

## **CAPÍTULO 3**

### **FILTRACIÓN**

#### **3.1 Definiciones**

La filtración es la remoción de partículas suspendidas, disueltas y coloidales (turbiedad) del agua, haciéndola pasar a través de un medio poroso, que puede ser arena, antracita, algún material prefabricado, etc.

##### ***3.1.1 Sólidos suspendidos y disueltos***

Los sólidos pueden ser partículas orgánicas (microorganismos) o partículas inorgánicas (componentes del suelo) que deben removerse del agua porque adsorben otros compuestos, aumentan la demanda de desinfectante, pueden ser biodegradables, pueden ser patógenos, incrementan el potencial de formación de DBPs (productos cancerígenos derivados de la desinfección), etc.

Los sólidos se clasifican en suspendidos y disueltos con la ayuda de un filtro de poro nominal del 0.45  $\mu$ . Los sólidos retenidos en la membrana son suspendidos; los que pasan a través de ella se consideran disueltos. Para estimar la presencia de sólidos orgánicos disueltos se usa radiación UV a 254 nanómetros (nm).

### **3.1.2 *Turbiedad***

Es una medición de la capacidad del agua para absorber o refractar la luz. Se mide en UTN (unidades de turbiedad nefilométricas). La turbiedad puede proteger a los microorganismos patógenos de los efectos del desinfectante utilizado en el tratamiento, por lo tanto es necesario removerla del agua.

## **3.2 Clasificación de los filtros**

Un filtro convencional consta de un tanque de algunos metros de profundidad, en el cual se coloca el lecho filtrante sobre un sistema adecuado de drenaje. El flujo pasa del frente del tanque a los drenes del fondo atravesando el medio filtrante.

### **3.2.1 *Según el medio filtrante utilizado***

- Arena silícea
- Antracita
- Granate
- Ilmenita
- Magnetita
- Grava

- Cáscara de coco, pistache, cacahuete, etc.
- Pastas arcillosas
- Mixtos

### ***3.2.2 Según la velocidad de filtración***

- Filtros lentos
- Filtros rápidos

### ***3.2.3 Según la profundidad del lecho***

- Filtros convencionales ( $L = 0.6 - 0.75$  m)
- Filtros profundos ( $L = 0.9 - 2.40$  m)

### ***3.2.4 Según el sentido del flujo***

- Flujo ascendente
- Flujo descendente
- Flujo mixto
- Flujo horizontal

### ***3.2.5 Según la carga sobre el lecho filtrante***

- Filtros presurizados (sistema de bombeado)
- Filtros por gravedad

## **3.3 Mecanismos responsables de la filtración**

La remoción de partículas suspendidas del agua (de tamaño muchísimo más pequeñas que los poros del medio filtrante) no se realiza solamente por el simple efecto físico de cernido, sino involucra 2 tipos de mecanismos, que varían según sea el tamaño de las partículas, su densidad y características electroquímicas.

Aunque no todos los mecanismos necesariamente actúan al mismo tiempo, más de uno deberá entrar en acción para transportar y adherir los diferentes tamaños de partículas al medio filtrante.

### ***3.3.1 Mecanismos de transporte***

Las partículas se transportan dentro de los poros del medio filtrante debido a fenómenos físicos e hidráulicos, influenciados por los factores que gobiernan la transferencia de masas. Los siguientes son los mecanismos que pueden realizar el transporte.

#### 3.3.1.1 Cernido

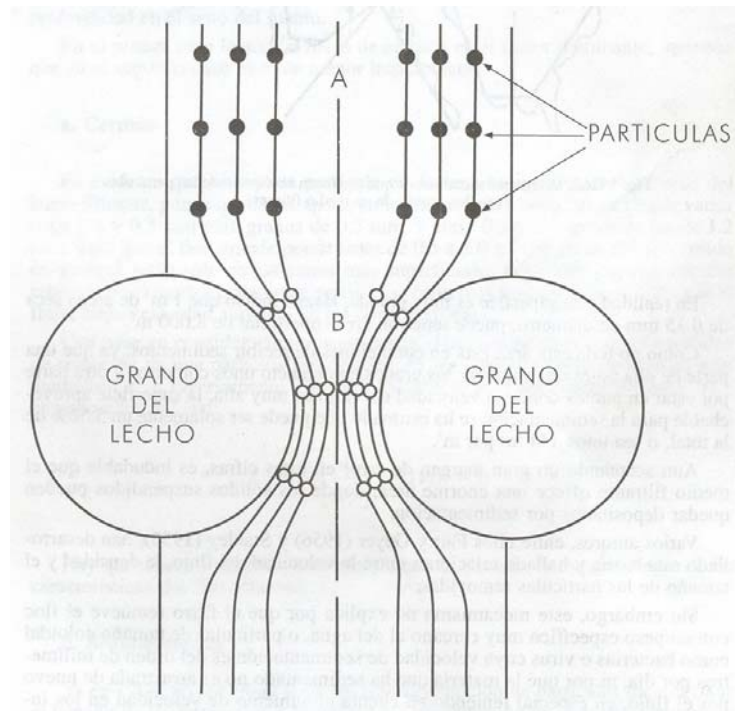
Ocurre cuando las partículas son de mayor tamaño que los poros del lecho filtrante y por lo tanto quedan atrapadas en los intersticios. En general sólo actúa en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo, cuya velocidad aumenta en las constricciones.

