

Diseño de un sistema piloto para el estudio de la corrosión del material de tubería y su contribución en el deterioro de la calidad del agua potable

Design of a model system for the study of corrosion of pipe material and its contribution in deterioration of drinking water quality

John Fredy Rios^a, Jorge Andrés Calderón^{a}, Félix Echeverría^a, Gustavo Peñuela^b*

^aGrupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia, Lab 330, Torre 2, SIU, Calle 62 N° 52-59, Medellín, Colombia.

^bGrupo de Diagnóstico y Control de la Contaminación, Universidad de Antioquia, Lab 232, Torre 2, SIU, Calle 62 N° 52-59, Medellín, Colombia.

(Recibido el 28 de marzo de 2007. Aceptado el 9 de noviembre de 2007)

Resumen

Los sistemas de distribución pueden afectar la calidad del agua potable debido a las condiciones de la tubería y a la operación del sistema. Algunos parámetros son sensibles a la variación durante la distribución como: el cloro residual, pH, color y turbiedad, debido a que el material de la tubería puede presentar deterioro en estos sistemas a causa de la corrosividad del agua. Los diversos estudios realizados sobre el tema han empleado tanto sistemas reales como dispositivos de laboratorio para la realización de los ensayos. Entre los dispositivos más empleados actualmente, se reporta el uso del sistema piloto de distribución por las ventajas que ofrece y su flexibilidad en el diseño. Para definir las características de diseño de un sistema piloto de distribución se hizo una revisión de la literatura. El sistema se empleará en el estudio de la interacción entre el líquido y la pared de tubería. Se utilizarán materiales metálicos usados en sistemas de distribución secundarios, con el fin de determinar el ataque a la superficie interna de las tuberías y las causas de formación de depósitos sobre ellas, así como identificar los efectos de esta interacción en la calidad del agua.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 66 16, fax: + 57 + 4 + 219 64 02, correo electrónico: jacalder@udea.edu.co (J. Calderón).

----- *Palabras clave:* sistema piloto de distribución, agua potable, corrosión en tubería, biopelícula.

Abstract

Distribution systems can affect drinking water quality because pipe conditions and system operation. Some parameters like residual chlorine, pH, color and turbidity can be modified during the distribution, because pipe material can show deterioration in these systems by the water corrosivity. Several studies about this topic had used both real system and laboratory equipment for performing of tests. The most used apparatus nowadays is the model distribution system; it has several advantages like flexibility and easiness for design. A revision in journals is used for defining the design characteristics of model distribution system. It will be used for studying the interaction between the water and the pipe wall. Metallic materials used in secondary distribution system will be used in this study with the purpose of determining the attack to the inner surface of pipes and the causes of deposits formed on them; such as identifying the effects of this interaction in water quality.

----- *Keywords:* model distribution system, drinking water, pipe corrosion, biofilm.

Introducción

Las empresas que prestan el servicio de agua potable son conscientes de la variación que puede sufrir la calidad del agua luego de abandonar la planta de tratamiento, principalmente ocasionado por las condiciones físicas del sistema de distribución debido al tiempo de funcionamiento de la infraestructura y las condiciones de operación hidráulicas. Son grandes los esfuerzos y los estudios realizados para dar solución a los problemas presentados en la distribución del agua que permitan disminuir el efecto negativo ocasionado a la calidad del agua. Las investigaciones realizadas al respecto son diversas y se enfocan en estudiar los cambios en la calidad del agua [1], las variables que favorecen o inhiben el deterioro de la tubería del sistema de distribución y su correlación con la pérdida de material [2, 3, 4], la formación de biopelícula en la superficie de la tubería [5,6], la presencia de microorganismos en el agua potable [7], entre otros. Entre los dispositivos empleados en los estudios se puede mencionar: el dispositivo de Robbins, de fácil uso, empleado con algunas modificaciones para analizar el crecimiento de microorganismos [8,9] y monitorear el desarrollo en biopelículas de bacterias causantes de problemas de corrosión en líneas de tubería [10]; el dispositivo Pederson empleado con ligeras modificaciones por Momba para estudiar la formación de biopelícula en diferentes materiales metálicos y no metálicos [11,12]; el sistema de rototorque o reactor anular, el cual se compone de dos cilindros, uno exterior estacionario y uno interno rotatorio que permite variar la velocidad de rotación para obtener el esfuerzo cortante en la pared más externa, correspondiente a la condición de flujo que se desea simular. Este sistema es bastante usado en investigaciones para estudiar la biopelícula en las cuales se ubican láminas del material de estudio en la cara externa del cilindro interno [13] o probetas del material en el cilindro externo [14]. Adicionalmente se han analizado los cambios en los parámetros del agua tomando muestras del agua a la salida [15]. Sin embargo, la relación área superficial–volumen en el sistema rototorque es mayor que en las tuberías por

lo cual el tiempo de retención en estos sistemas corresponde a mayores tiempos en un sistema de distribución real [16]. Por último, se tiene el sistema piloto de distribución, muy empleado en las investigaciones recientes debido a que permite obtener condiciones más reales de una red de distribución de agua potable, debido a que la hidráulica y la relación superficie/volumen son más similares [17].

