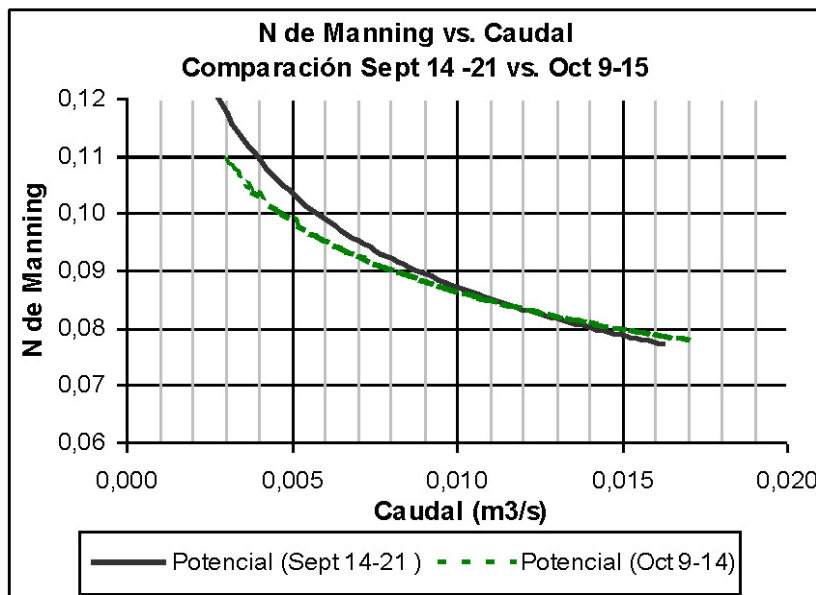


Figura 6.12 –Comparación entre los coeficientes de rugosidad
 2^a-3^a Y 5^a semana de recirculación

Ya para este periodo se puede apreciar una disminución de los coeficientes de rugosidad correspondientes a caudales entre 0.003 y 0.009 m³/s, mientras que para caudales entre 0.009 y 0.015 m³/s los coeficientes han permanecido iguales.

Si se comparan los resultados de la 5^a semana de recirculación con los obtenidos en la tubería de referencia (Agua potable –Sin biopelícula) se tiene los siguiente:

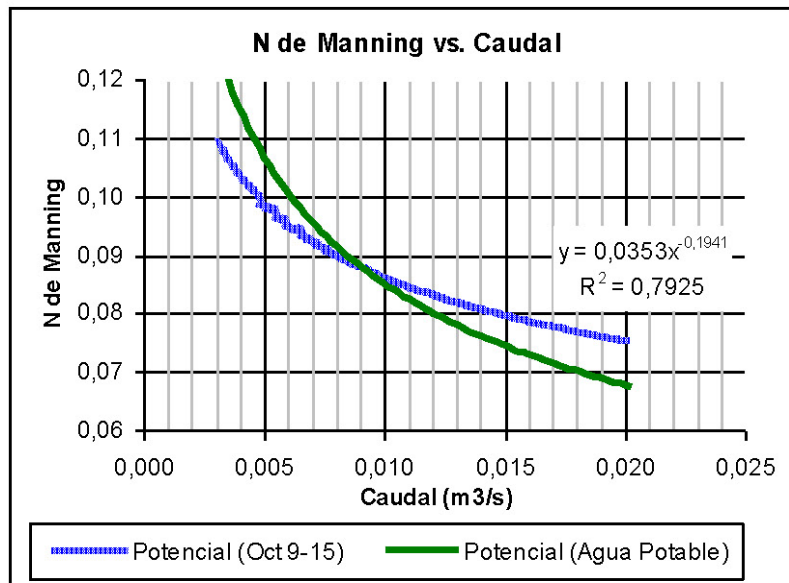


Figura 6.13 –Comparación entre los coeficientes de rugosidad 5^a semana de recirculación vs. tubería agua potable

Ya se aprecia la disminución del n de Manning por causa del crecimiento de la biopelícula para caudales entre 0.003 y 0.009 m³/s, mientras que para caudales mayores a 0.009 m³/s, los coeficientes son superiores para la tubería de agua residual. La siguiente tabla compara estos valores:

Tabla 6.2. Comparación resultados 5^a semana de recirculación vs. tubería agua potable

Q (m ³ /s)	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013	0,015	0,017	0,019
Agua Residual	0,0987	0,0925	0,0881	0,0847	0,0820	0,0798	0,0778	0,0762
Agua Potable	0,1068	0,0956	0,0881	0,0824	0,0781	0,0745	0,0715	0,0689

En cuanto a la segunda mitad del mes de octubre, la figura 6.14. muestra sus resultados:

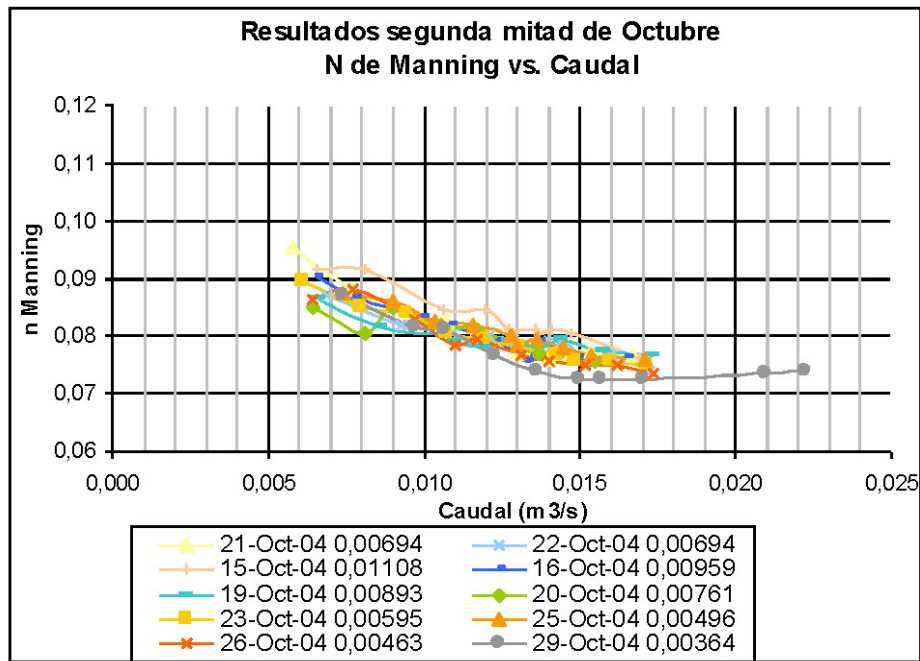


Figura 6.14. Variación del n de Manning con respecto al Caudal Tubería con Agua Residual – Octubre 15-30

Mediante una regresión para la semana del 19 al 25 de octubre, que corresponde a la 7ª semana de recirculación, se aprecian los siguientes resultados:

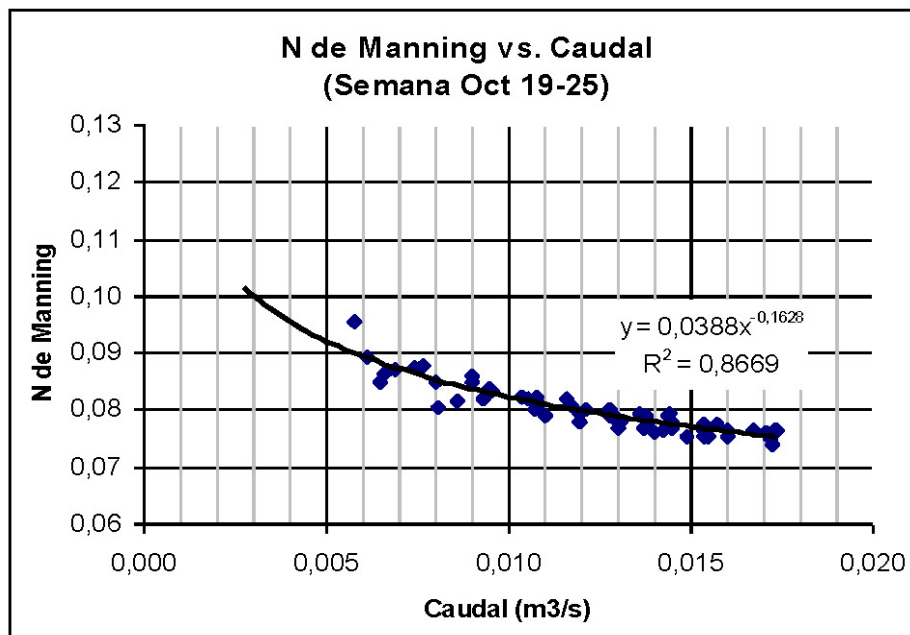
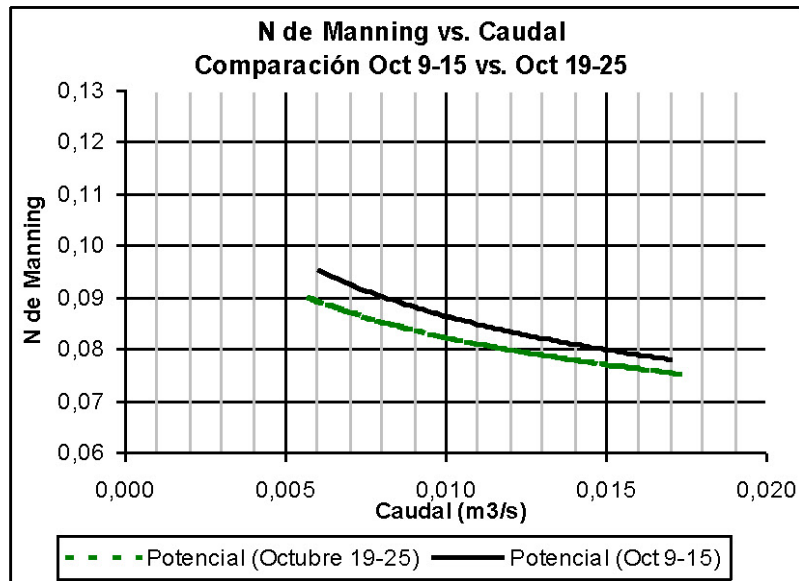


Figura 6.15. Variación del n de Manning con respecto al Caudal Tubería con Agua Residual – Semana Octubre 19-25

Estos resultados a su vez se comparan con los obtenidos en la 5ª semana de recirculación:



*Figura 6.16. Comparación coeficientes de rugosidad.
 5ª. Y 7ª. semana de recirculación*

Se puede que el coeficiente de rugosidad continuó disminuyendo a medida que la biopelícula crecía.