#### 3.3.1.2 Sedimentación

La remoción de partículas menores que el tamaño de los poros puede hacerse por sedimentación de ellas en la superficie de los granos del medio filtrante. La sedimentación sólo se puede producir con material suspendido relativamente grande (mayor de  $1\ \mu\text{m}$ ) y denso cuya velocidad de asentamiento sea alta, y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja.

#### 3.3.1.3 Intercepción

A velocidades bajas el régimen de flujo es generalmente laminar y, por lo tanto, las partículas contaminantes se mueven a lo largo de líneas de corriente. En la constricción las partículas contaminantes que viajan cerca son removidas por contacto con el lecho o con otras partículas ya depositadas o adheridas a él. La siguiente figura esquematiza esta idea:



**Figura 3.1** Contacto casual de las partículas con el medio filtrante (Arboleda, 2000)

La intercepción es más efectiva a medida que el tamaño de las partículas aumenta. La eficiencia del filtro debida a la intercepción es directamente proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula e inversamente proporcional al diámetro del grano.

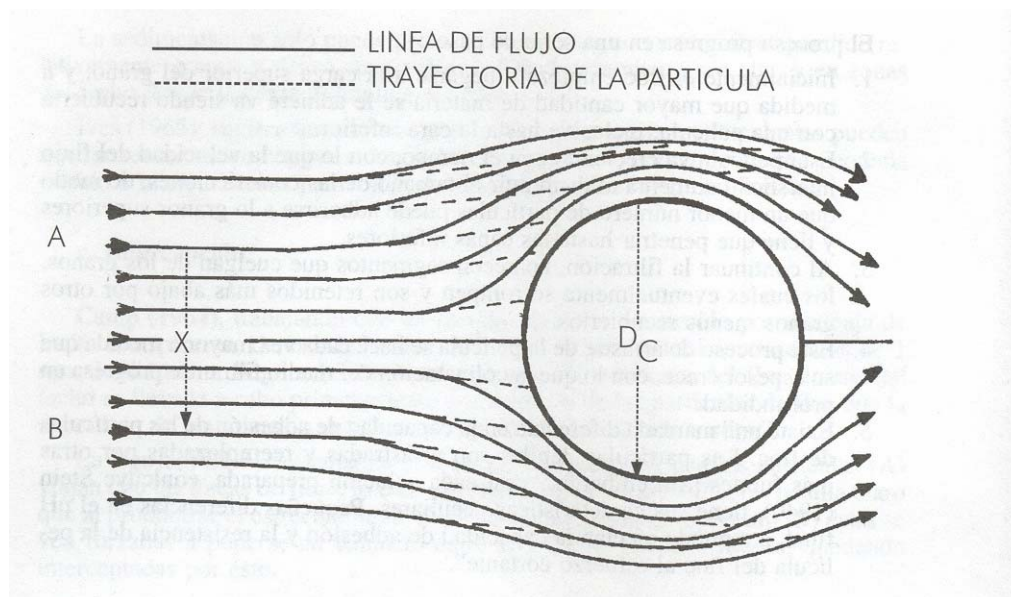
#### 3.3.1.4 Difusión (movimiento browniano)

Es el movimiento errático de las partículas pequeñas (con tamaño  $< 1 \mu\text{m}$ , que son la mayoría de las partículas que llegan al filtro), que depende de la energía térmica del agua y controla el impacto con el medio poroso. Las partículas pequeñas tienden a difundirse desde las áreas de mayor concentración a las áreas de menor concentración. Por esto se pueden encontrar sólidos adheridos a los granos del medio filtrante en puntos donde la velocidad del

flujo es prácticamente nula. La eficiencia del filtro debida a la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro de la partícula y del grano. La influencia de la difusión en la acción del manto filtrante en profundidad es pequeña dado que la relación entre el diámetro de la partícula y el del grano está estimada entre 0.0002 y 0.6.

