

## FILTRACIÓN LENTA COMO PROCESO DE DESINFECCIÓN

Ing. Lidia Cánepa de Vargas

CEPIS-OPS

Lima, Perú

### RESUMEN

La filtración lenta en arena es el sistema de tratamiento de agua más antiguo. El desconocimiento de sus ventajas y el surgimiento de la filtración rápida ha hecho que en nuestros países fuera menospreciado y relegado al medio rural.

Se analiza el comportamiento de los mecanismos físicos y biológicos responsables de la eficiencia de la filtración lenta para establecer su diferencia con el filtro rápido.

El filtro rápido a través de mecanismos fisicoquímicos acumula el lodo en los intersticios del medio filtrante, el cual es arrojado nuevamente al ambiente (conjuntamente con los microorganismos) durante el proceso de lavado.

En cambio, el filtro lento, a través de mecanismos físicos y biológicos destruye los microorganismos, lo que constituye una tecnología limpia a través de la cual es posible purificar el agua sin crear una fuente adicional de contaminación para el ambiente.

### 1. Introducción

La filtración lenta en arena es el sistema de tratamiento de agua más antiguo utilizado por la humanidad. Es muy sencillo y efectivo porque copia exactamente el proceso de purificación que se da en la naturaleza al atravesar el agua de lluvia a los estratos de la corteza terrestre hasta encontrar los acuíferos o ríos subterráneos.

La primera planta de filtración lenta que se recuerda se instaló en Paisley, Escocia, en 1804 y desde entonces este tipo de sistema se ha usado ininterrumpidamente en Gran Bretaña y el resto de Europa, principalmente por su gran eficiencia en la remoción de microorganismos patógenos.

Durante el presente siglo se desarrolló el filtro rápido que, comparativamente con el filtro lento, requiere de áreas más pequeñas para tratar el mismo caudal y, por lo tanto, tiene menor costo inicial, pero es más complejo y costoso de operar. Las nuevas técnicas calificaron de obsoleto al filtro lento, debido a que, como es más simple que cualquiera de las innovaciones más recientes, se suponía que debía

ser necesariamente inferior. Resulta que, paradójicamente, pese a ser el sistema de tratamiento más antiguo del mundo, es uno de los menos comprendidos y del que menos investigaciones se han realizado sobre el comportamiento del proceso y su eficiencia.

Investigaciones recientes impulsan el resurgimiento del filtro lento, permitiendo conocer profundamente este complejo proceso que se desarrolla en forma natural, sin la aplicación de ninguna sustancia química, pero que requiere de un buen diseño, así como de una apropiada operación y cuidadoso mantenimiento para no afectar el mecanismo biológico del filtro y reducir la eficiencia de remoción microbiológica.

## **2. Comportamiento del filtro lento (Huisman & Wood, 1974)**

La filtración biológica (o filtración lenta) se consigue al hacer circular el agua cruda a través de un manto poroso de arena. Durante el proceso las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas, desarrollándose adicionalmente procesos de degradación química y biológica que reducen a la materia retenida a formas más simples, las cuales son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta un subsecuente retiro o limpieza.

Los procesos que se desarrollan en un filtro lento se complementan entre sí, actuando en forma simultánea, para mejorar las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua tratada.

El agua cruda que ingresa a la unidad permanece sobre el medio filtrante de tres a doce horas, dependiendo de las velocidades de filtración adoptadas. En este tiempo, las partículas más pesadas que se encuentran en suspensión se sedimentan y las partículas más ligeras se pueden aglutinar, llegando a ser más fácil su remoción posterior. Durante el día y bajo la influencia de la luz del sol se produce el crecimiento de algas, las cuales absorben bióxido de carbono, nitratos, fosfatos y otros nutrientes del agua para formar material celular y oxígeno. El oxígeno así formado se disuelve en el agua y entra en reacción química con las impurezas orgánicas, haciendo que éstas sean más asimilables por los microorganismos.

En la superficie del medio filtrante se forma una capa, principalmente de material de origen orgánico, conocida con el nombre de schmutzdecke o "piel de filtro", a través de la cual tiene que pasar el agua, antes de llegar al propio medio filtrante. El schmutzdecke está formado principalmente por algas y otras numerosas formas de vida, tales como plankton, diatomeas, protozoarios, rotíferas y bacterias. La acción intensiva de estos microorganismos atrapa, digiere y degrada la materia orgánica contenida en el agua. Las algas muertas, así como las bacterias vivas del agua cruda son también consumidas en este proceso. Al mismo tiempo que se degradan los compuestos nitrogenados se oxigena el nitrógeno. Algo de color es

removido y una considerable proporción de partículas inertes en suspensión son retenidas por cernido.