Sistema piloto de distribución

Los sistemas pilotos de distribución tienen varias características que permiten su utilización en los estudios actuales y son los reactores más comúnmente usados para estudios de corrosión. Los mismos se han empleado para simular sistemas de distribución de agua, ya sea solos o en conjunto con cupones de ensayo o acoplados con investigaciones de planta piloto. Entre sus ventajas se tienen: las variables que afectan la corrosión pueden ser sistemáticamente controladas y evaluadas; suministran datos acerca de la velocidad de corrosión del material, efectos de fluctuaciones o modificaciones de calidad del agua o tratamientos alternativos. Igualmente, se pueden emplear para estudios de recrecimiento microbiológico, análisis de biopelícula, problemas de calidad de agua, entre otros. Eisnor [18] ha presentado una amplia revisión bibliográfica de sistemas pilotos de distribución, en la cual se especifican las variables del sistema en tres grupos, a saber: las características físicas (material, diámetro y longitud de la sección de ensayo), las hidrodinámicas (configuración de flujo, tiempo de retención, velocidad de flujo y tiempo de estancación) y las técnicas que aseguren la calidad (medición de la calidad del agua y duración del estudio). Adicionalmente, se presenta una compilación y discusión de los valores empleados en diferentes estudios, lo cual permite una buena orientación para el diseño y montaje de un futuro sistema. En los sistemas pilotos de distribución es importante tener como base los objetivos del estudio para la definición de las características físicas, las condiciones hidráulicas, la duración del ensayo, los análisis del agua y el material de tubería. A continuación se presentan algunos aspectos a

tener en cuenta en sistemas pilotos utilizados en diferentes estudios, clasificándolos en las tres categorías mencionadas.

Características físicas

Considera esencialmente las variables relacionadas con la sección de ensayo empleada en el estudio como: el material, la longitud, el diámetro y el tramo de tubería. Los materiales seleccionados en los estudios normalmente son los utilizados en el sistema de distribución hacia el cual va dirigido, pueden ser tuberías de PVC, polietileno, hierro dúctil con recubrimiento interno de cemento, fundición de hierro, acero al carbono, acero galvanizado o cobre. En varios casos las tuberías utilizadas en el piloto provienen de un sistema de distribución real [19]. La longitud de la tubería no presenta un valor estándar. Cuando se tiene flujo de agua a través del sistema con un solo paso, se emplean sistemas que tienen una longitud de tubería de varios metros, con el fin de incrementar el tiempo de contacto entre el agua y la pared de tubería. Para sistemas donde la velocidad de flujo utilizada es muy baja, la longitud de tubería es aproximadamente de 30 m [19,20], aunque se han reportado sistemas con longitudes de hasta 100 m [21]. Para sistemas en los cuales se tiene recirculación del agua, la longitud de tubería empleada normalmente es de 1,5 m [22,23], pero se han empleado sistemas con longitudes de hasta 27 m [24]. Adicionalmente, se han utilizado tramos cortos de tubería para analizar la formación de depósitos [25] o la acumulación de biopelícula a lo largo del ensayo [26], los cuales presentan una longitud menor a 0,30 m.

El diámetro de la tubería empleado en los estudios no presenta un valor único, sin embargo reportes de la literatura presentan líneas de tubería con diámetros inferiores a 0,15 m e incluso aun menores a 0,025 m de diámetro para sistemas que evalúan materiales empleados en redes de edificaciones. Algunos estudios han empleado sistemas que se componen de varios materiales provenientes de líneas de sistemas de distribución, empleando tuberías de 0,15 m de diámetro, excepto en el caso del acero galvanizado con 0,05

m de diámetro [19,20]. Para el caso de tubería de cobre, el diámetro reportado ha sido menor, alrededor de 0,001 m [21]. La tubería evaluada puede conformarse de varios tramos cortos unidos continuamente o la exposición de tramos largos. Los tramos cortos de tubería han sido empleados cuando se desea evaluar la superficie interna del material de tubería, especialmente deterioro y formación de biopelícula. Percival [27] evaluó el desarrollo de biopelícula en la superficie de acero inoxidable. En este estudio la sección de ensayo se compone de pequeños tramos de tubería unidos continuamente, permitiendo insertar y evaluar el material de estudio. Por otro lado, los tramos largos se emplean para evaluar las variaciones en los parámetros del agua y la disolución de especies desde la superficie interna del material de tubería, mediante un frecuente muestreo del agua.