Una comparación como la que se muestra en la figura 6.17. entre los resultados de la 7ª. semana de recirculación y los resultados de la tubería de referencia, permiten establecer que el n de Manning ha disminuido para caudales menores a 0.013 m³/s, mientras que para caudales superiores a este valor, los coeficientes muestran ser ligeramente superiores.

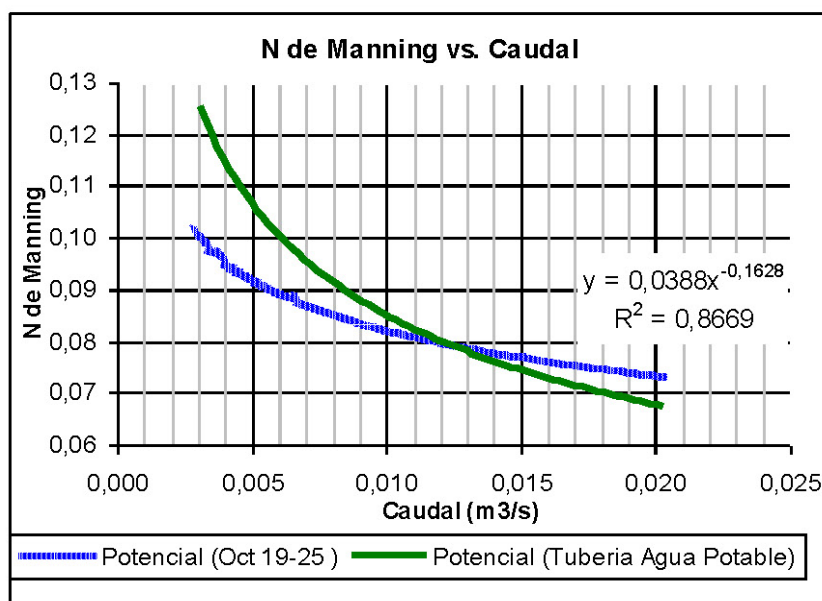


Figura 6.17 –Comparación entre los coeficientes de rugosidad 7ª semana de recirculación vs. tubería agua potable

Esta comparación se puede corroborar mediante la siguiente tabla:

Tabla 6.3. Comparación resultados 7ª semana de recirculación vs. tubería agua potable

Q (m ³ /s)	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013	0,015	0,017	0,019
Agua Residual	0,0919	0,0870	0,0835	0,0809	0,0787	0,0769	0,0753	0,0740
Agua Potable	0,1068	0,0956	0,0881	0,0824	0,0781	0,0745	0,0715	0,0689

El hecho de que el n de Manning haya disminuido para caudales bajos, mientras que para caudales altos haya mostrado ser ligeramente superior a los de la tubería de referencia, tiene sentido, ya que las zonas donde se ha presentado mayor desarrollo de la película biológica, son las zonas hasta donde el nivel de agua llega en periodos de no recirculación. Esta afirmación se complementará en el capítulo de evolución de biopelícula.

6.2.4 Resultados para el mes de noviembre

Para el mes de noviembre, se muestran a continuación los resultados de todas las pruebas realizadas y a su vez la regresión calculada con todos estos datos:

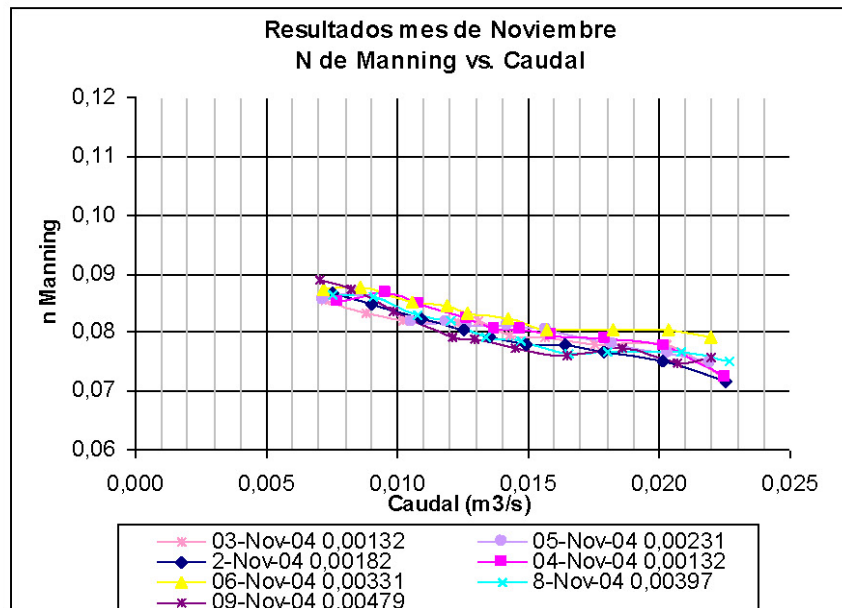


Figura 6.18. Variación del n de Manning con respecto al Caudal
 Tubería Agua Residual – Mes de Noviembre

La primera observación a realizar es que la variación con respecto al caudal disminuye a medida que transcurre el tiempo de recirculación.

Como complemento a la gráfica 6.18. se presenta el resultado de la regresión de estas pruebas en la figura 6.19:

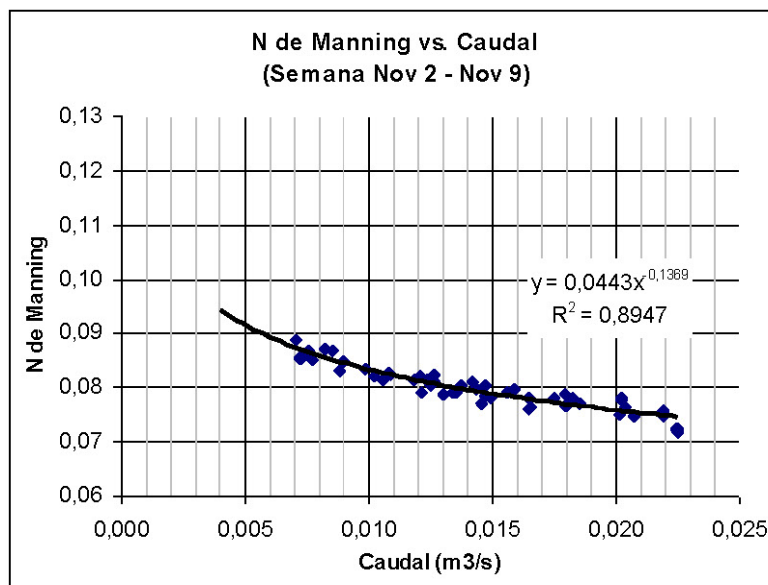


Figura 6.19. Variación del n de Manning con respecto al Caudal
 Tubería Agua Residual – Noviembre 2 - 9

Al comparar los resultados de la última semana de pruebas con los obtenidos en la 7ª semana se puede observar que son muy similares (ver figura 6.20):

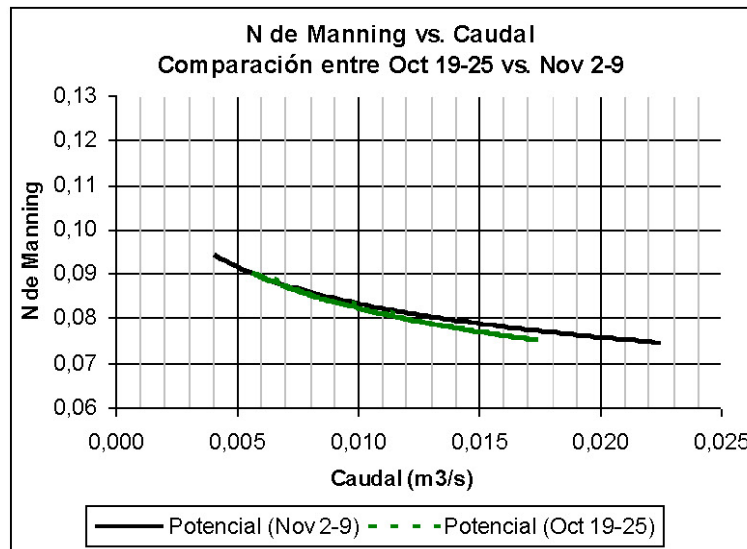


Figura 6.20. Variación del n de Manning con respecto al Caudal 7ª y última semana de recirculación

Una comparación final importante se realiza a continuación entre los resultados de la tubería sin biopelícula y los resultados de la última semana de pruebas (noviembre 2-9) en la tubería con biopelícula, estos darán una idea del efecto que la biopelícula que creció sobre el medio de soporte generó sobre la rugosidad de la tubería versus el efecto generado únicamente por el medio de soporte. Es decir, que se podrá establecer si el crecimiento de la biopelícula aumenta o disminuye el coeficiente de rugosidad.

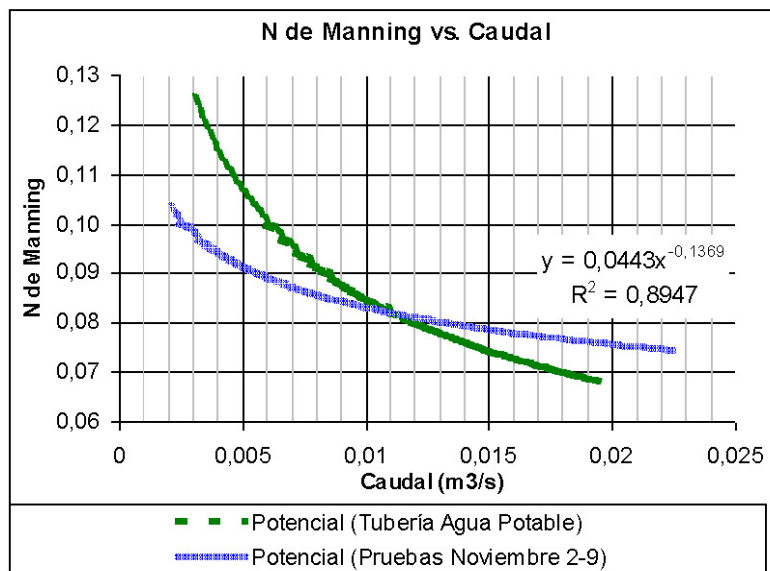


Figura 6.21. Variación del n de Manning con respecto al Caudal Tubería con biopelícula (últimas pruebas) vs. Tubería sin biopelícula

En la siguiente tabla se muestra la comparación de los resultados de noviembre vs. agua potable:

Tabla 6.4. Comparación resultados última semana de recirculación vs. tubería de agua potable