### 3.3.1.5 Impacto inercial

Cuando la velocidad del flujo es alta y las partículas son grandes, los efectos de la inercia pueden hacer que aquellas sigan una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo. Esto implica que al pasar una suspensión alrededor de un obstáculo, como sucede en la siguiente figura, mientras las líneas de flujo se curvan, las partículas continúan su trayectoria original debido a la inercia y chocan con el grano del filtro adhiriéndose a él.

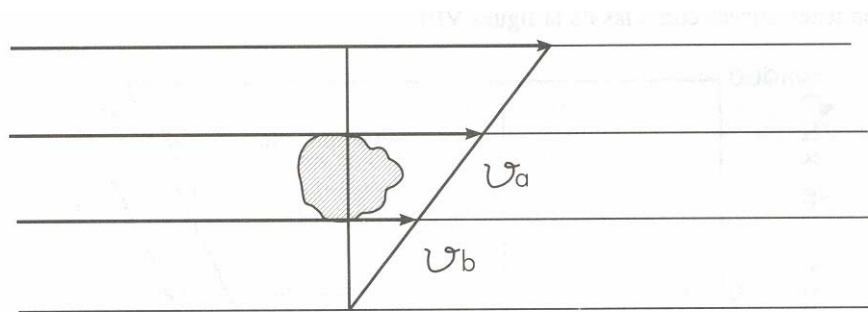


**Figura 3.2** Impacto inercial (Arboleda, 2000)

La eficiencia de este mecanismo es directamente proporcional a la velocidad del flujo e inversamente proporcional al diámetro del medio filtrante. Sin embargo, la viscosidad del fluido hace difícil que la materia suspendida pueda adquirir suficiente cantidad de movimiento como para que el impacto inercial sea significativo.

### 3.3.1.6 Acción hidrodinámica

El gradiente de velocidades puede provocar que las partículas de tamaño relativamente grande en un medio viscoso en movimiento laminar puedan tener en sus extremos velocidades diferentes, como se muestra en la Figura 3.3. La diferencia de esas velocidades hace girar a la partícula, produciendo una diferencia de presión perpendicular al escurrimiento, lo cual provoca que la partícula sea conducida a una región de velocidad menor.



**Figura 3.3** Acción hidrodinámica (Arboleda, 2000)

### 3.3.1.7 Efecto gravitacional

En la filtración las fuerzas gravitacionales son más importantes que las inerciales.



### 3.3.2 *Mecanismos de adherencia*

La adherencia entre las partículas suspendidas y los granos del lecho filtrante depende de las características de ambos. Las partículas se adhieren al medio poroso siempre y cuando resistan las fuerzas ejercidas por el flujo del agua. Esto se debe a fenómenos de acción superficial que son influenciados por parámetros físicos y químicos. Hay varios fenómenos químicos y electroquímicos que controlan la efectividad de la adherencia de las partículas al medio filtrante, los más importantes de los cuales se mencionan a continuación.

#### 3.3.2.1 Fuerzas de Van der Waals

Son las principales responsables de la adhesión de las partículas a los granos del filtro. Son independientes del pH y de las características de la fase acuosa. Dependen de la densidad y tamaño de las partículas, así como de la distancia entre éstas y los granos del filtro.

#### 3.3.2.2 Fuerzas electrostáticas o coulómbicas

Se pueden considerar tres casos:

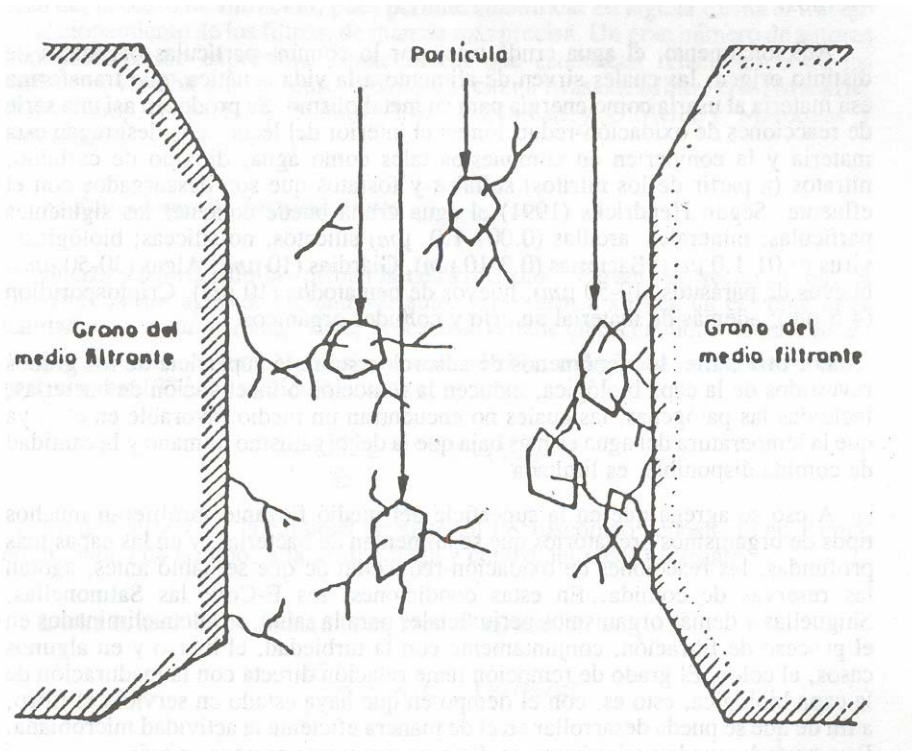
- a) Los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas tienen diferente carga eléctrica. Entonces existe una fuerza de atracción entre el medio y las partículas, lo que hace que cuando éstas se acercan a los granos del lecho, se produzca atracción y

adhesión.

- b) Los granos del medio tienen carga y las partículas no. En este caso no hay ninguna barrera de energía que impida que cuando las partículas se pongan en contacto con el medio terminen adheridas al mismo.
- c) Los granos del medio filtrante y las partículas tienen la misma carga. En este caso existe repulsión entre ellos. Sin embargo aún en este caso las fuerzas hidrodinámicas pueden ocasionalmente vencer la barrera de energía y aproximar las partículas lo suficiente como para que las fuerzas de Van der Waals puedan actuar. La probabilidad de adherencia de las partículas es menor que en los casos anteriores.

### 3.3.2.3 Puente químico

Si se inyectan ayudantes de filtración o poli electrolitos aumenta la adherencia de la materia suspendida al medio filtrante ya que este material intermediario forma segmentos que se extienden en el agua y pueden establecer un enlace químico entre partículas y entre éstas y el medio filtrante. Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van der Waals y de las cargas electrostáticas. La Figura 3.4 explica este proceso:



**Figura 3.4** Esquema de la acción de los polímeros en un medio granular (Arboleda, 2000)

### 3.4 Modelos matemáticos de la filtración

A pesar de todos los esfuerzos, no existe hasta ahora un modelo matemático que describa con precisión el comportamiento de los filtros y permita calcular los parámetros que afectan su funcionamiento. Entre los autores que han desarrollado expresiones matemáticas que establecen relaciones entre las diferentes variables del proceso, se encuentran Iwasaki, Mackrle, Shekhtman, Deb, Yao, Payatakes, Habibbian, Ginn, Adin y Rebhun, Mintz y Krisful, Ives y Clough, Camp y Stein, O'Melia y Stumm, Maroudas y Einsenklan, etc.

### 3.5 Parámetros de diseño de filtros

Existen varios factores que, en conjunto, son responsables del comportamiento del filtro. La eficiencia de la filtración generalmente se mide con el parámetro de turbiedad (la NOM establece 5 UTN como límite).

Por otra parte, la velocidad de filtración es inversamente proporcional a la eficiencia del filtro. La velocidad  $v_F$  en que pasa el agua por el medio filtrante se mide como tasa de filtración o carga superficial  $q_F$ , (cociente entre el caudal  $Q$  y el área filtrante  $A_F$ ) con la siguiente expresión:

$$q_F = \frac{Q}{A_F} = v_F \quad (3.1)$$

La tasa de filtración se mide normalmente en  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ , mientras que la velocidad de filtración suele indicarse en  $\text{m}/\text{hr}$  o  $\text{cm}/\text{s}$ .

El medio filtrante también influye en la eficiencia de la filtración ya que ésta es inversamente proporcional al diámetro de las partículas del filtro.

Las características físicas y químicas de la suspensión afectan el comportamiento de los filtros y la turbiedad del agua que se produce de manera a veces más significativa que el tamaño y clase de medio filtrante que se usa.

De las características físicas, a mayor volumen de la partícula más rápido se llenan los poros del filtro y el gradiente hidráulico aumenta más rápidamente. Las fuerzas de Van der Waals aumentan con la densidad de las partículas. Además el tamaño de las partículas determina los tamaños de las mismas que son retenidas en el proceso.