Condiciones hidráulicas

Dentro de las condiciones hidráulicas del sistema se consideran: la velocidad de flujo, el tiempo de retención y la configuración de flujo del fluido en la sección de ensayo. La velocidad de flujo empleada en los estudios se elige según las condiciones a simular. Cuando el objetivo del estudio contempla condiciones de flujo normal, la velocidad de flujo es 0,3 m/s. Si se trata del análisis en zonas con estancamiento o en puntos terminales, normalmente la velocidad de flujo empleada es muy inferior a este valor, alrededor de 0,042 m/s [22,28] o menor.

El tiempo de retención es bastante importante ya que algunos parámetros del agua cambian apreciablemente con pocas horas de retención como es el caso del oxígeno disuelto y del cloro residual. Sin embargo, para simular condiciones de puntos muertos algunos estudios han empleado tiempos de retención de varios días [29]. Se ha reportado que en sistemas reales la disminución de estos es demasiado alta luego de 1,5 días; no obstante, en sistemas con recirculación se ha reportado una disminución en el oxígeno disuelto bastante elevada luego de 8 horas [22]. Específicamente el tiempo debe ser elegido basado en el mayor tiempo de retención del agua en el sistema

de estudio. Para la recirculación de flujo de agua que presente una velocidad específica, se ha reportado el tiempo de retención a su equivalente en longitud de tubería [24].

La configuración de flujo del sistema presenta dos opciones, flujo de agua con un solo paso o con recirculación. El tiempo de retención en un sistema piloto de distribución depende directamente de la velocidad del agua cuando opera con un solo paso del fluido a través de este, es decir una renovación continua de agua. Las dos variables se logran independizar cuando el sistema se opera con recirculación del agua. En diferentes investigaciones se han empleado ambas configuraciones de flujo. Tang [20] utilizó un sistema piloto para evaluar el efecto de la mezcla de aguas de diferentes fuentes sobre la calidad del agua en un sistema de distribución. El sistema empleado presentó un solo paso del flujo a través de éste, por lo cual la velocidad de flujo empleada fue muy baja para permitir un tiempo de retención suficiente. Eisnor [23] evaluó el impacto de desinfectantes secundarios en el deterioro interno de la tubería y en la variación de la calidad del agua, el sistema utilizado funciona mediante recirculación con una velocidad de flujo de 0,3 m/s, considerada como la velocidad típica en los sistemas de distribución.

Evaluación del agua y el material

En general los sistemas pilotos empleados en las investigaciones no presentan un diseño estándar, estos permiten tomar muestras de agua a la entrada y salida del sistema, y en algunos casos en diferentes puntos cuando son sistemas abiertos [28, 30]. Por otro lado poseen generalmente un solo punto de muestreo cuando el sistema presenta recirculación [23]. Los muestreos del agua se realizan generalmente con una frecuencia comprendida entre 1 y 3 veces por semana [19, 21, 30], aunque se han empleado toma de muestras mensualmente [26]. Los parámetros del agua generalmente evaluados en los muestreos son: la temperatura, pH, acidez, alcalinidad, dureza, turbiedad, color, oxígeno disuelto, conductividad, desinfectante residual, sólidos totales, carbón or-

gánico disuelto, heterótrofos totales, absorbancia 254 nm, sulfatos, cloruros, hierro, manganeso, entre otros. Estos parámetros se evalúan para determinar la agresividad del agua sobre los materiales metálicos empleados en las tuberías y para analizar la calidad del agua en un sistema de distribución. Adicionalmente, se han utilizado tiempos de muestreo del agua de pocas horas cuando el objetivo es evaluar el decaimiento del desinfectante [24] y el oxígeno disuelto en el agua [22] o incluso minutos para determinar las variaciones en los parámetros del agua cuando se efectúa un incremento en la velocidad de flujo [30].

El muestreo de la biopelícula formada en la superficie de la tubería se ha realizado en periodos ligeramente mayores, se ha reportado su ejecución semanalmente [31] o mensualmente [32]. La biopelícula formada en el interior del sistema se estudia mediante la remoción de pequeñas secciones de tubería. La evaluación se realiza mediante el raspado y lavado de la superficie interior de la tubería o mediante la remoción por sonicación, mientras su análisis generalmente se lleva a cabo empleando conteo de heterótrofos.

Con relación al tiempo del ensayo, el estudio normalmente se efectúa con una duración cercana a 1 año, o aún mayor para el caso de evaluación de la corrosión de los materiales metálicos y la formación de biopelícula en el sistema de distribución, como es el caso del análisis de diferentes procesos de desinfección en la formación de biopelícula [26] y la caracterización de los productos de corrosión formados [33]. Por otro lado, se han empleado unas pocas semanas cuando el objetivo del estudio ha sido valorar los cambios en la calidad del agua como respuesta a la variación de velocidad de flujo [30].