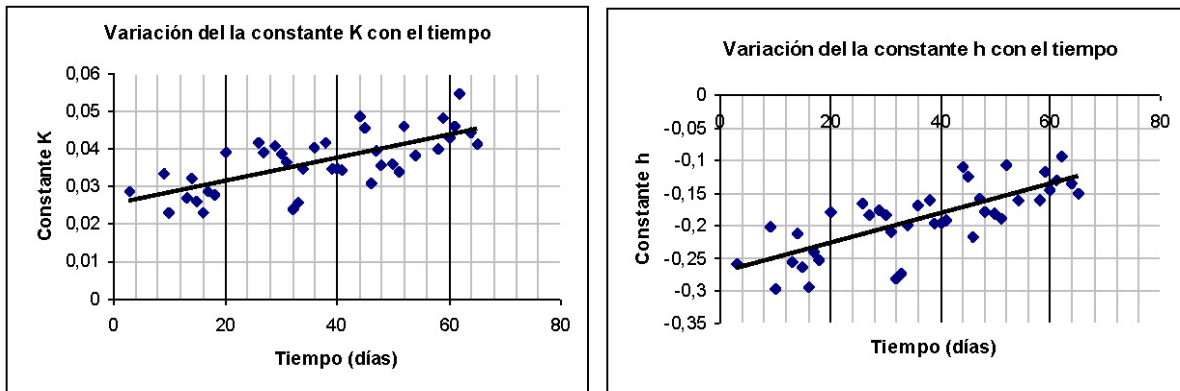
Q (m ³ /s)	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013	0,015	0,017	0,019
Agua Residual	0,0915	0,0874	0,0844	0,0821	0,0803	0,0787	0,0774	0,0762
Agua Potable	0,1068	0,0956	0,0881	0,0824	0,0781	0,0745	0,0715	0,0689

De la figura 6.21 y la tabla 6.4 es claro que: para caudales menores a 0.011 m³/s el n de Manning disminuyó en mayor medida, mientras que para caudales superiores a este valor el n de Manning mostró ser ligeramente superior al generado por el medio de soporte sin biopelícula, una explicación a este fenómeno será desarrollada en el capítulo de evolución de la biopelícula.

Para este tipo de medio de soporte de tamaño considerable, los caudales bajos son más sensibles a la rugosidad y por tanto mostraron en un principio los coeficientes de rugosidad más altos, pero precisamente para estos caudales se notó una disminución del n de Manning, lo que hace pensar que la biopelícula en efecto disminuyó el n de Manning, es decir que, produjo una especie de alisamiento de la superficie interna de la tubería y por tanto disminuyó el efecto del medio de soporte, dicho alisamiento se percibe mejor en caudales bajos.

Una observación adicional es acerca de la gran similitud entre las curvas de la 7ª y última semana de recirculación (figura 6.20) lo que indica que el n de Manning tiende a estabilizarse después de 50 días de recirculación.

Por último, la variación del n de Manning con el caudal haciéndose menor a medida que transcurría el tiempo de recirculación. Esta afirmación se puede hacer debido a que las curvas N-Q mostraban ser menos pendientes a medida que transcurría el tiempo. Como complemento a esta idea se analizaron los coeficientes K y h de las ecuaciones de tipo potencial obtenidas para cada una de las curvas N-Q de la siguiente manera:



Figuras 6.22. y 6.23. Variación de la constante K y h con respecto al tiempo

Se observa una clara tendencia a aumentar tanto los valores de K como los de h , lo cual indica una forma más plana de las curvas N - Q y por tanto implica que el n de Manning varía en gran medida con respecto al caudal al inicio del periodo de recirculación y a medida que transcurre el tiempo, esta variación se hace menor por causa de la biopelícula.

6.3 Análisis del n de Manning con respecto al tiempo de recirculación

Debido a que uno de los objetivos de este trabajo de grado es evaluar el efecto que sobre el n de Manning tiene el tiempo de circulación del agua residual sintética dentro de la tubería, en este capítulo se analiza la variación del n de Manning con respecto al tiempo de recirculación.

Aprovechando las curvas N - Q calculadas en el capítulo anterior, se graficaron en una misma figura las curvas N - Q para diferentes semanas como sigue:

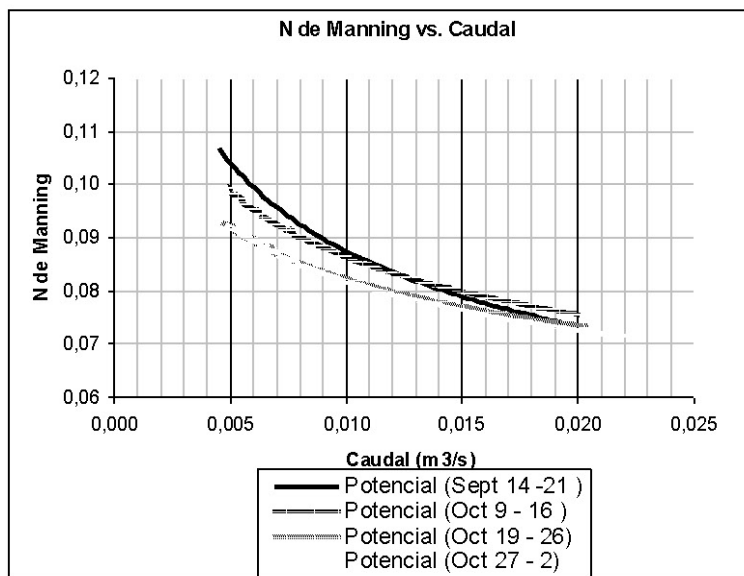


Figura 6.24. Variación del n de Manning con respecto al Caudal y con respecto al tiempo. Tubería con Agua Residual

La figura 6.24. muestra una mayor disminución del n de Manning en el tiempo para caudales inferiores a $0,013 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para caudales mayores esta disminución es poco apreciable. También se puede observar que las curvas de las semanas del 19 – 26 de octubre y del 27 de octubre al 2 de noviembre (últimas semanas de recirculación) son muy similares, lo que lleva a indicar que el n de Manning tiende a estabilizarse después de un periodo de tiempo de aproximadamente 50 días.

Otra forma de analizar el comportamiento del coeficiente de rugosidad en el tiempo es agrupando los resultados por caudales cercanos y graficándolos con respecto a los días de recirculación como se muestra en las siguientes figuras:

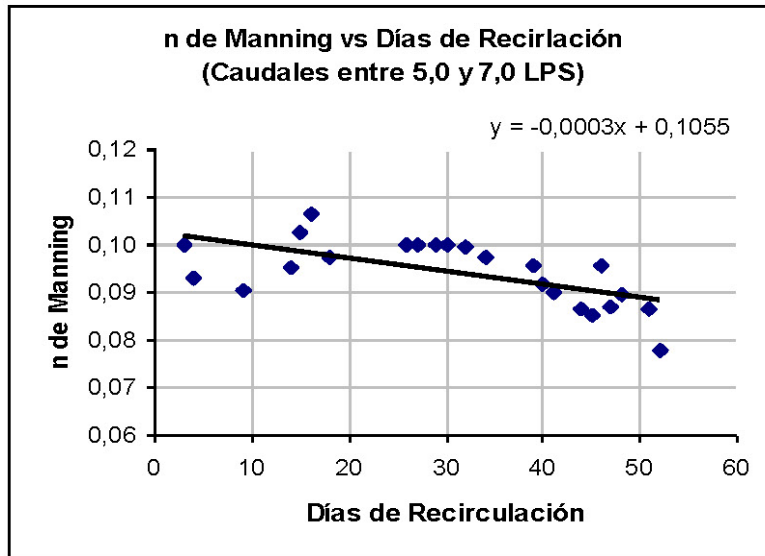


Figura 6.25. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 5 y 7 LPS)

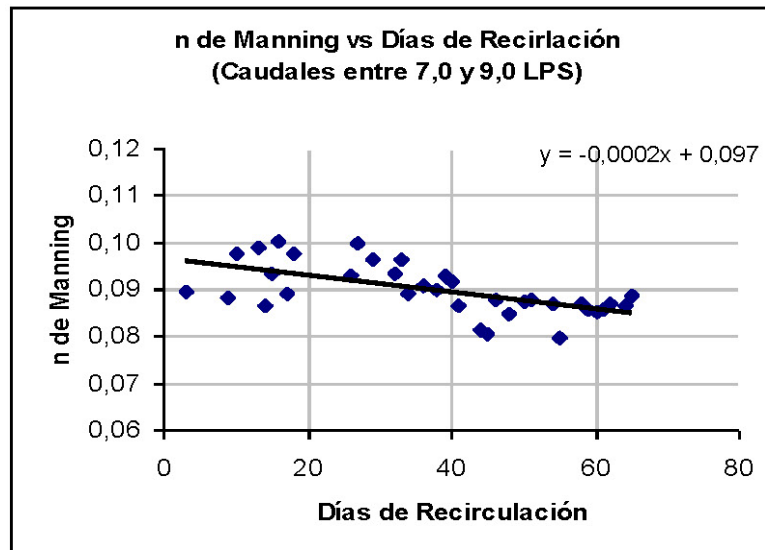


Figura 6.26. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 7 y 9 LPS)

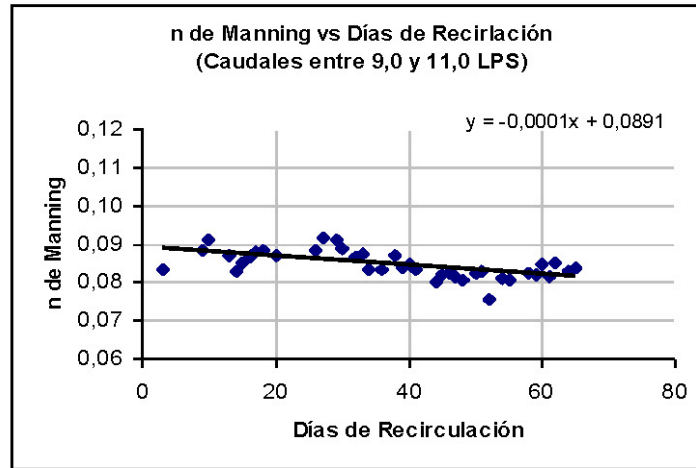


Figura 6.27. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 9 y 11 LPS)

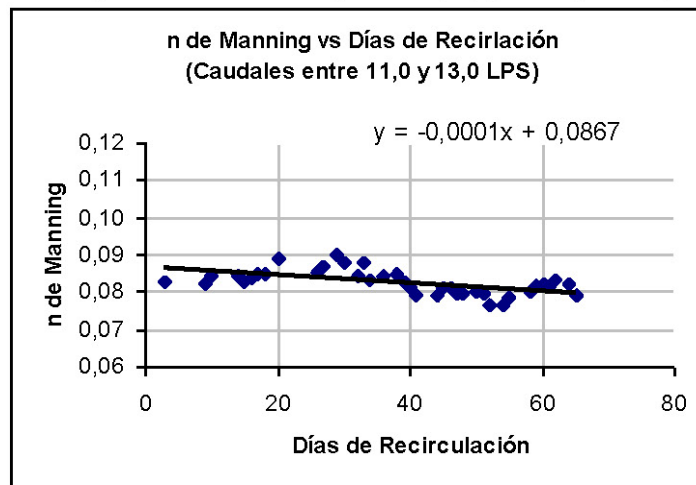


Figura 6.28. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 11 y 13 LPS)