Por el lado químico, a pH alto la concentración de iones (OH) es alta y por lo tanto el potencial zeta es más electronegativo. A pH bajo predominan los iones H<sup>+</sup> y por lo tanto el P.Z. tiende a ser positivo. En otras palabras a mayor pH el P.Z. es más electronegativo y la turbiedad va disminuyendo hasta un valor mínimo, a partir del cual vuelve a aumentar a medida que el pH sigue aumentando. Por lo tanto existe un valor óptimo de pH para filtrar el agua.

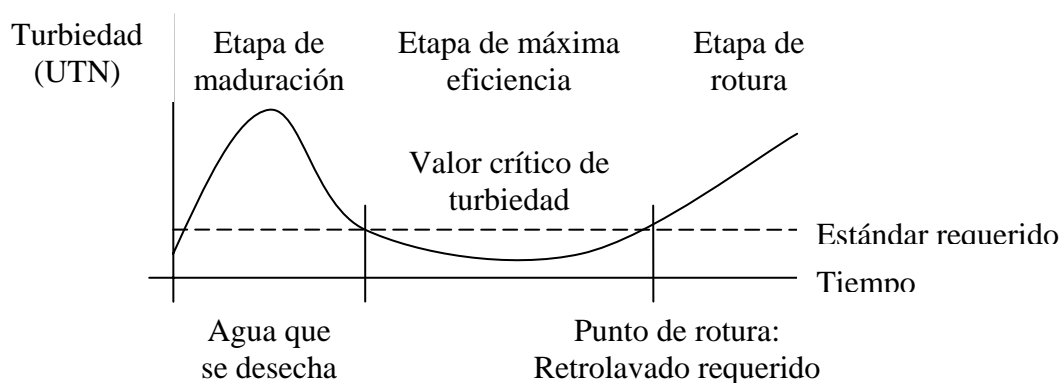
En general los mecanismos físicos y químicos de la filtración se aceleran a mayores temperaturas.

### **3.6 Retrolavado de los lechos de filtrado**

El filtro sólo puede producir agua con determinada calidad durante un periodo de tiempo fijo, a partir del cual empiezan a quedar impurezas en el agua filtrada. Esto se debe a que las partículas removidas en la parte superior del lecho filtrante forman un manto con las impurezas retenidas por la filtración que obstruye el paso del flujo e impide el uso de la parte profunda del filtro. Por eso, el medio poroso debe regenerarse periódicamente dándole un

retrolavado a presión para desalojar esas impurezas y así restaurar la eficiencia del proceso. El momento en que el filtro debe retrolavarse se llama punto de rotura. Las impurezas son enviadas al sistema de drenaje.

Al principio de la filtración, es decir cuando el filtro está limpio (ya sea nuevo o después de haberlo lavado), éste tiene un periodo inicial de maduración en que la turbiedad del agua filtrada es alta. Por ello se desecha el agua filtrada durante los primeros 3 a 5 minutos. Después sigue un periodo de buena calidad que se debe a que las impurezas (hasta cierto punto) contribuyen a que se adhieran más partículas a los granos del filtro. Por último se da el paso de las impurezas a través del lecho como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 3.5** Forma de trabajo de un filtro

Otra razón por la que se lava el filtro es para disminuir la pérdida de carga producida por la fricción que el fluido sufre al atravesar los poros del lecho filtrante. Al comenzar la operación del filtro, los granos del lecho están limpios y la pérdida de carga se debe solamente al tamaño, forma y porosidad (características hidráulicas) del medio filtrante y a la viscosidad

y velocidad del agua. Las partículas que se remueven del agua van poco a poco recubriendo los granos del lecho incrementando sus diámetros y disminuyendo su porosidad inicial, con lo cual la pérdida de carga se incrementa debido a la disminución del área de paso del flujo. Se observa entonces que existe una pérdida de carga inicial y una pérdida de carga por colmatación que es función del tiempo.

Se suele retrolavar cuando la pérdida alcance de 6 a 9 ft. El agua pasa a través del lecho de filtrado debido al efecto combinado de una carga positiva y un efecto de succión proveniente del fondo.

En general, un filtro rápido se debe lavar una vez cada 24 horas con una tasa de 15 gpm/ft<sup>2</sup> por 5 a 10 minutos.

El lavado se puede hacer:

- Raspando las capas superficiales, lavándolas por separado y volviéndolas a colocar en el filtro (para filtros lentos).
- Invertiendo el sentido del flujo en el filtro, inyectando agua a presión en los drenes y recolectándola en la parte superior (para filtros rápidos). Esta operación dura unos 5 a 15 minutos más o menos.