Adecuación del sistema piloto

Antes de iniciar los estudios en el sistema piloto de distribución, cuando se utilizan materiales que han estado previamente en operación en sistemas de distribución, es necesario destinar un tiempo adecuado para que los materiales de tubería puedan establecer un equilibrio con el agua empleada

en el estudio; en caso de emplear materiales nuevos, se debe realizar un proceso de desinfección mediante una solución de hipoclorito [34]. Por otro lado, se efectúa periódicamente la operación de lavado al sistema cuando se usan velocidades muy bajas o cuando opera con recirculación del agua, para lo cual se emplean una velocidad y una cantidad específica de agua cada vez que se renueva. El lavado es también necesario cuando el estudio comprende un desarrollo en varias fases en las cuales se presentan cambios en el tratamiento o desinfección del agua.

El tiempo requerido para que el sistema alcance condiciones estables antes de realizar las evaluaciones puede ser de varios meses, según lo reportado en la literatura, como es el caso de 5 meses para un sistema compuesto de diferentes materiales de tubería [29], o tiempos aun superiores de hasta un año para ensayos de desinfección [21]. Por otro lado, el lavado de la tubería en un sistema piloto de distribución se realiza con una velocidad de flujo mayor a la empleada en el estudio. Estudios que utilizan una velocidad de flujo relativamente baja, realizan el proceso de lavado generalmente a una velocidad de flujo de 0.3 m/s, con una cantidad de agua que comprende al menos entre 3 y 5 veces el volumen de la tubería. [20,24,29].

Como puede observarse, son numerosas las variables y especificaciones de diseño a tener en cuenta en la selección de un sistema piloto para el estudio del deterioro de las tuberías y de la calidad del agua potable que circula por las mismas. El objetivo del presente trabajo es exponer los parámetros más relevantes y recientemente reportados en la literatura, relacionados con la utilización de pilotos para simular condiciones de sistemas de distribución de agua potable. Adicionalmente, sentar las bases para la selección de las características de diseño de un sistema piloto de distribución que permita estudiar la interacción entre el agua potable y el material de tubería. Así mismo, que permita evaluar el deterioro del material de tubería y su incidencia en el detrimento de la calidad del agua.

Diseño del sistema piloto

Un sistema piloto de distribución es una herramienta útil para simular las condiciones en un sistema de distribución de agua real, debido a que permite definir las condiciones hidráulicas en el sistema y obtener información de la calidad del agua, velocidad de corrosión y condiciones microbiológicas al interior de una tubería, bajo unas condiciones controladas. La configuración de estos dispositivos varía en los diferentes trabajos y no existe un diseño estándar, debido a la flexibilidad que permite su diseño. Sin embargo, su clasificación se puede realizar por la configuración de flujo, la cual puede ser a través del sistema con un solo paso del fluido o por recirculación, las cuales se presentan en la tabla 1.

Dentro de la configuración del montaje con recirculación, se dispone de un tramo lineal de la tubería del material a evaluar, acoplado en ambos extremos a una línea de material inerte en la cual está instalada una bomba de recirculación. En el montaje pueden existir dos diseños diferentes, uno es el sistema completamente cerrado mientras el otro incluye adicionalmente un tanque de depósito, el cual permite una operación más fácil, pero le proporciona un tiempo de estancación al agua.

Características principales de un sistema piloto

En el diseño del sistema piloto es necesario definir las características del material, las condiciones de operación, los muestreos y la adecuación del sistema a realizar. Por esto, es necesario establecer los materiales a evaluar, la longitud expuesta, el diámetro de la tubería, la velocidad de flujo, el tiempo de retención, los muestreos y el análisis a realizar, con el fin de obtener el sistema más adecuado a los requerimientos del estudio específico. Un resumen de las características de un sistema se presenta en la tabla 2.

Tabla 1 Configuraciones de flujo en un sistema piloto

<i>Flujo a través</i>	<i>Recirculación</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Suministra un modelo más real, ya que la mayoría de los sistemas de la distribución y las redes domiciliarias tienen este tipo de flujo. • No es adecuado para evaluar procesos químicos o microbiológicos, si no hay un tiempo de contacto suficiente entre la tubería y el agua. • El tiempo de retención es función de la longitud de tubería y de la velocidad de flujo. • La velocidad de flujo es controlada por el flujo en la entrada y salida de la sección de ensayo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona una aproximación a las condiciones de equilibrio para estudios relacionados con la solubilidad de los subproductos de la corrosión o de los mecanismos de inhibición. • Permite la evaluación de procesos químicos y microbiológicos, ya que proporciona un tiempo de contacto más prolongado. • El tiempo de retención es independiente de la velocidad de recirculación o de la longitud de la sección de ensayo. • La velocidad en la sección es controlada por el flujo de recirculación.