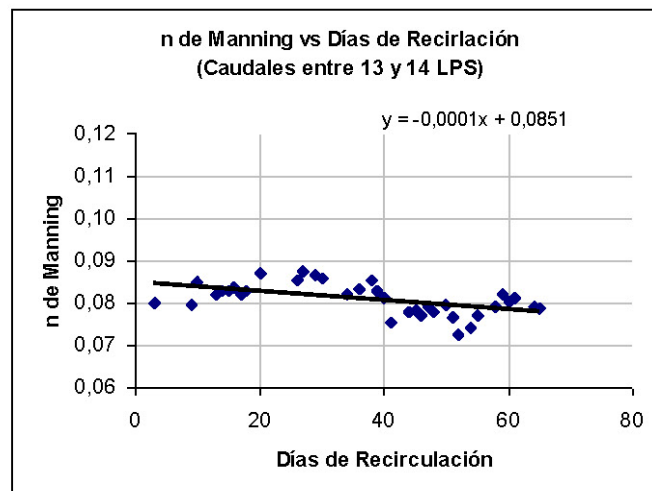


Figura 6.29. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 13 y 14 LPS)

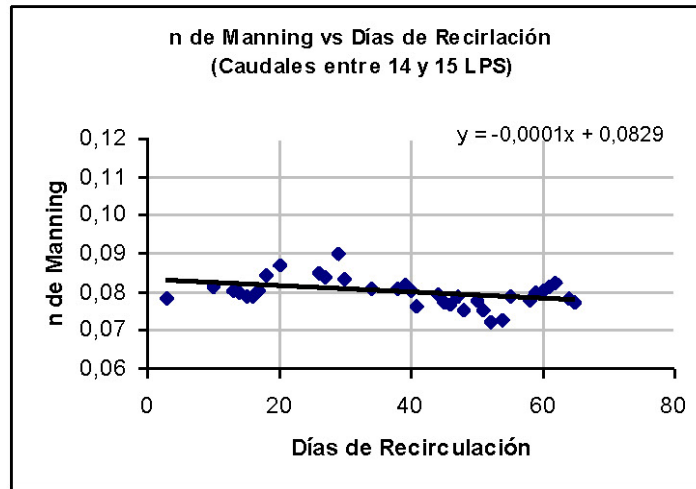


Figura 6.30. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 14 y 15 LPS)

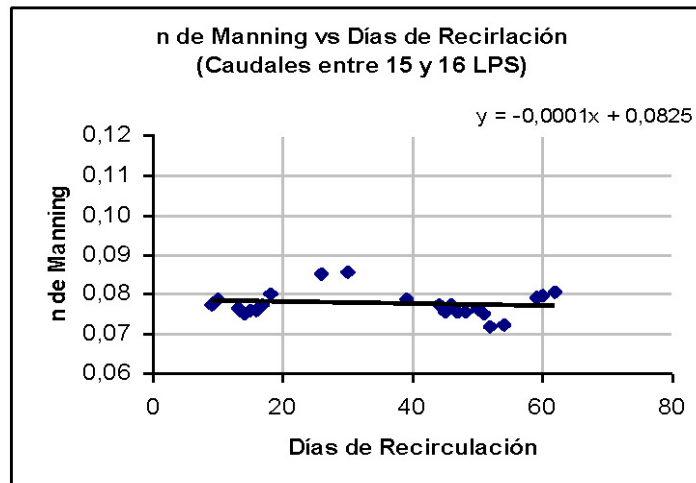


Figura 6.31. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 15 y 16 LPS).

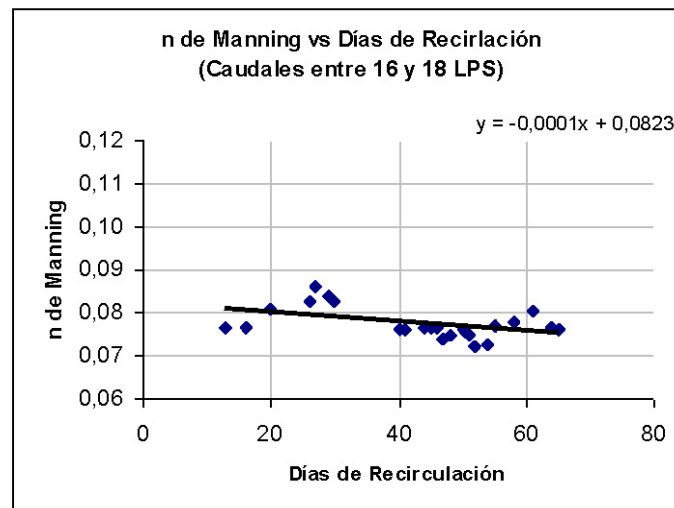


Figura 6.32. N de Manning vs. Tiempo (Q entre 16 y 18 LPS).

Se llega a la misma afirmación, el n de Manning disminuyó en mayor medida para caudales bajos.

En las figuras 6.25 a 6.32 se puede observar una clara tendencia a la disminución del n de Manning a medida que transcurren los días de recirculación, esta disminución se debe al crecimiento de la biopelícula, la cual tiende a ubicarse en las hendiduras que forma el medio de soporte con la superficie interna de la tubería y por tanto, se genera entonces una especie de disminución de la rugosidad causada por el medio de soporte.

Con el propósito de obtener tendencias más claras de comportamiento del coeficiente de rugosidad de Manning a medida que transcurre el tiempo de recirculación y teniendo en cuenta la variación que existe del mismo con respecto al caudal, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Se calcularon todas las ecuaciones de tipo potencial $n = k \cdot Q^{-h}$ para todos los días de pruebas, con su correspondiente coeficiente de ajuste R^2 .
- Se descartaron pruebas con un R^2 inferior a 0.90.
- Se seleccionaron 7 ecuaciones de 7 días de pruebas representativas de todo el periodo de recirculación, es decir, pruebas no consecutivas con los mejores R^2 .
- En una gráfica n vs. tiempo de recirculación se representan las siete ecuaciones elegidas, teniendo en cuenta que cada ecuación representa un día de recirculación y 10 caudales entre $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.023 \text{ m}^3/\text{s}$.

A continuación se presentan las siete ecuaciones elegidas para describir el comportamiento del coeficiente de rugosidad en el tiempo de recirculación:

- | | | |
|------------------|--------------------------------|---------------|
| 1. Septiembre 15 | $n = 0.0232 \cdot Q^{-0.2963}$ | $R^2 = 0.994$ |
| 2. Septiembre 22 | $n = 0.0287 \cdot Q^{-0.2413}$ | $R^2 = 0.961$ |
| 3. Octubre 9 | $n = 0.0349 \cdot Q^{-0.1982}$ | $R^2 = 0.957$ |
| 4. Octubre 16 | $n = 0.0344 \cdot Q^{-0.1908}$ | $R^2 = 0.941$ |
| 5. Octubre 26 | $n = 0.0340 \cdot Q^{-0.1892}$ | $R^2 = 0.936$ |
| 6. Noviembre 2 | $n = 0.0398 \cdot Q^{-0.1604}$ | $R^2 = 0.969$ |
| 7. Noviembre 9 | $n = 0.0415 \cdot Q^{-0.1514}$ | $R^2 = 0.924$ |

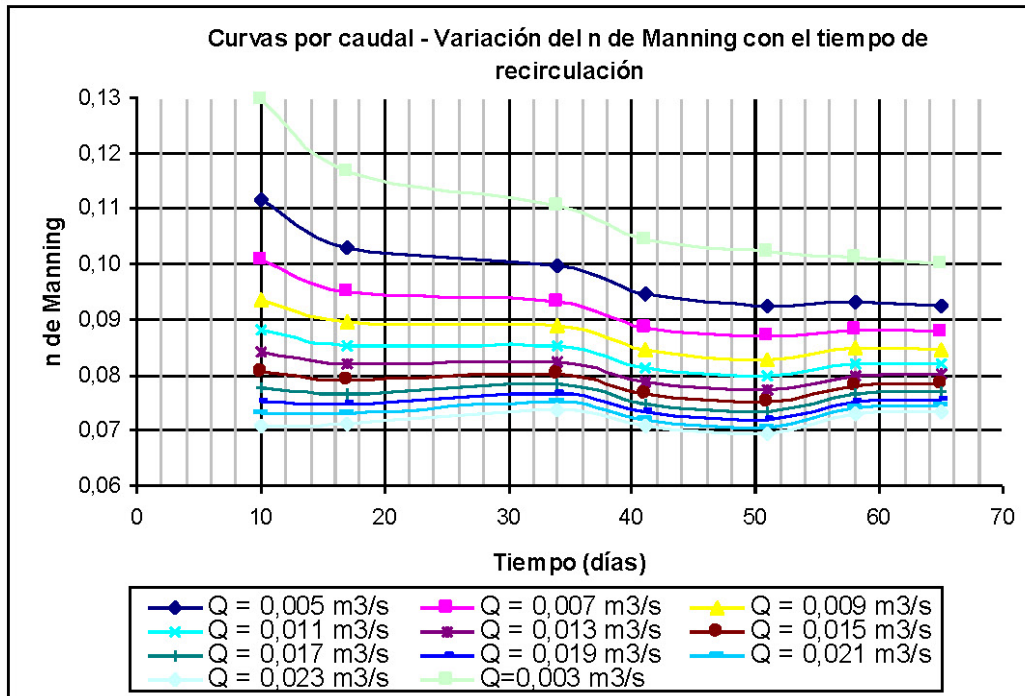


Figura 6.33. Variación del n de Manning con respecto a los días de recirculación

En la figura 6.33 se confirma la afirmación “la disminución del n de Manning fue mayor para caudales menores que para caudales mayores” ya que se puede observar que las curvas que corresponden a caudales de 0.013, 0.015, 0.017, 0.019, 0.021 y 0.023 m³/s permanecen dentro de valores muy similares a pesar del transcurso del tiempo.

Otra observación importante es que a partir del día 50 de recirculación el n de Manning permaneció dentro de los mismos valores, lo que hace pensar en una estabilización del mismo.

6.4 Variación del n de Manning con respecto a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$

Otra forma interesante de análisis del coeficiente de rugosidad consiste en mostrar su variación con respecto a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$, ya que $n = \frac{A}{Q} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$ lo que quiere decir que n es inversamente proporcional a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$.