Habiendo pasado el agua a través del schmutzdecke, entra al lecho filtrante y es forzada a atravesarlo en un proceso que normalmente toma varias horas, desarrollándose un proceso físico de cernido que constituye una parte del proceso total de purificación. Una de las propiedades más importantes del manto filtrante es la adherencia, fenómeno resultante de la acción de fuerzas eléctricas, acciones químicas y atracción de masas. Para apreciar la magnitud e importancia de este fenómeno, es necesario visualizar que un metro cúbico de arena con las características usuales para filtros lentos tiene una superficie de granos de cerca de 15,000 m<sup>2</sup>. Cuando el agua pasa entre los granos de arena con un flujo laminar (el cual cambia constantemente de dirección) se facilita la acción de las fuerzas centrífugas sobre las partículas y la adherencia a la superficie de los granos de arena.

En los poros o espacios vacíos del medio filtrante (los cuales constituyen aproximadamente el 40% del volumen) se desarrolla un proceso activo de sedimentación, fenómeno que se incrementa apreciablemente por la acción de fuerzas electrostáticas y de atracción de masas.

Debido a los fenómenos enunciados anteriormente, la superficie de los granos de arena es revestida con una capa de una composición similar al schmutzdecke, con bajo contenido de algas y partículas, pero con un alto contenido de microorganismos, bacterias, bacteriófagos, rotíferas y protozoarios; todos ellos se alimentan y absorben las impurezas y residuos de los otros. Este revestimiento biológico es muy activo hasta los 0.40 m de profundidad en el medio filtrante. Predominan diversas formas de vida en las diferentes profundidades y se desarrolla una mayor actividad biológica cerca de la superficie del manto filtrante, donde las condiciones son óptimas y existe gran cantidad de alimento.

El alimento consiste esencialmente en partículas de origen orgánico, llevadas por el agua. El revestimiento orgánico mantiene a las partículas que se encuentran en suspensión en el agua hasta que se degrada la materia orgánica y es asimilada por el material celular, el cual a su vez es asimilado por otros organismos y convertido en materia inorgánica, tal como agua, bióxido de carbono, nitratos, fosfatos y sales que son arrastradas posteriormente por el agua.

En el extremo final del manto filtrante disminuye la cantidad de alimento, produciéndose otro tipo de bacterias, las cuales utilizan el oxígeno disuelto en el agua y los nutrientes que se encuentran en solución.

Como consecuencia de los procesos indicados anteriormente, un agua cruda que ingresa en el filtro lento con sólidos en suspensión en estado coloidal y amplia variedad de microorganismos y complejas sales en solución sale virtualmente libre de tales impurezas y con bajo contenido de sales inorgánicas en solución. En el proceso de filtración biológica, no sólo se han eliminado los organismos nocivos o

peligrosos, sino también los nutrientes en solución, los cuales podrían facilitar el subsiguiente crecimiento bacteriológico.

Por lo general, el efluente obtenido tiene bajo contenido de oxígeno disuelto y alto contenido de bióxido de carbono, pero con un proceso de aireación posterior se pueden mejorar ambas características.

Como el rendimiento del filtro lento depende principalmente del proceso biológico, mientras la capa biológica se desarrolla, la eficiencia es baja, mejorando a medida que progresa la carrera de filtración, proceso que se conoce con el nombre de “maduración del filtro”.

### 3. Mecanismos de remoción

Los mecanismos de transporte y adherencia que actúan sobre las partículas acarreadas por el agua (cuadro 3.1), en el proceso de remoción por filtración lenta, son los mismos que actúan en el proceso de filtración rápida.

La diferencia fundamental está en el mecanismo biológico adicional que actúa en el filtro lento. Mientras que en el filtro rápido los microorganismos quedan entre el lodo retenido en el lecho filtrante y salen del filtro con el agua de lavado, quedando nuevamente liberados, en el filtro lento mueren como consecuencia del proceso de degradación biológica.

**Cuadro 3.1. Partículas encontradas en el agua (Awwa, 1991)**

Categoría	Grupo/Nombre	Tamaño (micrones)
Mineral	- Arcilla (coloidal)	0.001 – 1.0
	- Silicatos	
	- No silicatos: Fe, Ca, Al, Mg, etc.	
Biológica	- Virus	0.1 – 0.1
	- Bacterias	0.3 – 10
	- Quistes de Giardia lamblia	10
	- Algas unicelulares	30 – 50
	- Huevos de parásitos	10 – 50
	- Huevos de nemátodes	10
	- Cryptosporidio oocysts	4 – 5
Otras partículas	- Pequeños desechos amorfos	1 – 5
	- Grandes desechos amorfos	25 – 500
	- Coloides orgánicos	--

#### 3.1 Mecanismos de transporte

Esta etapa de remoción básicamente hidráulica ilustra los mecanismos mediante los cuales ocurre la colisión entre las partículas y los granos de arena. Estos

mecanismos son principalmente el de intercepción sedimentación y difusión. Para comprenderlos hay que considerar primero la forma en que el fluido se comporta alrededor de un grano de arena, considerado como una obstrucción al paso del agua. La figura 3.1 muestra cómo el modelo de flujo de un fluido (el cual puede ser representado en términos de líneas de flujo) es alterado por la presencia de un grano de arena, idealizado en la figura como una esfera.