Tabla 2 Características de un sistema piloto

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Aplicación</i>
Material de tubería	Tuberías nuevas o con varios años de funcionamiento	PVC, Polietileno Hierro dúctil revestido, Fundición de hierro, Acero galvanizado, Cobre	Simulación de los materiales empleados en los sistemas de distribución
	Por la configuración de flujo del sistema	1 a 3 m > 10 m	Recirculación del agua o flujo a través con estancación. Flujo a través
Longitud del tramo de tubería	Con relación a la clase de tramo	Permanente > 1 m	Estudios de pérdida de metal, impacto de desinfectantes, variaciones en la calidad del agua
		Insertada < 0,3 m	Evaluación de productos de corrosión, depósitos y crecimiento de biopelícula en la superficie
Diámetro de la tubería	Para flujo a través o con recirculación	> 0,05 m ~ 0,025	Estudios simulando SD Impacto de desinfectantes Estudios de sistema residencial
	Según las condiciones del estudio	>0,3 m/s 0,3 m/s < 0,3 m/s,	Normal en reducciones o tubería de diámetro muy pequeño Valor normalmente usado Para condiciones de estancación o muy bajo flujo

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Aplicación</i>
Tiempo de retención	Permanencia y contacto agua-tubería	Depende de los objetivos del estudio	Por estabilidad de unos parámetros del agua no debe ser muy grande.
Duración del estudio	Tiempo de ensayo	6 a 24 meses, ~1 año < 3 meses	Para evaluaciones de deterioro del material y formación de depósitos Cambios en la velocidad de flujo impacto de desinfectantes
	Agua	~ semanal	Estudios de pérdida de metal, impacto de desinfectantes, variaciones en la calidad del agua
Muestreos		< diario	Evaluación de parámetros poco estables del agua y cambios en la velocidad de flujo

Sistema piloto de distribución

Un sistema piloto de distribución se considera importante para la ejecución de un estudio orientado a la interacción del agua potable con la tubería en sistemas de distribución, ya que posibilita evaluar el deterioro del material de tubería, la variación en la calidad del agua y la generación de depósitos y biopelícula en la tubería. Lo anterior se logra debido a las bondades que ofrecen estos dispositivos, ya que permiten determinar la velocidad de corrosión de los materiales metálicos de tubería, realizar muestreos del agua y analizar los productos formados en la tubería. Las características del sistema se presentan en la tabla 3, donde se resumen y sustentan las variables consideradas en el diseño del sistema, siguiendo las recomendaciones y los valores reportados en la literatura. A continuación se presentan las principales características de un sistema piloto seleccionado para estudiar los efectos de la interacción del agua y materiales de tubería en el deterioro de las tuberías y en la calidad del agua potable en la ciudad de Medellín.

Para cada material metálico propuesto a evaluar en el proyecto se dispondrá de un sistema piloto. La configuración de estos sistemas es similar, la única variación es el material de ensayo expuesto en estos. La presión del piloto es de 276 KPa similar a lo reportado en otros estudios [21], la cual se encuentra dentro del rango establecido de

operación en sistemas de distribución, se reporta que la presión mínima debe ser de 98,1 a 147,2 KPa según el nivel de complejidad del sistema de distribución, sin sobrepasar los 588,6 KPa [35].

Descripción del Sistema Piloto

El sistema está compuesto del tramo de la tubería de ensayo con una longitud total de 3 m, incluyendo siete tramos de 0,05 m acoplados mediante uniones universales. En ambos extremos del material de tubería se acopla un arreglo en tubería de PVC, el cual presenta una apariencia de tres eses continuas para ubicar cupones de corrosión que presentan un tamaño de 0,013 por 0,076 por 0,0016 m [36]. Finalmente el circuito se cierra con un arreglo de tubería en PVC, el cual permite la entrada y salida del agua continuamente o la recirculación del fluido con una bomba mediante un arreglo de válvulas. Un esquema del sistema piloto que se utilizará en el desarrollo de las pruebas se ilustra en la figura 1.

Las características que presenta el sistema piloto son asignadas para tener en contacto la tubería con el agua potable en todo momento, realizar muestreos del agua, exponer tramos de tubería para inspeccionar la superficie y ubicar cupones del material para determinar la velocidad de corrosión. Como se observa, el sistema piloto presenta la posibilidad de trabajar con flujo a través o con recirculación del fluido, la cual se logra mediante

un conjunto de válvulas que permiten realizar las adecuaciones. El sistema se ubica en un sistema de distribución, por tanto un solo paso del fluido es la operación normal en la cual se tiene en contacto la superficie interna de la tubería con el agua. Por otro lado, la recirculación permite brindar un tiempo adecuado de contacto entre la tubería y el agua, proceso en el cual se realiza el muestreo del agua antes y después de la operación para evaluar

las variaciones en los parámetros del agua. Los tramos de tubería se retiran a lo largo de la exposición para analizar el ataque al material y la formación de depósitos y biopelícula. Adicionalmente, para determinar la velocidad de corrosión del material de tubería en el estudio, se ubican cupones de corrosión por triplicado para cada tiempo de análisis, en las dos líneas de tubería de PVC que presentan forma de eses.