La siguientes gráficas muestran dicha variación:

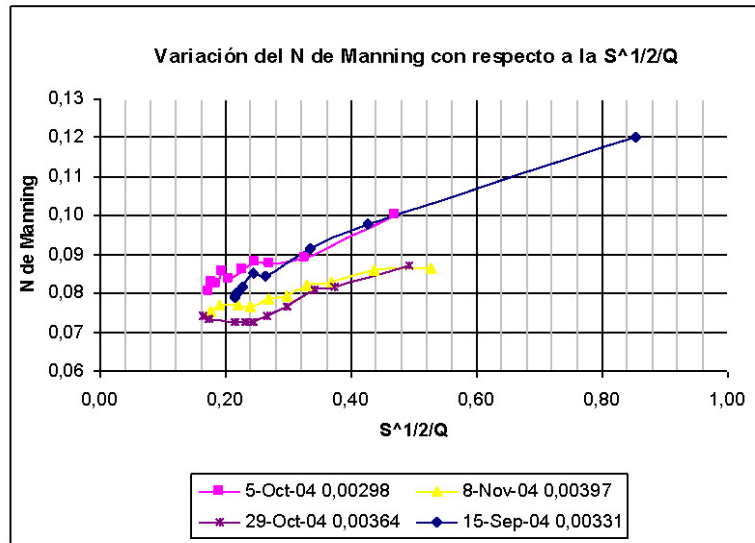


Figura 6.34. Variación del n de Maning con respecto a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$

Estos días de prueba fueron seleccionados por presentar pendientes similares y mediante dichos resultados se puede observar nuevamente la disminución del coeficiente de rugosidad a medida que pasa el tiempo de recirculación.

Se calcularon las regresiones de estos puntos y dieron como resultado lo siguiente:

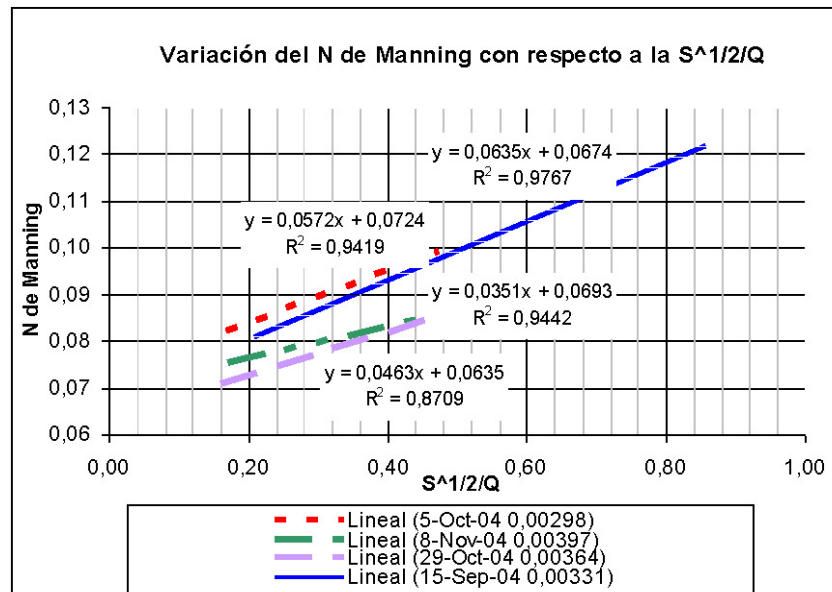


Figura 6.35. Relación entre el coeficiente de rugosidad y $\frac{\sqrt{S}}{Q}$

La relación entre el n de Manning y $\frac{\sqrt{S}}{Q}$ es claramente lineal. Se graficaron otros días de pruebas con pendientes similares y los resultados fueron los mismos, el coeficiente de rugosidad disminuye con el tiempo y tiene una relación lineal con respecto a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$.

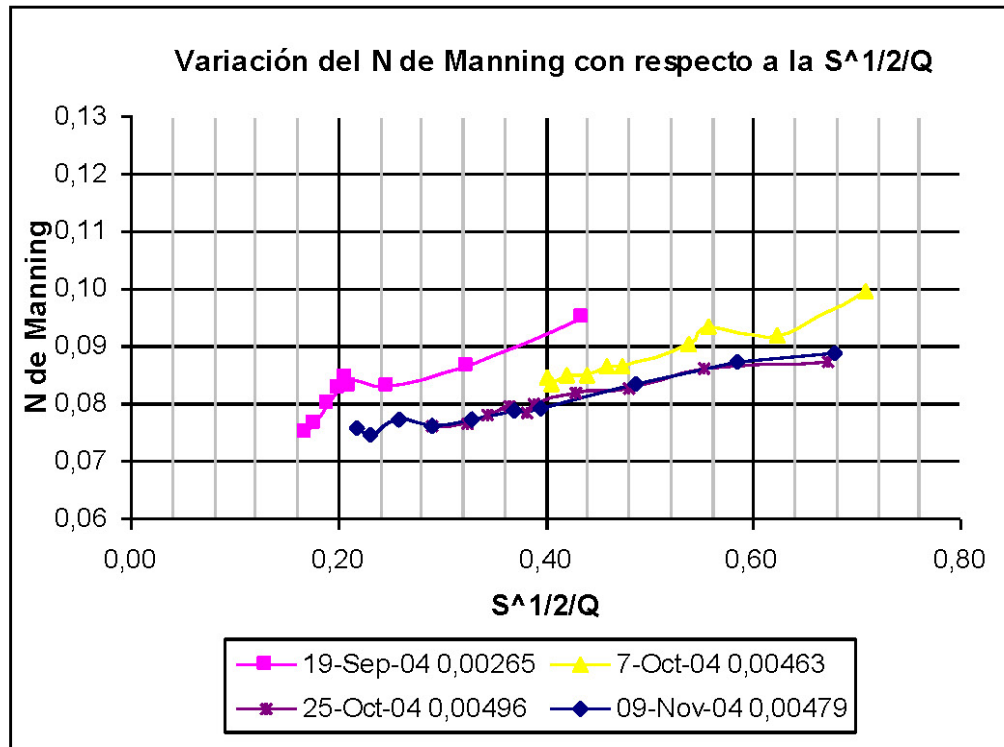


Figura 6.36. Variación del n de Manning con respecto a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$

6.5 Evolución de la biopelícula y su efecto sobre el n de Manning

A continuación se muestran fotografías del crecimiento mostrado por la biopelícula sobre el medio de soporte:

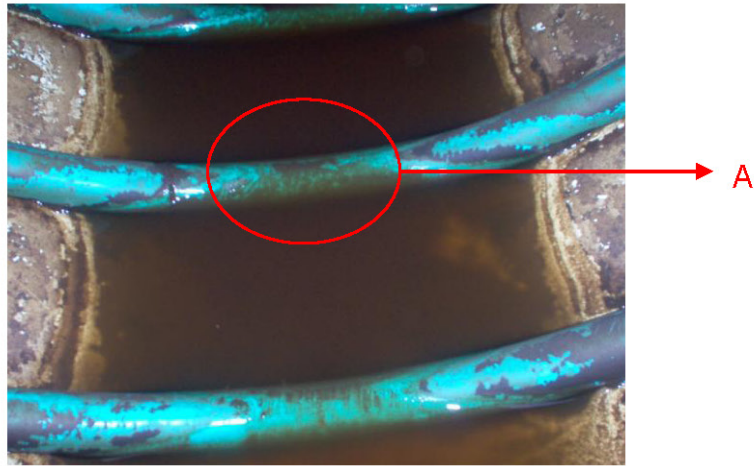
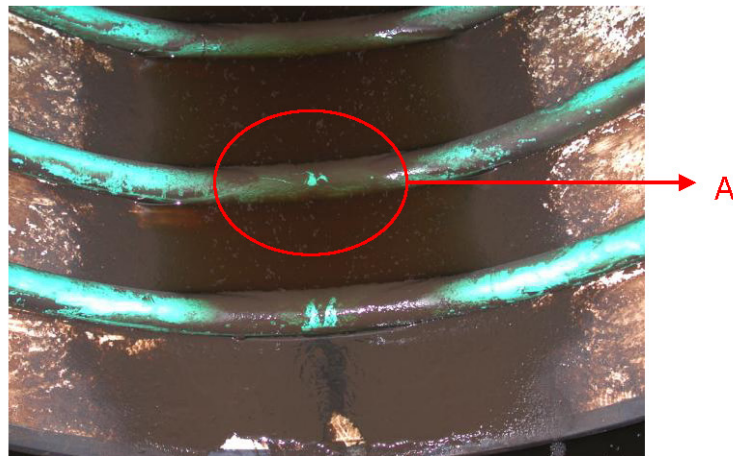


Figura 6.37. Crecimiento biopelícula – Día 38 de recirculación



Fotografía 6.38. Crecimiento biopelícula – Día 60 de recirculación

Para el día 38 de recirculación (figura 6.37) se puede ver que en la zona A hay menor formación de biopelícula que la que se puede observar en la misma zona para el día 67 de recirculación.

La siguiente fotografía muestra zonas preferenciales de crecimiento de biopelícula debido al almacenamiento que se genera entre los anillos utilizados como medio de soporte.



Figura 6.39. Crecimiento biopelícula – Día 38 de recirculación

La zona A es la zona límite hasta donde se almacena el agua en periodos sin flujo y es la zona hasta la cual crece en mayor medida la biopelícula. En esta zona se produjo un mayor desarrollo y crecimiento de la biopelícula lo que generó el efecto de alisamiento de la superficie y por lo tanto disminuyó el coeficiente de rugosidad para los caudales bajos.

La zona B es la zona límite hasta donde llegan caudales máximos cuando el agua residual se está recirculando. En periodos de no recirculación los microorganismos que se habían adherido, multiplicado y colonizado en estas zonas dejan de recibir el alimento contenido en el agua residual y no llegan a la etapa de producción de exopolisacáridos, los cuales previenen la desecación celular y atrapan los nutrientes necesarios para su reproducción, es decir que la capa formada en esta zona no es una capa regular, y genera rugosidades ligeramente mayores a las generadas por el medio de soporte.

Efectivamente en esta zona, los valores de n de Manning mostraron ser ligeramente superiores a los obtenidos en la tubería sin biopelícula y esto tiene mucho sentido ya que en esta zona la biopelícula no pudo crecer de forma regular y por lo tanto se genera una rugosidad adicional a la generada por el medio de soporte.

La existencia de las zonas A y B permiten comprender la razón por la cual el n de Manning disminuyó a medida que transcurrió el tiempo para caudales menores a $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que para caudales superiores a este valor el n de Manning al final del periodo de recirculación terminó siendo un poco superior al obtenido en la tubería sin biopelícula.