Si una partícula (representada en la figura por un círculo negro) es llevada por las líneas de flujo, puede colisionar con un grano de arena, adherirse a él y de este modo ser removida.

a) Cernido:

El mecanismo de cernido actúa exclusivamente en la superficie de la arena y sólo con aquellas partículas de tamaño mayor que los intersticios de la arena. Su eficiencia es negativa para el proceso porque colmata rápidamente la capa superficial, acortando las carreras de filtración.

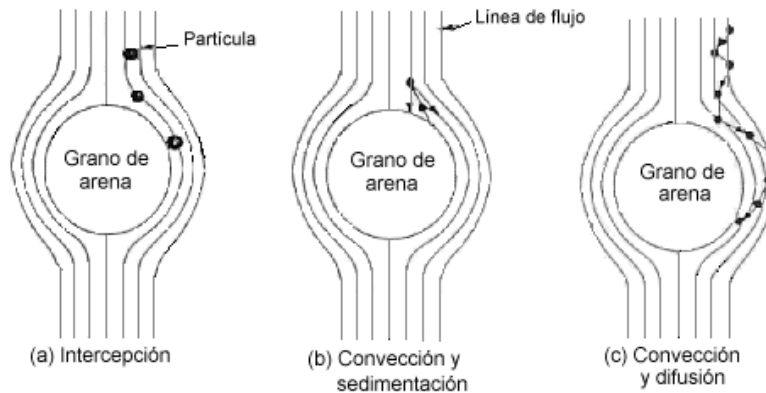
Los sólidos grandes, especialmente material filamentoso como las algas clodoferas, forman una capa esponjosa sobre el lecho que mejora la eficiencia del cernido, actuando como un prefiltro sobre el lecho de arena, protegiéndolo de una rápida colmatación y permitiéndole cumplir con su función de filtración a profundidad.

b) Intercepción:

Es una de las formas en que las partículas pueden colisionar con los granos de arena. La intercepción solamente puede ocurrir si la partícula conducida por las líneas de flujo se acerca al grano de arena, de modo que roce la superficie de éste. Cuando más grande es la partícula, será más factible que ocurra la intercepción (ver figura 3.1(a)).

c) Sedimentación:

La fuerza de gravedad actúa sobre todas las partículas, produciendo la componente vertical de la resultante de la velocidad de conducción, la cual puede causar la colisión de la partícula con el grano de arena. Su influencia es perceptible solamente con partículas mayores de 10  $\mu\text{m}$  (Yao, 1971) (ver figura 3.1(b)).



**Figura 3.1. Mecanismos de transporte**

d) Difusión:

Es el tercer mecanismo de transporte representativo en la filtración lenta. La energía térmica de los gases y líquidos se pone de manifiesto en un movimiento desordenado de sus moléculas. Cuando esas moléculas colisionan con una pequeña partícula, ésta también empieza a moverse en forma descontrolada, en una serie de pasos cortos, a menudo denominados de “andar desordenado”.

Si la partícula es conducida por las líneas de flujo, la difusión puede cambiar su trayectoria, moviéndose de una línea de flujo a otra, pudiendo eventualmente colisionar con un grano de arena. Como se puede inferir, cuanto más baja es la velocidad del flujo, más pasos podrá dar la partícula por unidad de tiempo. Por lo tanto, la probabilidad de colisión aumenta a medida que la velocidad intersticial decrece. Asimismo, a medida que la temperatura se incrementa, aumenta también la energía térmica y, por consiguiente, el número de pasos por unidad de tiempo y la probabilidad de colisión. La difusión es un mecanismo muy importante con partículas de tamaño menor a  $1 \mu\text{m}$  (Yao, 1971) (ver figura 3.1(b)).

e) Flujo intersticial:

Las líneas de flujo mostradas en la figura 3.1 han sido idealizadas para un solo grano de arena. En una porción de lecho filtrante con muchos granos de arena, las líneas de flujo tienen una configuración más tortuosa, como se indica en la figura 3.2. Por definición, el flujo entre dos líneas cualquiera de corriente es similar y el espacio dentro del cual discurren se denomina conducto cilíndrico. La configuración de estos conductos cilíndricos es tortuosa, se bifurca, se unen y se vuelven a bifurcar en diferentes puntos. Este cambio continuo de dirección del flujo crea mayor oportunidad de colisión, al cruzarse constantemente las partículas y los granos de arena.