Tabla 3 Especificaciones del sistema piloto elegido

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Consideración</i>
Materiales a evaluar	acero al carbono cobre PVC, como blanco	Se definió por el objeto del estudio, los materiales metálicos más empleados en el sistema o región.
Longitud total de tubería	3 m, con tramos cortos de tubería insertados	Adecuado para estudios de corrosión y formación de depósitos. Se pueda realizar muestreo de microorganismos
Diámetro de la tubería	0,025 m	Simula redes secundarias de distribución Comercialmente disponible.
Velocidad de flujo programada	0,3 m/s	Valor normal para sistemas de distribución de agua
Operación del sistema	Flujo a través (normalmente), recirculación (ocasionalmente, evaluar cambios en la calidad del agua)	Permite determinar pérdida de metal y estudios de biopelícula Posibilita estudiar posible deterioro de la calidad del agua
Tiempo del ensayo	1 año / piloto	Permite determinar pérdida de metal y estudios de biopelícula
Frecuencia de muestreo del agua	semanalmente (tres meses) quincenalmente (posteriormente)	Permite evaluar cambios en el agua, mayor frecuencia al inicio mientras se va estabilizando el sistema.
Evaluación de la superficie interna de tubería	½, 1, 3, 6 y 12 meses	Evaluación de depósitos y óxidos formados en la superficie, se recomienda tiempos cortos al comienzo y más prolongados posteriormente.
Velocidad de corrosión	Pérdida de masa de cupones	Uso de cupones de corrosión para determinar la pérdida de masa, según Norma ASTM D 2688

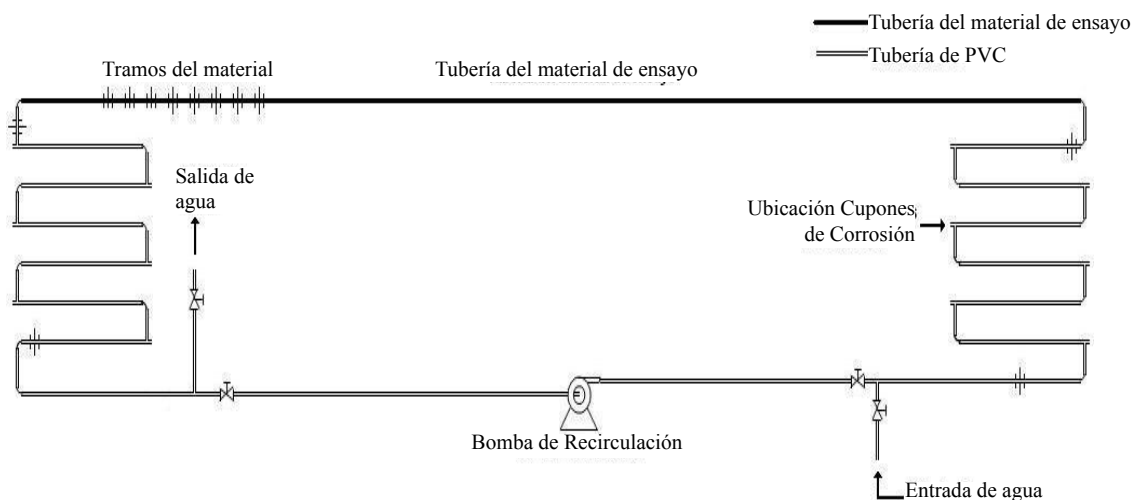


Figura 1 Esquema del sistema piloto

La variación de la calidad del agua y el deterioro de la tubería de ensayo se realizará evaluando los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua, que de acuerdo a lo reportado en la literatura pueden presentar cambios apreciables a lo largo de un sistema de distribución y que están asociados con el deterioro del material de tubería. Los parámetros elegidos que podrán informar sobre el deterioro de la calidad del agua se listan en la tabla 4, especificando los sistemas pilotos en los cuales se evaluarán.

El muestreo del agua se realizará con una frecuencia semanal durante los primeros tres meses del estudio en el sistema piloto (tiempo en el cual se espera la formación de una capa de óxidos y depósitos en la superficie, ligeramente estable) y posteriormente su frecuencia será quincenal, para un buen uso de los recursos. Las muestras se tomarán en el piloto al inicio y al final de la operación del sistema en condiciones de recirculación, en las cuales se determinarán los parámetros definidos. Estas muestras se realizarán por el tiempo propuesto para el estudio en el piloto, el cual es 1 año.