En las fotografías siguientes se muestra la evolución cronológica de la biopelícula en uno de los muestreadores utilizados para su medición:



Figura 6.40. Día 13 de recirculación



Figura 6.41. Día 39 de recirculación



Figura 6.42. Día 51 de recirculación

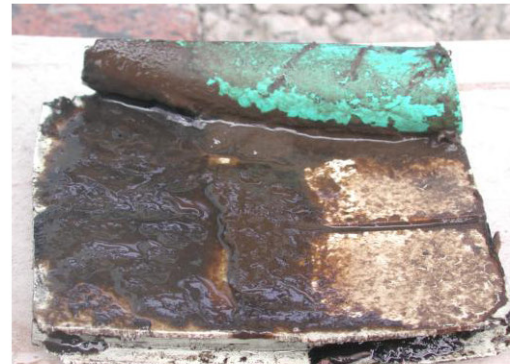


Figura 6.43. Día 59 de recirculación

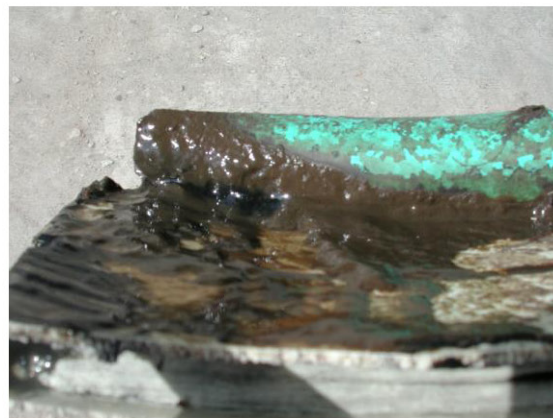


Figura 6.44. Día 71 de recirculación

En las fotografías anteriores, se aprecia que las zonas de crecimiento preferencial de la biopelícula son aquellas donde queda protegida de los esfuerzos cortantes generados por el flujo. La biopelícula no cubre toda el área del muestreador, ni tampoco cubre toda el área del medio de soporte, debido a que esta crece en mayor medida en la zona de almacenamiento de agua residual.

Adicionalmente, es claro que la biopelícula que creció entre los anillos tiene un mayor espesor que la biopelícula que creció sobre los mismos, la razón es el almacenamiento generado entre los anillos, el cual favorece el crecimiento de la biopelícula en esa zona, mientras que las zonas del medio de soporte que no quedaban sumergidas presentaron un menor crecimiento.

Por último, con respecto a estas fotografías y teniendo en cuenta los resultados del capítulo 6.2., a partir del día 34 de recirculación se comenzó a notar la disminución del n de Manning para caudales bajos. En la figura 6.41 se observa el cambio de aspecto de la biopelícula comparado con la figura 6.40., este cambio lleva a pensar que para este periodo de tiempo la biopelícula había adquirido una consistencia más lisa y regular causante de la disminución del n de Manning.

El crecimiento de la biopelícula fue analizado mediante la medición de su densidad y de su peso en gramos. En primer lugar se muestra el crecimiento de la biopelícula en gramos vs. el tiempo de recirculación:

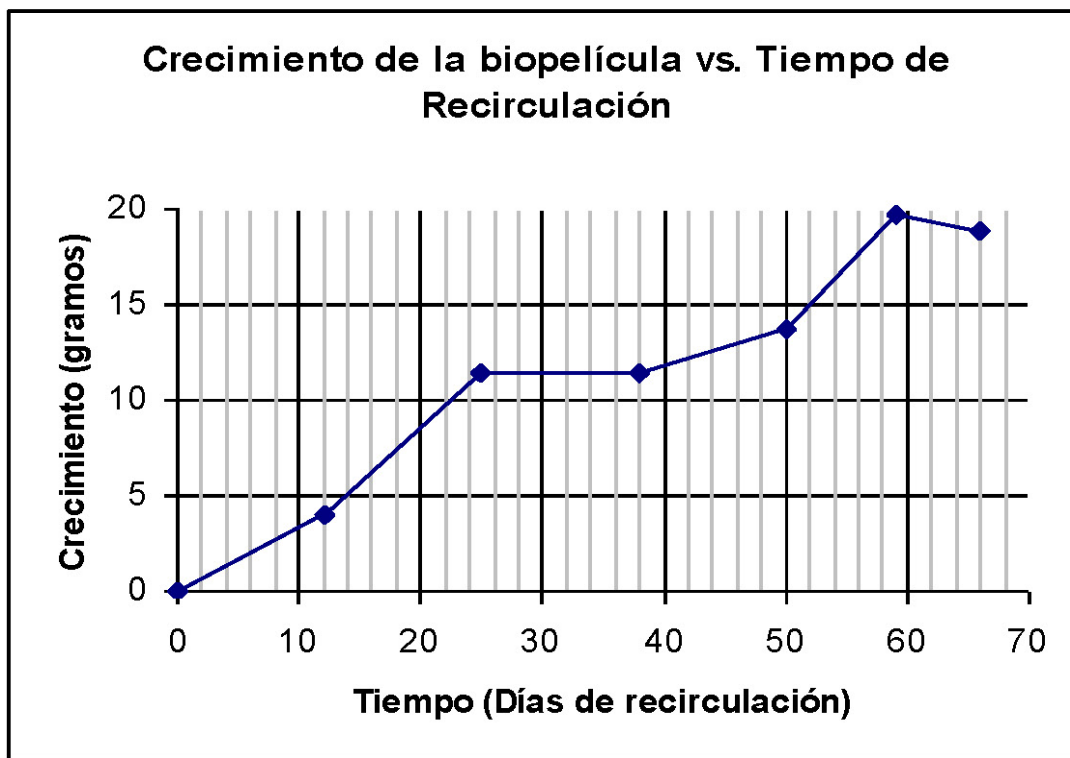


Figura 6.45. Crecimiento de la biopelícula con respecto al tiempo de recirculación

La figura anterior muestra que en general la biopelícula creció durante todo el periodo de recirculación, a excepción del periodo comprendido entre los días 59 y 66 donde hubo una pequeña disminución del crecimiento. Para el día 38 de recirculación y un peso de 11.5

gramos aproximadamente, el n de Manning cae por debajo del valor obtenido en la tubería sin biopelícula para caudales menores a 11 LPS.

El peso máximo e ideal alcanzado fue de 19.75 gramos y fue obtenido después de 59 días de recirculación.

La evolución del crecimiento de la biopelícula en comparación con el comportamiento del n de Manning en el tiempo se muestran en la siguiente figura:

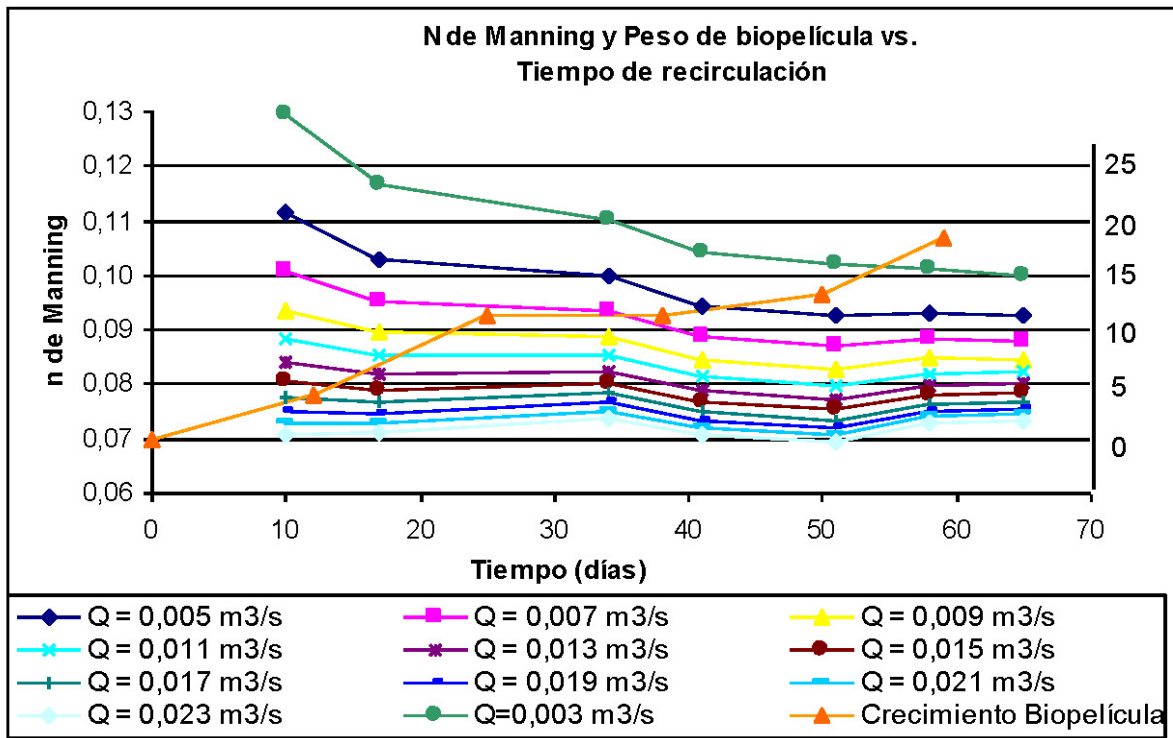


Figura 6.46. Evolución de la biopelícula y comportamiento del n de Manning con respecto al tiempo de recirculación

En la figura 6.46 se aprecia que a medida que aumenta el peso de la biopelícula, el n de Manning disminuye. Entre los días 25 y 35 de recirculación, la biopelícula mostró una estabilización en su crecimiento, pero posteriormente continuó su crecimiento.

Así mismo la siguiente figura muestra la variación de la densidad de la biopelícula con respecto al tiempo de recirculación:

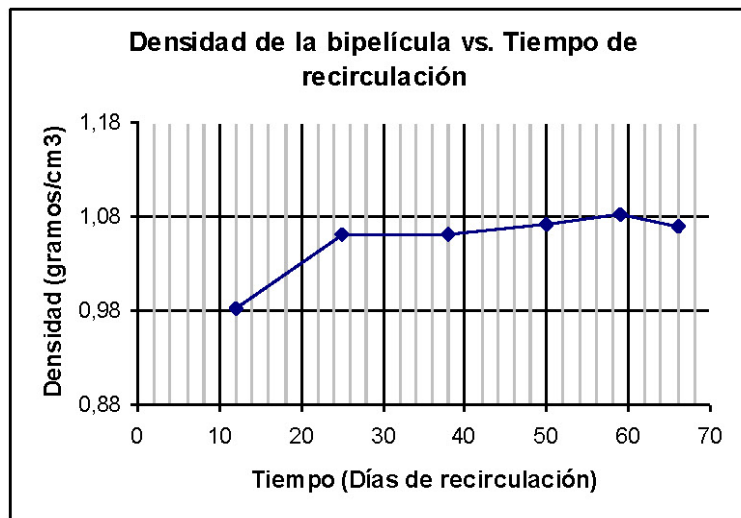


Figura 6.47. Densidad de la biopelícula con respecto al tiempo de recirculación

La densidad fue muy cercana a 1 gr/cm^3 lo cual tiene sentido ya que la biopelícula está hecha en un 97% de agua, así que su densidad debe aproximarse a este valor.