Como se indica en la figura 3.2, si una partícula es conducida por las líneas de flujo intersticial, será más probable que en cualquier punto durante su paso entre los granos de arena choque contra uno de ellos. La posibilidad de chocar dentro de un tramo dado de su trayectoria depende de la dimensión de los granos de arena, de la velocidad intersticial y de la temperatura. Cuanto más pequeños los granos de arena, mayor probabilidad de colisión. La porosidad del medio es mayor y, por lo tanto, hay mayor cantidad de conductos, produciéndose mayor número de bifurcaciones. Asimismo, cuanto más baja la velocidad intersticial, mayor posibilidad de colisionar. Como se indicó previamente, las velocidades más bajas permiten mayor oportunidad de colisión por unidad de distancia con el mecanismo de difusión. Sin embargo, a medida que la velocidad intersticial se incrementa, hay un punto por encima del cual la velocidad ya no influye aunque siga aumentando. Finalmente, las temperaturas altas intensifican el mecanismo de difusión, produciéndose una mayor probabilidad de colisión.

f) Probabilidad de colisión:

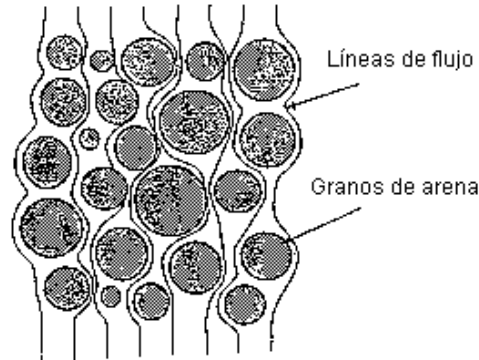
Todo el análisis efectuado hasta ahora está estrechamente relacionado con la oportunidad de colisión entre una partícula y un grano de arena, expresado mediante el coeficiente ( $\eta$ ). El número de colisiones por unidad de desplazamiento determina el potencial de remoción mediante la filtración. La remoción final dependerá de que se produzca la adherencia.

### **3.2 Mecanismo de adherencia**

Mientras no se produce la adherencia, no hay remoción. La fracción de partículas que se adhieren en relación con el número de colisiones, por definición es el coeficiente  $\alpha$ . Investigaciones al respecto sugieren que el desarrollo de la película biológica proporciona a los granos de arena una superficie absorbente que favorece la adherencia. Otra suposición es que las enzimas extracelulares coagulan las partículas permitiendo así la adherencia. Se desconoce en qué situaciones aumenta o disminuye el valor de  $\alpha$ .

Cuando el filtro comienza a funcionar y antes de que se desarrolle la película biológica, la remoción de coliformes es cercana a cero y, por lo tanto  $\alpha = 0$  (Bryck y colaboradores, 1987). Después de que la película biológica se ha desarrollado, la tasa de remoción es del orden de 2 a 4 logaritmos, encontrándose el coeficiente  $\alpha$  cercano a 1.0. Esto indica la importancia de la película biológica en la eficiencia del filtro lento. Los microorganismos pueden morir o ser ingeridos por los predadores, antes de que logren alcanzar una superficie absorbente. Por lo tanto, la remoción indicada puede deberse a muerte o predación adicional a la adherencia. Sin embargo, luego de producida la adherencia ocurrirá inevitablemente la predación y la muerte.

El filtro se considera “maduro” cuando la película biológica ha llegado a su máximo desarrollo para las condiciones existentes. El límite máximo de desarrollo de la película biológica no está aún definido, necesiándose mayor investigación al respecto para obtener esta importante información.



**Figura 3.2. Líneas de flujo en el interior del lecho filtrante**

No obstante, investigaciones de Bellamy y colaboradores (1985), Bryck (1987) y Barrett (1989) han demostrado que el límite máximo de desarrollo de la capa biológica se relaciona con el contenido de nutrientes en el agua cruda.

Puede esperarse que filtros lentos que tratan aguas con bajo contenido de nutrientes presenten una remoción de coliformes fecales del orden de 2 log. después de producirse la maduración de la película biológica (Bellamy y colaboradores, 1985). En cambio, con aguas ricas en nutrientes es de esperar que se obtengan remociones del orden de 3 log (Bellamy, 1985), evidenciándose en otros casos eficiencias de remoción de hasta 4 log (Barrett, 1989).

#### **4. Mecanismo biológico**

Tal y como se indicó anteriormente, la remoción total de partículas en este proceso se debe al efecto conjunto, tanto del mecanismo de adherencia, como del mecanismo biológico.

Al iniciarse el proceso, las bacterias predadoras o benéficas transportadas por el agua pueden multiplicarse en forma selectiva, contribuyendo a la formación de la película biológica del filtro y utilizando como fuente de alimentación el depósito de materia orgánica. Estas bacterias oxidan la materia orgánica para obtener la energía que necesitan para su metabolismo (desasimilación) y convierten parte de ésta en material necesario para su crecimiento (asimilación). Así, las sustancias y materia orgánica muerta son convertidas en materia viva. Los productos de desasimilación son llevados por el agua a profundidades mayores para ser utilizados por otros organismos.

El contenido bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda y es acompañado de un fenómeno de mortalidad concomitante, durante el cual se libera materia orgánica para ser utilizada por las bacterias de las capas más profundas y así sucesivamente. De este modo, la materia orgánica degradable presente en el agua cruda es gradualmente descompuesta en agua: bióxido de carbono y sales relativamente inocuas, tales como sulfatos, nitratos y fosfatos (proceso de mineralización) los cuales son descargados en el efluente de los filtros.