Tabla 4 Parámetros a evaluar para determinación de la calidad del agua en el estudio

Parámetros fisicoquímicos		Sistema piloto
Cloro residual libre	Temperatura	
Alcalinidad	Potencial redox	Acero al Carbono
Color	Oxígeno disuelto	Cobre
Turbiedad	Sólidos disueltos totales	blanco de PVC
Conductividad	Sólidos fijos	
pH		
Hierro disuelto		Acero al Carbono
Contenido de Cobre		Cobre
Parámetros microbiológicos		
Heterótrofos totales	E. Coli	Acero al Carbono
Coliformes totales		Cobre
		blanco de PVC

Conclusión

La revisión de literatura especializada permitió establecer las características de diseño de los sistemas pilotos de distribución y simultáneamente permitió definir los valores de las variables físicas e hidráulicas empleadas para el montaje de estos sistemas, así como la frecuencia de muestreo del agua y de la biopelícula, lo cual se aplicó para diseñar un sistema piloto. La implementación de éste permitirá estudiar la interacción entre el agua potable y la tubería con el objeto de evaluar la formación de depósitos y biopelícula en las superficies internas de tuberías, el deterioro de la calidad del agua y la degradación de los materiales de tubería. Lo anterior permitirá establecer el posible mecanismo de corrosión de cada material metálico de tubería, así como determinar el deterioro de la calidad del agua, en función del tipo de material y el tiempo de operación del sistema, con el propósito de plantear soluciones a los problemas que se presentan en los sistemas de distribución y adicionalmente, brindando bienestar al usuario final.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar sus agradecimientos a COLCIENCIAS por el apoyo brindado a través del Programa Grupo Red de Cooperación en Investigación sobre el Agua – GRECIA. Además, John Fredy Rios R. desea agradecer a la misma entidad la beca doctoral.

Referencias

1. M. J. Lehtola, I. T. Miettinen, M. M. Keinänen, T. K. Kekki, O. Laine, A. Hirvonen, T. Vartiainen. P. J. Martikainen. "Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes". *Water research*. Vol. 38. 2004. pp. 3769-3779.
2. N. Boulay, M. Edwards. "Role of temperature, chlorine, and organic matter in copper corrosion by-product release in soft water". *Water research*. Vol. 35. 2001. pp. 683-690.
3. S. Takasaki, Y. Yamada. "Effects of temperature and aggressive anions on corrosion of carbon steel in potable water". *Corrosion Science*. Vol.49. 2007. pp. 240-247.
4. Z. Tang, S. Hong, W. Xiao, J. Taylor. "Impacts of blending ground, surface, and saline waters on lead release in drinking water distribution systems". *Water research*. Vol. 40. 2006. pp. 943-950.
5. M. Momba, R. Kfir, S. N. Venter, T.E. Cloete. "An overview of biofilm formation in distribution systems and its impact on the deterioration of water quality". *Water S.A.* Vol. 26. 2000. pp. 59-66.
6. D. Kooij, H. R. Veenendaal, C. Baars-Lorist, D. W. Klift, Y. C. Drost. "Biofilm formation on surfaces of glass and teflon exposed to treated water". *Water research*. Vol. 29. 1995. pp. 1655-1662.
7. E. Torvinen, S. Suomalainen, M. J. Lehtola, I. T. Miettinen, O. Zacheus, L. Paulin, M. L. Katila, P. J. Martikainen. "Mycobacteria in water and loose deposits of drinking water distribution systems in Finland". *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 70. 2004. pp. 1973-1981.
8. T. Schwartz, S. Hoffmann, U. Obst. "Formation and bacterial composition of young, natural biofilms obtained from public bank-filtered drinking water systems". *Water research*. Vol. 32. 1998. pp. 2787-2797.
9. J. C. Nickel, I. Ruseska, J. B. Wright, J. W. Costerton. "Tobramycin Resistance of Pseudomonas aeruginosa Cells Growing as a Biofilm on Urinary Catheter Material". *Antimicrobial agents and chemotherapy*. Vol. 27. 1985. pp. 619-624.
10. J. W. Costerton, E. S. Lashen. "Influence of biofilm on efficacy of biocides on corrosion-causing bacteria". *Material Performance*. Vol. 23. 1984. pp. 13-17.
11. M. N. B. Momba, N. Makala. "Comparing the effect of various pipe materials on biofilm formation in chlorinated and combined chlorine-chloraminated water systems". *Water S.A.* Vol. 30. 2004. pp. 175-182.
12. M. N. B. Momba, N. Makala. "Combining chlorination and chloramination processes for the inhibition of biofilm formation in drinking surface water system models". *Journal of Applied Microbiology*. Vol. 92. 2002. pp. 641-648.
13. G. A. Gagnon, J. L. Rand, K. C. O'Leary, A. C. Rygel, C. Chauret, R. C. Andrews. "Disinfectant efficacy of chlorite and chlorine dioxide in drinking water biofilms". *Water Research*. Vol. 39. 2005. pp. 1809-1817.
14. G. A. Gagnon, P. M. Huck. "Removal of easily biodegradable organic compounds by drinking water biofilms: analysis of kinetics and mass transfer". *Water Research*. Vol. 35. 2001. pp. 2554-2564.