A pesar de que el área cubierta por la biopelícula no presentó una forma muy regular, se realizó una medición aproximada de la misma utilizando un calibrador y a continuación se muestran los gramos de biopelícula por centímetro cuadrado que se obtuvieron en cada medición:

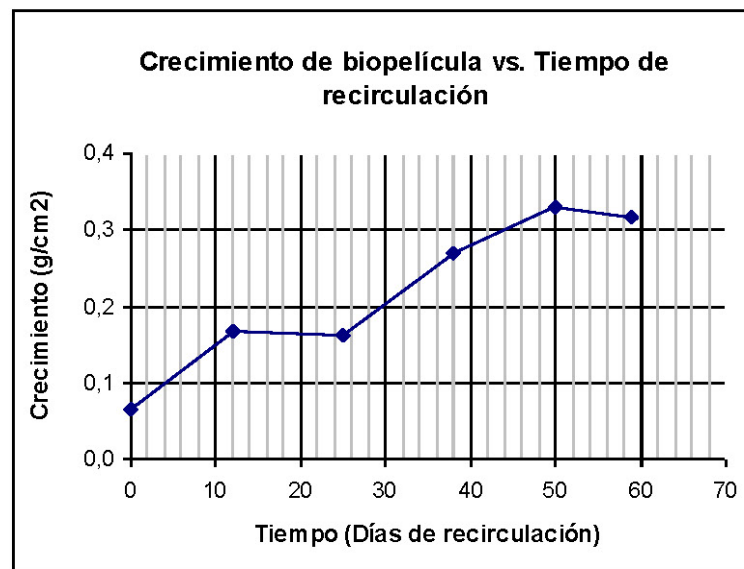


Figura 6.48. Gramos de biopelícula / cm² vs. tiempo

Así mismo se calculó un espesor aproximado de biopelícula, de forma que fuera comparable con los espesores obtenidos en la tesis “Efecto hidráulico de Estructuras de Soporte de Biopelícula en Tuberías de Alcantarillado” realizada por Luz Angela Otero en Biopelículas en Alcantarillados: Efectos de Medios de Soporte sobre la Capacidad Hidráulica de Sistemas de Alcantarillado (MIC 2005-I-34)

2003. En dicha oportunidad se utilizaron como medios de soporte un geodren enrollado entre perfiles de 2 mm de espesor y un geotextil de 3 mm de espesor.

El procedimiento de cálculo del espesor de la biopelícula fue el siguiente:

- $\rho_{biopelícula} = \frac{Masa}{Volumen}$ y $Volumen = \text{área}_{muestreado} \times \text{espesor}_{biopelícula} \Rightarrow$
- $Masa = \rho \times \text{área} \times \text{espesor}$ y por tanto $\text{espesor} = \frac{Masa}{\text{Área} \times \rho}$

Los espesores obtenidos se pueden observar en la siguiente figura:

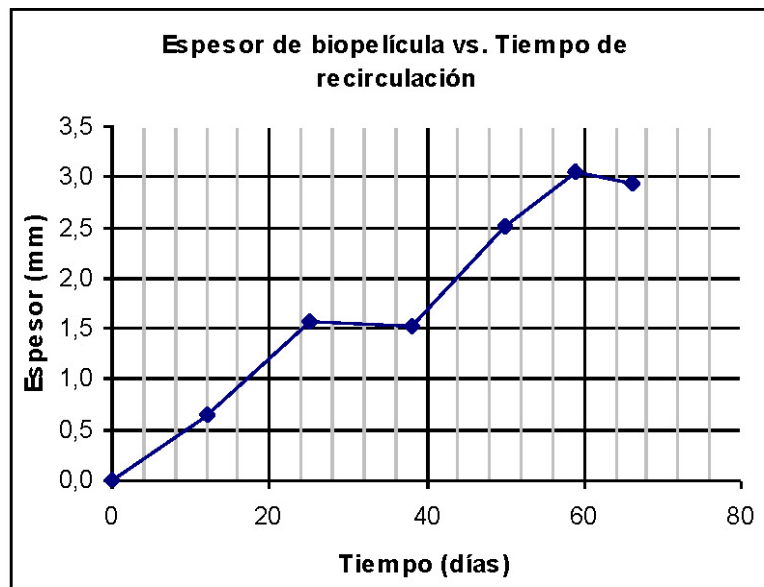


Figura 6.49. Espesor aproximado de biopelícula vs. tiempo de recirculación

El espesor conseguido al final del periodo de recirculación para la tubería con geodren enrollado fue 4.89 mm, mientras que para la tubería conformada por geotextil fue de 7.5 mm. Si se comparan estos espesores con los 3.0 mm obtenidos con los anillos de tubería PVC de 3/4 “ se aprecia el menor crecimiento alcanzado sobre este medio de soporte.

6.6 Análisis de los parámetros de calidad del agua

Tanto el pH y la DQO son parámetros que miden las condiciones en que se encuentra el agua residual y se realizó un seguimiento cada quince días de estos parámetros teniendo en cuenta que el pH ideal para favorecer la formación de la biopelícula debe estar entre 6.0 y

8.0. y teniendo en cuenta que existe una estrecha relación entre la DQO y el crecimiento de la biopelícula.

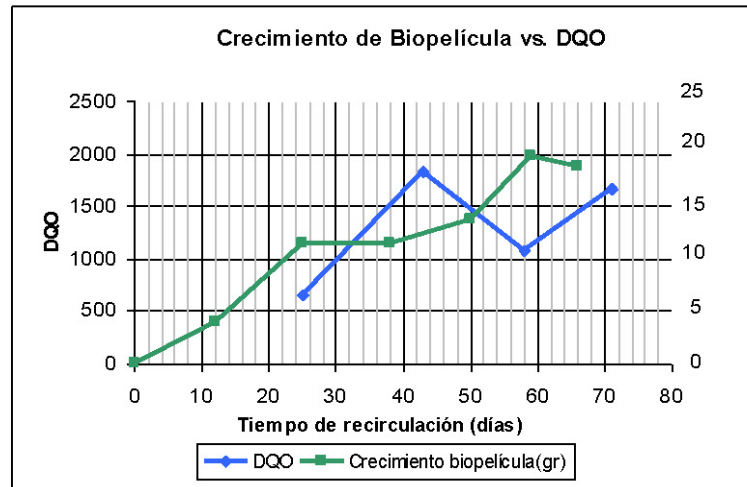


Figura 6.50. Crecimiento de biopelícula vs. DQO

En la figura 6.50. se observa que cuanto mayor es el crecimiento de la biopelícula, menor es la DQO y viceversa, cuando la DQO es alta el crecimiento no es tan pronunciado y tiene sentido ya que la DQO es una medida de la materia orgánica. Los microorganismos de la biopelícula son los que consumen la materia orgánica para su crecimiento, así que cuando hay alto crecimiento hay menor cantidad de materia orgánica y viceversa.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para DQO y pH:

Tabla 6.4. Resultados DQO y pH –Agua Residual

Fecha	DQO	pH	Detalles
Oct 4-04 (día 28)	645,816	7,4	Última adición de lodo, melaza y nutrientes en Septiembre 28
Oct 20-04 (día 43)	1829,812	8,1	Última adición de lodo, melaza y nutrientes en Octubre 13
Nov 3-04 (día 58)	1071,32	7,7	Última adición de lodo, melaza y nutrientes en Octubre 26
Nov 16-04 (día 71)	1660,45	7,6	Última adición de lodo, melaza y nutrientes en Noviembre 9

6.7 Comparación del efecto de medios de soporte sobre la capacidad hidráulica

Para tener una idea del efecto de este medio de soporte sobre la capacidad hidráulica de la tubería, se recolectaron algunos resultados experimentales de la tesis “Efecto hidráulico de Estructuras de Soporte de Biopelícula en Tuberías de Alcantarillado” para la tubería que utilizó como medio de soporte un geodren enrollado y del estudio “Determinación del coeficiente de Manning para una tubería de alcantarillado Novaloc” que no utilizó ningún medio de soporte.

El propósito de esta recolección de datos es comparar las capacidades hidráulicas alcanzadas teniendo conocimiento del coeficiente de Manning y las profundidades de flujo. Para las tuberías con medio de soporte se recolectaron los datos del final del periodo de recirculación.

Se recolectaron los siguientes datos para tres de las pruebas realizadas en la tubería con geodren y la tubería con anillos PVC de $\frac{3}{4}$ ”:

Tabla 6.5. Comparación resultados tubería con geodren vs. tubería con anillos

Prueba 1		
Medio de soporte	Geodren	Anillos
So	0,00178	0,00182
n	0,0217	0,0868
Y (cm)	9,36-12,72	9,20-13,20
Q (LPS)	25,1	9
Prueba 2		
Medio de soporte	Geodren	Anillos
So	0,00383	0,00397
n	0,0217	0,086
Y (cm)	9,22-12,19	9,80-12,60
Q (LPS)	25,1	9,1
Prueba 3		
Medio de soporte	Geodren	Anillos
So	0,00164	0,00132
n	0,0227	0,00868
Y (cm)	10,18-13,65	10,5 - 14,0
Q (LPS)	24,9	9,6

El caudal que pasa para las mismas condiciones de pendiente, rugosidad y profundidad de flujo, es 2.8 veces menor para la tubería con anillos de PVC de $\frac{3}{4}$ “. Así que el efecto de

reducción de la capacidad hidráulica es significativo para la tubería con anillos de tubería PVC como medio de soporte.