La actividad bacteriológica descrita es más pronunciada en la parte superior del lecho filtrante y decrece gradualmente con la profundidad y la disponibilidad de alimento. Cuando se limpian las capas superiores del filtro se remueven las bacterias, siendo necesario un nuevo período de maduración del filtro hasta que se logre desarrollar la actividad bacteriológica necesaria. A partir de los 0.30 a 0.50 m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula (dependiendo de la velocidad de filtración); en cambio, se realizan reacciones bioquímicas que convierten a los productos de degradación microbiológica (tales como aminoácidos) en amoníaco y a los nitritos en nitratos (nitrificación).

## **5. Papel relativo del schmutzdecke y de la arena en la eficiencia del filtro**

La mayor parte de la literatura existente sobre filtración lenta adjudica al schmutzdecke toda la eficiencia microbiológica del filtro.

Hazen (1913) informó haber encontrado concentraciones del orden de  $10^6$  bacterias/gramo de lecho en la superficie del filtro y un decrecimiento exponencial con la profundidad, a valores de  $10^5$  bacterias/gramo a 2 cms de profundidad. Collins y colaboradores (1989) informaron haber encontrado  $10^9$  bacterias/gramo de lecho seco en la superficie del filtro, decreciendo entre  $10^7$  a  $10^6$  bacterias/gramo a una profundidad de 30 a 45 cms.

Bellamy y colaboradores, en un estudio efectuado en 1985, con una tasa hidráulica de 0.12 m/h indican una remoción de bacterias coliformes totales de tres niveles logarítmicos cuando el lecho estaba maduro; sin embargo, después de raspada la superficie del filtro, la remoción fue de dos logaritmos, indicando que el schmutzdecke no era el responsable de toda la eficiencia del filtro, ni siquiera de la mayor parte de ésta.

## 6. Factores que modifican la eficiencia del filtro lento

Estos factores pueden clasificarse como de diseño, operación y ambientales. Del comportamiento de estos dependerá la eficiencia del proceso (ver cuadro 5.1).

**Cuadro 6.1. Variables del proceso que afectan la eficiencia de la filtración lenta<sup>4l</sup>**

<b>Clasificación</b>	<b>Variables</b>
Condiciones de diseño	<ul style="list-style-type: none"><li>- Tasa de velocidad</li><li>- Tamaño de la arena <math>d_{10}</math> y C.U.</li><li>- Pérdida de carga permitida</li><li>- Profundidad del lecho de arena (máxima y mínima)</li></ul>
Parámetros de operación	<ul style="list-style-type: none"><li>- Frecuencia de raspados</li><li>- Tiempo en que el filtro está fuera de operación después del raspado</li><li>- Mínima altura de lecho permitida</li><li>- Tiempo de maduración del filtro</li><li>- Variaciones de flujo</li><li>- Edad y tipo del schmutzdecke</li><li>- Distancia entre la capa de hielo y el lecho de arena (en climas muy fríos)</li></ul>
Condiciones ambientales del agua cruda	<ul style="list-style-type: none"><li>- Temperatura del agua</li><li>- Calidad del agua cruda</li><li>- Clase de microorganismos presentes</li><li>- Concentración de microorganismos</li><li>- Tipo y concentración de algas</li><li>- Magnitud y tipo de turbiedad</li><li>- Concentración y tipo de compuestos orgánicos</li><li>- Concentración y tipo de nutrientes</li></ul>

### 6.1 Condiciones de diseño

Uno de los factores más importante en la eficiencia del filtro es la tasa superficial o velocidad de filtración. Bellamy (1985) demostró la influencia de la tasa de filtración en la remoción de bacterias y quistes. Encontró que cuando las demás relaciones están bien definidas, los porcentajes de remoción son uniformemente altos, que aún con tasas del orden de 0.40 m/h se obtienen eficiencias apreciables (cuadro 5.2).

Una importante condición de diseño es la sencillez de la solución técnica seleccionada, teniendo en cuenta los limitados recursos del medio rural de los países de la Región. Estudios realizados (I. Hespanhol, 1960), CEPIS/DTIAPA (investigación N° 1, 1980), demostraron que la filtración lenta en el medio rural de nuestros países había fracasado por esta razón, porque las soluciones técnicas se

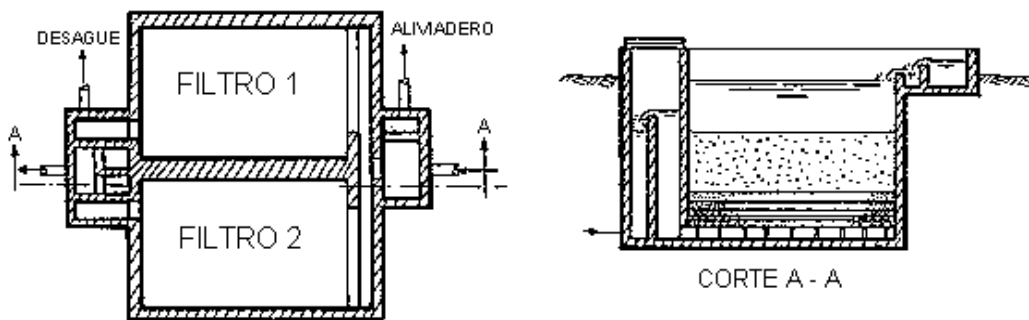
habían implantado con las características tecnológicas de los países desarrollados, en los cuales existían los recursos humanos, económicos y materiales apropiados, además de una cultura de operación de casi un siglo.