15. C. Volk, E. Dundore, J. Schiermann, M. Lechevallier. "Practical evaluation of iron corrosion control in a drinking water distribution system". *Water Research*. Vol. 34. 2000. pp. 1967-1974.
16. S. Ndiongue, P. M. Huck, R. M. Slawson. "Effects of temperature and biodegradable organic matter on control of biofilms by free chlorine in a model drinking water distribution system." *Water Research*. Vol. 39. 2005. pp. 953-964.
17. R. Boe-Hansen. "Microbial growth in drinking water distribution systems". Ph.D. Thesis. Environment & Resources DTU, Technical University of Denmark. 2001. <http://www.er.dtu.dk/publications/fulltext/2001/MR2001-075.pdf> Consultada el 4 de agosto de 2006.
18. J. D. Eisnor, G. A. Gagnon. "A framework for the implementation and design of pilot-scale distribution systems". *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*. Vol. 52. 2003. pp. 501-519.
19. S. A. Imran, J. D. Dietz, G. Mutoti, J. S. Taylor, A. A. Randall. "Modified Larsons Ratio Incorporating Temperature, Water Age, and Electroneutrality Effects on Red Water Release". *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 131. 2005. pp. 1514-1520.
20. Z. Tang, S. Hong, W. Xiao, J. Taylor. "Characteristics of iron corrosion scales established under blending of ground, surface, and saline waters and their impacts on iron release in the pipe distribution system". *Corrosion Science*. Vol. 48. 2006. pp. 322-342.
21. M. J. Lehtola, I. T. Miettinen, T. Lampola, A. Hirvonen, T. Vartiainen, P. J. Martikainen. "Pipeline materials modify the effectiveness of disinfectants in drinking water distribution systems". *Water Research*. Vol. 39. 2005. pp. 1962-1971.
22. P. Sarin, V. L. Snoeyink, J. Bebee, K. K. Jim, M. A. Beckett, W. M. Kriven, J. A. Clement. "Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: effect of dissolved oxygen". *Water Research*. Vol. 38. 2004. pp. 1259-1269.
23. J. D. Eisnor, G. A. Gagnon. "Impact of secondary disinfection on corrosion in a model water distribution system". *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*. Vol. 53. 2004. pp. 441-452.
24. L. A. Rossman. "The effect of advanced treatment on chlorine decay in metallic pipes". *Water Research*. Vol. 40. 2006. pp. 2493-2502.
25. T. H. Merkel, H. J. Groß, W. Werner, T. Dahlke, S. Reicherter, G. Beuchle, S. H. Eberle. "Copper corrosion by-product release in long-term stagnation experiments". *Water Research*. Vol. 36. 2002. pp. 1547-1555.
26. V. Lund, K. Osmerod. "The influence of disinfection processes on biofilm formation in water distribution systems". *Water Research*. Vol. 29. 1995. pp. 1013-1021.
27. S. L. Percival, J. S. Knapp, R. Edyvean, D. S. Wales. "Biofilm Development on Stainless Steel in Mains Water". *Water Research*. Vol. 32. 1998. pp. 243-253.
28. M. W. LeChevallier, C. D. Lowry, R. G. Lee. "Disinfecting biofilms in a model distribution system". *Journal AWWA.soc*. Vol. 82. 1990. pp. 87-99.
29. S. A. Imran, J. D. Dietz, G. Mutoti, J. S. Taylor, A. A. Randall, C. D. Cooper. "Red Water Release in Drinking Water Distribution Systems". *Journal AWWA*. Vol. 97. 2005. pp. 93-100.
30. M. J. Lehtola, M. Laxander, I. T. Miettinen, A. Hirvonen, T. Vartiainen, P. J. Martikainen. "The effects of changing water flow velocity on the formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes". *Water Research*. Vol. 40. 2006. pp. 2151-2160.
31. C. D. Norton, M. W. Lechevallier. "A Pilot Study of Bacteriological Population Changes through Potable Water Treatment and Distribution". *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 66. 2000. pp. 268-276.
32. B. Holden, M. Greetham, B. T. Croll, J. Scutt. "The Effect of changing inter process and final disinfection reagents on corrosion and biofilm growth in distribution pipes". *Water Science and Technology*. Vol. 32. 1995. pp. 213-220.
33. P. Sarin, V. L. Snoeyink, J. Bebee, W. M. Kriven, J. A. Clement. "Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes". *Water Research*. Vol. 35. 2001. pp. 2961-2969.
34. ANSI/AWWA C651-92. "Standard for disinfecting water mains". AWWA. 1992. pp. 8-13.
35. Ministerio de Desarrollo Económico. República de Colombia. *Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000. Sección II, Título B, Sistemas de Acueducto*. http://www.minambiente.gov.co/viceministerios/ambiente/dir_agua_potable_saneam_basico/direccion/TituloB-Oct2.pdf Consultada el 18 de enero de 2007.
36. Designation ASTM D2688. "Standard Test Methods for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Weight Loss Methods)". *ASTM International*. 2005. pp. 1-7.