Si se comparan los mismos datos entre la tubería con anillos de PVC y la tubería sin medio de soporte se tiene los siguientes resultados:

Tabla 6.6. Comparación resultados tubería sin medio de soporte vs. tubería con anillos PVC

Prueba 1		
Medio de soporte	Ninguno	Anillos
So	0,0054	0,0048
n	0,0117	0,0888
Y (cm)	9,0 - 12,0	9,0 - 11,0
Q (LPS)	42	7
Prueba 2		
Medio de soporte	Ninguno	Anillos
So	0,0014	0,00132
n	0,0105	0,0852
Y (cm)	9,0 - 15,0	9,00-12,56
Q (LPS)	44,1	7,7

El caudal obtenido para la tubería con anillos fue 5.7 veces menor. Así que la capacidad hidráulica de la tubería NOVALOC sufre un gran efecto por la presencia de este tipo de medio de soporte.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La variación del n de Manning con respecto a las pendientes medidas en las pruebas experimentales es mínima.
- La variación del n de Manning con respecto al caudal es de tipo potencial $n = KQ^{-h}$ y a medida que transcurre el tiempo de recirculación K y h aumentan, lo que indica una menor variación.
- En la etapa inicial de crecimiento de la biopelícula, esta genera un leve incremento del coeficiente de rugosidad debido a la falta de uniformidad de la misma.
- A partir de la quinta semana y hasta la última, los coeficientes de Manning disminuyeron aún más que las primeras semanas para caudales inferiores a 11 LPS, mientras que para caudales superiores a este valor resultaron ser ligeramente superiores a los coeficientes medidos en la tubería sin biopelícula (tubería de referencia). La razón de este fenómeno consiste en que las zonas de mayor crecimiento de biopelícula corresponden a las zonas donde había almacenada agua residual y este hecho hace que para caudales bajos el efecto de disminución de la rugosidad sea más significativo que para caudales altos. La biopelícula formada por encima del nivel de almacenamiento, no es uniforme y por tanto genera un leve incremento en la rugosidad cuando se trata de caudales mayores a 11 LPS.
- A partir del día 50 de recirculación el n de Manning comenzó a estabilizarse a pesar del continuo crecimiento de la biopelícula.
- La variación del coeficiente de rugosidad con respecto a $\frac{\sqrt{S}}{Q}$ es de tipo lineal.
- La biopelícula mostró tener zonas preferenciales de mayor crecimiento, específicamente aquella generada por el almacenamiento de agua residual. Las zonas que quedaban expuestas durante los periodos de no recirculación, sufrieron un efecto de desecación de la biopelícula y por tanto se incrementó levemente la rugosidad en esas zonas.
- La alimentación semanal con lodo espesado, nutrientes y melaza garantizó el crecimiento de la película biológica durante todo el periodo de recirculación. Este hecho es positivo desde el punto de vista del tratamiento de agua residual dentro de la tubería, ya que se ha comprobado que la biopelícula formada dentro de las tuberías de alcantarillado juega un papel muy importante dentro de los cambios de composición del agua residual.

- El n de Manning es claramente dependiente del crecimiento de la biopelícula, ya que a mayor cantidad de biopelícula, menor coeficiente de rugosidad, lo que demuestra el efecto de alisamiento que genera la biopelícula.
- El espesor máximo de biopelícula estimado para este tipo de medio de soporte fue de aproximadamente 3.0 mm, mientras que para medios de soporte como el geodren y el geotextil utilizados en tesis anteriores fue de 4.89 mm y 7.5 mm respectivamente, lo cual permite afirmar que la capacidad de fijación de biomasa fue menor para este tipo de medio de soporte comparándola con los demás medios utilizados.
- La capacidad hidráulica de la tubería cuyo medio de soporte consta de anillos de tubería PVC se ve disminuida 5.7 veces con respecto a una tubería sin medio de soporte. Así mismo, la capacidad hidráulica se ve disminuida 2.8 veces al compararla con la capacidad de la tubería cuyo medio de soporte consta de un geodren. Según este resultado el efecto del medio de soporte es una alta reducción de la capacidad hidráulica de la tubería.
- A pesar de que este medio de soporte favoreció el crecimiento de biopelícula, la reducción de la capacidad hidráulica de la tubería por la presencia del mismo es significativa.
- Para lograr una mayor reducción del coeficiente de rugosidad y por tanto una mejor capacidad hidráulica de la tubería, sería necesario un crecimiento mucho mayor de la biopelícula.
- En la medida en que el medio de soporte no quede expuesto (sin agua residual) durante los periodos de no recirculación, se generará mayor crecimiento de la biopelícula formada sobre el, ya que las zonas que quedan expuestas tienen más posibilidades de generar desecación de la biopelícula. Por lo tanto, es importante que el medio de soporte se mantenga húmedo.
- Este tipo de medio de soporte genera un gran efecto hidráulico en la tubería de alcantarillado, representado por un alto coeficiente de rugosidad y una disminución de la capacidad hidráulica de la misma.
- A pesar de su facilidad de instalación sobre la superficie interna de la tubería de alcantarillado, este tipo de medio de soporte no mostró ser tan eficiente como los probados en estudios anteriores.
- Se recomienda utilizar un medio de soporte que genere un menor efecto sobre el comportamiento hidráulico de la tubería, un medio de soporte de menor tamaño, mejor configuración estructural (cobertura total del perímetro mojado de la tubería) y que permita mantener húmeda la mayor cantidad de biopelícula.

- Una alternativa recomendable para garantizar el crecimiento de biopelícula en la mayor parte del perímetro mojado de la tubería, es la realización de las pruebas en un modelo de flujo continuo, ya que este permitía garantizar la alimentación continua de los microorganismos de la biopelícula.

8 BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ, ROBERTO VIDAL. ASPÉ, ESTRELLA. URRUTIA, HOMERO. Colonization de soportes por bacterias sulfato reductoras y metanogénicas en reactores anaerobios tipo Filtro. Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias Biológicas y Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.
- APILANEZ I., GUTIERREZ A., DIAZ M., Effect of surface materials on initial biofilm development. Bioresource Technology. Vol. 66. 1998
- CATEDRA PAVCO. Efecto de la película biológica sobre el coeficiente de Manning en tuberías de alcantarillado NOVALOC. Universidad de los Andes. Julio 2002.
- CATEDRA PAVCO. Efecto hidráulico de estructuras de soporte de película biológica sobre el coeficiente de Manning en tuberías de alcantarillado NOVALOC. Universidad de los Andes. Diciembre 2003.
- HVITVED-JACOBSEN, T. VOLLERTSEN, J. MATOS, J.S. "The sewer as a bioreactor – a dry weather approach". Water Science and Technology. Vol.45. No. 3. 2002. Páginas 11-24.
- HVITVED-JACOBSEN, THORKILD. Sewer Proceses - Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks. 2002.
- LÓPEZ CUALLA, RICARDO ALFREDO. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia. 1995.
- METCALF & EDDY, INC. Ingeniería de Aguas Residuales. Mc. Graw – Hill. 1995.
- MARJAKA, IGNATIUS WAHYU., MIYANAGA, KATSUTOSHI. TANJI, YASUNORI. UNNO, HAJIME. "Augmentation of self – purification capacity of sewer pipe, by immobilizing microbes on the pipe surface". Biochemical Engineering Journal. October 2002.
- MOURATO, S. ALMEIDA, M. MATOS, J. HVITVED-JACOBSEN, T. Modelling in-sewer pollutant degradation proceses in the Costa do Estoril sewer system. Sewer Processes and Networks. Paris, France 2002.
- OROZCO, ALVARO. Bioingeniería de Aguas Residuales. 2003.
- OTERO, LUZ ANGELA. Efecto hidráulico de estructuras de soporte de biopelículas en sistemas de alcantarillado. Tesis de Grado. Febrero 2003.
- ROCHER, V. AZIMI, S. MOILLERON, R. CHEBBO, G. Biofilm in combined sewers: wet weather pollution source and/or dry weather pollution indicator?. Water Science and Technology. Vol.47. No. 4 .2003. Pág. 35-43.
- THE CENTER OF BIOFILM. EDSTROM INDUSTRIES INC. Biofilms. Consulta: Abril 5, 6 de 2004: <http://www.erc.montana.edu.> "Biofilms", <http://www.edstrom.com>
- TJANDRAATMADJA, GRACE F. BURN, STEWART. EISWIRTH, MATTHIAS. "In-line Pretreatment of Sewage through a New Green Technique: the Drausty Method". IWA World Water Congress. 2002.
- VEN TE CHOW. Hidráulica de canales abiertos. Mc.Graw-Hill. 1994.
- VOLLERTSEN, J. HVITVED -JACOBSEN, T. UJANG, Z. TALIB, S.A. Integrated design of sewers and water treatment plants. Water Science and Technology. Vol.46. No. 9. 2002. Páginas 11-20.

ANEXO 1- TABLA DE DISTANCIAS ENTRE PIEZÓMETROS

DISTANCIAS ENTRE PIEZÓMETROS TUBERÍA DE AGUA RESIDUAL

Piezómetros		Distancia Acumulada (m)	Distancia entre Piezómetros
0	1	0,181	
1	2	0,308	0,127
2	3	0,442	0,134
3	4	0,56	0,118
4	5	0,844	0,284
5	6	0,966	0,122
6	7	1,124	0,158
7	8	1,258	0,134
8	9	1,386	0,128
9	10	1,654	0,268
10	11	1,924	0,27
11	12	2,186	0,262
12	13	2,456	0,27
13	14	2,728	0,272
14	15	2,998	0,27
15	16	3,224	0,226
16	17	3,476	0,252
17	18	3,74	0,264
18	19	4,242	0,502
19	20	4,516	0,274
20	21	4,774	0,258
21	22	5,034	0,26
22	23	5,304	0,27
23	24	5,566	0,262
24	25	5,824	0,258
25	26	6,086	0,262

DISTANCIAS ENTRE PIEZÓMETROS TUBERÍA DE AGUA POTABLE

Piezómetros		Distancia Acumulada (m)	Distancia entre Piezómetros
0	1	0,150	
1	2	0,266	0,116
2	3	0,386	0,120
3	4	0,520	0,134
4	5	0,650	0,130
5	6	0,776	0,126
6	7	0,906	0,130
7	8	1,036	0,130
8	9	1,156	0,120
9	10	1,296	0,140
10	11	1,424	0,128
11	12	1,560	0,136
12	13	1,824	0,264
13	14	2,104	0,280
14	15	2,366	0,262
15	16	2,626	0,260
16	17	2,890	0,264
17	18	3,170	0,280
18	19	3,430	0,260
19	20	3,690	0,260
20	21	3,956	0,266
21	22	4,198	0,242
22	23	4,454	0,256
23	24	4,712	0,258
24	25	4,964	0,252
25	26	5,210	0,246
26	27	5,464	0,254
27	28	5,716	0,252
28	29	5,956	0,240
29	30	6,200	0,244
30	31	6,450	0,250
31	32	6,580	0,130
32	33	6,836	0,256
33	34	7,190	0,354
34	35	7,584	0,394
35	36	8,006	0,422
36	37	8,316	0,310
37	38	8,730	0,414
38	39	9,206	0,476
39	40	9,620	0,414
40	41	10,000	0,380
41	42	10,406	0,406
42	43	10,680	0,274
43	44	11,070	0,390

ANEXO 2 – DATOS PRUEBAS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS

ANEXO 3 – GRÁFICAS DE PERFILES EXPERIMENTALES Y PERFILES TEÓRICOS