La solución técnica apropiada desarrollada por CEPIS, eliminó todos los elementos que habían sido identificados como partes vulnerables del filtro lento, estableciendo controles muy sencillos, básicamente solo vertederos, tanto para medir el caudal, como para controlar los niveles mínimo y máximo del filtro. Se dejó también el nivel variable, pues esta comprobado que esto no afecta la eficiencia del proceso. Ver figura 6.1.

**Cuadro 6.2. Efecto de la tasa de velocidad en la eficiencia de remoción promedio (Bellamy, 1985)**

Microorganismos	Número de análisis	Rango de concentración en el agua cruda	Porcentajes de remoción*		
			Filtro 1 0.04 m/h	Filtro 2 0.12 m/h	Filtro 3 0.40 m/h
Quistes de Giardia	222	50–5075 quistes/litro	99.991	99.994	99.981
Coliformes totales	243	0-29,000 CFU/100 ml	99.96	99.97	99.98
Coliformes fecales	81	0-35,000 CFU/100 ml	99.84	98.45	98.65
Contaje total de bacterias	351	10-(10 <sup>9</sup> ) CFU/100 ml	91.40	89.47	87.99

\* Información obtenida en filtros piloto de 30.5 cms de diámetro, operando continuamente durante un año.



**Figura 6.1. Filtro lento para el medio rural (CEPIS, 1982)**

## 6.2 Condiciones de operación y mantenimiento

Una adecuada operación y mantenimiento son determinantes en la eficiencia del filtro, principalmente en la etapa de puesta en marcha o inicio de la operación del filtro nuevo. Durante la operación normal, es importante el estado de maduración de la capa biológica, la frecuencia de los raspados, el período de duración de cada operación de limpieza y la forma en que se efectúe el rearenado del filtro.

En relación a la puesta en marcha, es necesario tener presente que la arena nueva no reduce la contaminación bacteriológica, siendo necesario desechar el efluente inicial hasta comprobar que se está obteniendo un grado de eficiencia aceptable. Esto fue demostrado por Bryck y colaboradores en filtros piloto nuevos, reportando una eficiencia de remoción de coliformes fecales de cero en la puesta en marcha; los mismos resultados fueron reportados por Bellamy (1985). Como hemos analizado anteriormente, esto se debe a que aún no se ha desarrollado la formación biológica en la arena; sin embargo, este proceso se puede acelerar sembrando el filtro con arena madura proveniente de otros filtros en operación.

En relación a la remoción de quistes de Giardia, resultados reportados por Bellamy (1985) indican eficiencias de hasta 99.99% en filtros nuevos con velocidades de 0.12 m/h, disminuyendo a 99.06% al incrementar a 0.47 m/h la tasa de velocidad (Cuadro 6.3). Bryck (1987) identificó cinco niveles logarítmicos de remoción inmediatamente después de la puesta en marcha de los filtros. Fogel y otros (1993) reportan eficiencias de remoción de quistes de Giardia y Cryptosporidium del orden de 93% y 48%, respectivamente. Los resultados de la investigación indican que se dificulta la remoción de Cryptosporidium cuando las aguas son muy frías o la planta no cumple con los estándares de diseño.

**Cuadro 6.3. Remoción de quistes de Giardia con una arena de 0.615 mm de tamaño efectivo (Bellamy, 1985)**

Filtro	Prueba N°	Condiciones biológicas del filtro	Tasa de velocidad m/h	Concentración quistes afluente	Concentración quistes efluente	% Eficiencia
5	1	Maduro	0.12	3000	0	>99.98
	2	Maduro	0.12	1456	0	>99.92
	3	Maduro	0.12	1845	0	>99.94
7	1	Nuevo	0.12	3227	0	>99.99
	2	Nuevo	0.12	2768	0	>99.99
	3	Nuevo	0.47	2768	26	>99.06

Los resultados del cuadro 6.3 demuestran que el filtro lento es siempre eficiente removiendo quistes de Giardia y posiblemente de cualquier otro tipo de tamaño similar, ya que el mecanismo de remoción predominante en este caso es el cernido, por lo que no importa si la arena está madura o no madura. La eficiencia se mantiene, inclusive con arenas de tamaño efectivo del orden de 0.615 mm. que sobrepasan el rango de 0.15 a 0.30 mm., normalmente recomendado.

En cambio, en el caso de la eficiencia de remoción bacteriológica, son muchos los estudios ejecutados con todo el rigor científico que indican que al remover la capa biológica, la eficiencia decae por lo menos en un tercio de la habitual y que puede llegar a anularse totalmente, si las condiciones de operación y mantenimiento no son adecuadas.

Para disminuir el impacto durante la operación de raspado del filtro, es necesario que esta operación se ejecute en un día para evitar la mortandad de los microorganismos benéficos en la capa de arena que permanecerá en el filtro y acortar el período de remaduración. En el caso de la operación de rearenado, esto es, cuando la altura del lecho ha llegado al mínimo aceptable (de acuerdo a recientes investigaciones, esta altura puede ser de hasta 0.30 m) y hay que restituir a la arena el espesor de diseño, será muy importante aplicar el método de trinchera, colocando la arena del fondo que esta semicolmatada en la superficie del filtro, sobre la arena nueva, para acelerar el período de maduración del lecho de arena.

### **6.3 Condiciones ambientales y calidad del agua cruda**

Las condiciones del agua cruda que más afectan la eficiencia del filtro son la temperatura, la concentración de nutrientes y de sustancias tóxicas y afluentes con turbiedad y color altos.

#### **a) Temperatura:**

En condiciones ambientales extremas se han detectado eficiencias que varían entre 0 y 90% (Huisman & Wood, 1974). La eficiencia de remoción de bacterias coliformes fecales puede reducirse de 99% a 20°C a 50% a 2°C; permaneciendo inalterables todas las condiciones restantes. En filtros operando con velocidades de 0.3 m/h y temperaturas de 4°C, con buenas condiciones de funcionamiento, no se han logrado producir efluentes con menos de 50 UFC/100 ml. Los antiguos sistemas de Londres se operan con velocidades de 0.20 m/h, obteniéndose filtrados con concentraciones de coliformes fecales menores de 10 UFC/100 ml.

En Suiza, Holanda y otros países desarrollados con temperaturas muy bajas, los filtros lentos se techan para conservar el calor y atenuar el efecto de la nieve y las heladas.

#### **b) Concentración de nutrientes:**

La velocidad de desarrollo de la formación biológica en el filtro depende de la concentración de nutrientes en el agua, debido a que ésta es la fuente de alimentación de los microorganismos. Experimentos realizados incrementando nutrientes a un filtro, indican que la formación de la capa

biológica se acelera tremendamente, comparativamente, con otro similar operando con la misma calidad de agua.

En regiones en las que se tiene bajas temperaturas, asociadas con bajas concentraciones de nutrientes en el afluente, el lecho del filtro puede demorar varios meses en madurar y alcanzar su máxima eficiencia de remoción bacteriológica.

c) Concentración de algas:

Las algas pueden llegar al filtro procedentes de los ríos, lagos y presas que alimentan estos sistemas. Son parte constituyente del schmutzdecke y, en concentraciones adecuadas, su efecto es beneficioso para el funcionamiento del filtro. Las algas mantienen el equilibrio biológico produciendo el oxígeno que requieren los predadores para su desarrollo y consumiendo el anhídrido carbónico que éstos exalan; además de actuar como un prefiltro sobre la superficie de la arena.

Sin embargo, bajo ciertas condiciones particularmente relacionadas con la disponibilidad de luz y nutrientes, como presencia de fosfatos y nitratos en el agua, pueden producirse grandes crecimientos de algas. Estos florecimientos o blooms de algas pueden crear serios problemas de operación y calidad de agua tratada, como bloqueo o colmatación prematura del lecho filtrante, producción de olor y sabor en el agua, incremento en la concentración de sustancias orgánicas solubles y biodegradables en el agua, incremento de las dificultades asociadas con la precipitación de carbonato de calcio y desarrollo de condiciones anóxicas. La carrera del filtro puede reducirse a un sexto de su período normal debido a un exagerado crecimiento de algas, aún en climas templados como el de Gran Bretaña. Durante su actividad fotosintética, las algas pueden reducir la capacidad buffer natural o amortiguadora del agua y el pH puede elevarse considerablemente, aún por encima de 10 u 11. Como consecuencia de esto, el hidróxido de magnesio y de calcio pueden precipitar sobre los granos de arena, afectando la eficiencia del proceso y las condiciones de operación del filtro.

Controlar las algas es difícil, pero puede solucionarse controlando los nutrientes en la fuente y el efecto de la luz cubriendo los reservorios de agua cruda.

En Europa este problema se controla techando los filtros, habiéndose encontrado que la falta de luz no afecta mayormente el proceso y la reducción de las algas permite operar con tasas más altas.

d) Concentraciones altas de turbiedad y color:

La capacidad de los filtros lentos para reducir la turbiedad y el color es muy limitada. El agua cruda no debe sobrepasar de 10 a 20 UNT por períodos prolongados, pudiendo aceptarse picos de 50 a 100 UNT por pocas horas, debido a que causan enlodamiento de la superficie del filtro, reduciendo la capacidad de remoción de la formación biológica del filtro y reduciendo dramáticamente la duración de la carrera de filtración. Hay casos en que los filtros se están raspando cada dos o tres días por esta causa, lo cual, además de afectar la calidad del agua producida, incrementa en forma exagerada los costos de operación y mantenimiento. En cuanto a color verdadero, la capacidad de remoción del filtro lento se limita a 40 ó 50 UC.

Este aspecto se puede controlar anteponiendo al filtro lento tantos procesos como sea necesario para adecuar el afluente a los límites de turbiedad estipulados para el filtro.

## 7. Conclusiones

Los sistemas de filtración lenta funcionando en Europa, Estados Unidos y Canadá, con una cultura de operación y mantenimiento bien desarrollada, reportan eficiencias de remoción de:

- Enterobacterias de 90 a 99%. La remoción de coliformes fecales es afectada por las bajas temperaturas, el incremento de las tasas de velocidad, el uso de arena muy gruesa, lechos muy superficiales, variación del contenido de nutrientes y remoción periódica de la capa biológica.
- Quistes de protozoos del orden de 99 a 99.99%, aún antes de madurar el filtro. Quistes de *Cryptosporidium* en un 48%. *Schistosoma cercarie*, casi totalmente.

Investigaciones desarrolladas a nivel latinoamericano indican también muy buenas eficiencias de remoción de microorganismos:

- a) Estudios realizados en la planta de Azpitia, Perú (Pardón, 1985), en un sistema constituido por sedimentador, prefiltro de flujo descendente de tres etapas y filtros lentos, reporta eficiencias parciales de remoción de coliformes fecales de 79.3% en la primera etapa del prefiltro, 51.4% en la segunda, 24.2% en la tercera y 92.4% en el filtro lento, esto es, una eficiencia total de 99.4%.
- b) Se reportan estudios realizados en 1992 en la Universidad Nacional de Rosario, Argentina, en condiciones controladas, en un sistema constituido por sedimentador y prefiltro de flujo horizontal previos al filtro lento. Se

evaluó turbiedad y coliformes fecales durante seis meses, encontrándose eficiencias de remoción de turbiedad de 60% en aguas claras y de hasta 98% con turbiedades altas. La eficiencia de remoción de coliformes fecales fue de 70%.

- c) Estudios realizados por la Universidad del Valle en Colombia (Lloid y otros, 1992) en siete sistemas de filtración lenta también similares a los anteriores indican que se está obteniendo un efluente con menos de 1 coliforme fecal/100 ml, antes de la desinfección. Los estudios efectuados demuestran que cuando las aguas están más contaminadas las eficiencias son mayores, obteniéndose reducciones de coliformes fecales de 2.6 a 5.5 niveles logarítmicos. Es posible que esto se deba, a que también hay una mayor cantidad de nutrientes en el agua cruda, lo cual ayuda a que el proceso sea más eficiente, como se analizó anteriormente.
- d) Cuando los sistemas están bien diseñados, operados y mantenidos, el efluente de las plantas de filtración lenta requiere de dosis muy bajas de cloro como última barrera; prácticamente sólo para asegurar que el agua conserve su calidad bacteriológica hasta ser consumida. Es una agua con muy bajo riesgo sanitario. La tecnología existe desde hace más de un siglo y adaptada por CEPIS a nuestra realidad de países en desarrollo, ha probado ser muy eficiente. El reto está en desarrollar una cultura operacional que permita un efluente de calidad uniformemente segura para ser directamente consumida sin mayor riesgo.

Por todo lo expuesto, es justo tener en cuenta a la Filtración Lenta como un proceso de remoción de microorganismos equivalente a la desinfección.

## **8. Referencias bibliográficas**

Huisman, L.; Wood, W.E. Slow sand filtration. WHO, Ginebra, 1974.

AWWA Research Foundation. Manual of design for slow sand filtration. USA, 1991.

Pardón Ojeda, Mauricio; Lloyd, Barry J. Slow sand filtration response to acute variations of influent bacteriological water quality.

Fogel, Doug; Isaac-Reuton, Judith; Guasparini, Roland; Moorehead, William; Ongerth, Jerry E. Removing Giardia and Cryptosporidium by slow sand filtration. Journal AWWA, noviembre. 1993.

Ingallinella, Ana María; Barberis, A.; Mingolla, G.; Bachuer, Jorge Alberto; Rodríguez, J. Experiencias en filtración gruesa horizontal en la República Argentina. AIDIS, 1992.

Galvis, Gerardo; Vischer, Jan Teun; Lloyd, Barry. Multi-stage surface water treatment for community water supply in Colombia. *Waterlines: Journal of appropriate water supply and sanitation technologies*, enero 1992.

CEPIS/OPS. Programa Regional HEP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Serie: Filtración Lenta. Manual II – Diseño, junio 1992.