

Evaluación de filtros de arena y de malla para riego por goteo

GERMAN MENDOZA RONCANCIO
Ingeniero Agrícola
Departamento de Ingeniería Agrícola
Facultad de Ingeniería

FERNANDO A. PINILLA P.
Ingeniero Agrícola

FERNANDO MARTINEZ Q.
Ingeniero Agrícola

INTRODUCCION

El estudio del mecanismo de filtración y de los filtros empleados en la limpieza del agua para riego, es de gran importancia porque de su conocimiento y funcionamiento depende en gran medida la vida útil de un sistema de riego por goteo.

Actualmente existen en Colombia empresas que fabrican filtros de arena y malla para sistemas de riego por goteo, carentes de información respecto al mecanismo de filtración y a la forma como funcionan realmente los filtros que producen. Con este trabajo se quiere llenar ese vacío y proponer, además, una metodología para las evaluaciones del filtro de arena, con una rata de filtrado de 100 galones por minuto (gpm) y del filtro de malla de 100 mesh, para la misma rata de filtrado, por ser más utilizados en las instalaciones de este tipo de sistema de riego.

Teorías sobre el fenómeno de la filtración en medios porosos

Se ha desarrollado una serie de teorías que podrían clasificarse como físicas, electroquímicas y biológica que tratan de explicar el fenómeno de filtración, sin que hasta ahora ninguna de ellas lo cuantifique exactamente, razón por la cual sólo se hará mención de las teorías:

Teorías físicas

1. Teoría de la sedimentación (Hazen)
2. Teoría del impacto inercial (Craft)
3. Teoría del contacto casual (Stein)

Teorías electroquímicas

1. Teoría de la difusión (Stanley)
2. Teoría de las fuerzas de Van der Wall
3. Teoría del potencial de Hidrógeno (pH).
4. Teoría de la floculación (Fair)

Teoría biológica

PREFILTRADO DEL AGUA DE RIEGO

Existen elementos de prefiltrado que realizan una limpieza preliminar del agua de riego que circulará por los filtros de arena y de malla de la estación

de filtrado. Estos dispositivos ayudan a conservar la vida útil de los filtros (de arena y de malla) y a la vez alivian el trabajo de los mismos durante el proceso de filtración.

Cuando el agua de riego proviene de embalses o de corrientes de agua con abundante turbidez, es conveniente colocar antes de la bomba un depósito sedimentador, que separa las arenas mediante la fuerza de la gravedad. El tipo más utilizado es el tanque sedimentador de flujo en una sola dirección.

Otro dispositivo empleado para la prefiltración es el hidrociclón, que consta de una estructura rígida (metálica) con forma de cono invertido y un tanque recolector de sedimentos en la parte inferior. El agua entra tangencialmente y por la fuerza centrífuga separa las partículas presentes en el agua de riego, principalmente las arenas. Se debe colocar a la salida de la motobomba y antes de la estación de filtrado.

Pérdida de carga total en un lecho filtrante (H)

El paso de un fluido por un medio poroso genera una pérdida de energía (H) en el fluido debido a la fricción. Si el fluido es agua para el valor H, permanecerá constante; pero si contiene sólidos en suspensión o en disolución, éstos se acumularán progresivamente sobre la superficie del lecho creando una capa que irá penetrando los poros del grano, lo cual se manifiesta como una disminución de la porosidad del lecho filtrante y por consiguiente un aumento en la pérdida de carga H con el tiempo de operación.

La pérdida de carga total H puede expresarse como:

$$H = hf + h'_0(t) + h''_0(t)$$

donde hf = pérdida de carga inicial.

$h'_0(t)$ = pérdida de carga producida por la capa superficial de impurezas que se forma en el lecho con el tiempo (t).

$h''_0(t)$ = pérdida de carga producida por disminución de la porosidad del lecho con el tiempo (t).

Para determinar la primera y segunda pérdida de carga se han establecido ecuaciones; pero para determinar la última pérdida de carga no existe ninguna fórmula valedera, razón por la cual no ha sido posible predecir la pérdida de carga total H en un filtro después de un tiempo de trabajo definido y un agua con características específicas de impurezas.

Ecuación de Fair y Hatch

Fair y Hatch propusieron la siguiente expresión para la determinación de la pérdida inicial (hf) en el filtro:

$$hf = f \frac{LY}{D^2} \frac{v}{g}$$

Para aplicar la ecuación [1] en medios porosos se hacen las siguientes suposiciones:

a. El diámetro (D) se hace igual al radio medio hidráulico (R), es decir:

$$R = D/4 \text{ ó } D = 4R$$

b. Utilizando el concepto de porosidad (p), el radio medio hidráulico (R) puede escribirse como:

$$R = \left(\frac{p}{1-p} \right)^{1/3} \left(\frac{V}{A} \right)$$

c. La velocidad promedio del fluido (V) en el lecho de arena es igual a la velocidad de aproximación (V_s) del fluido al lecho dividida por la porosidad (p):

$$V = V_s/p$$

d. La longitud L se hace igual a la profundidad del lecho.

Remplazando las anteriores expresiones en la ecuación [1] ésta se transforma en:

$$hf = \frac{f' L \gamma}{g} \frac{V_s}{p} \left[\frac{1-p}{p} \frac{A}{V} \right]^2 \quad [2]$$

donde:

hf = pérdida de carga (L).

f' = constante adimensional que resulta de $f/16$.

L = profundidad del lecho filtrante (L).

V_s = velocidad de aproximación del fluido (LT^{-1}).

p = porosidad del lecho.

γ = viscosidad cinemática (L^2T^{-1}).

g = aceleración de la gravedad (LT^{-2}).

A = área superficial de un grano de arena del lecho filtrante (L^2).

V = volumen de granos del lecho filtrante (L^3).

En la aplicación de la fórmula [2] es necesario considerar los siguientes casos:

- Que las partículas sean esféricas y de diámetro uniforme.
- Que las partículas no sean esféricas pero tengan diámetro uniforme.
- Que las partículas no sean esféricas ni de diámetro uniforme, ni estén estratificadas en el lecho.
- Que las partículas no sean esféricas ni de diámetro uniforme, pero estén estratificadas en el lecho.

Se remitirá a considerar exclusivamente el caso c, por ser el que se presenta en los filtros de arena.

En el caso c, se considera la dispersión de las partículas de la siguiente forma:

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{Ce} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}$$

donde:

x_i = tanto por ciento de la arena retenida entre dos tamices consecutivos cuando se hace el ensayo de granulometría.

di = diámetro promedio de estos dos tamices.

Sustituyendo en la ecuación (2), se tiene:

$$hf = \frac{f' L \gamma}{g} \frac{Vs}{p} \left[\frac{1-p}{p} \frac{6}{Ce} \sum_{i=1}^n \frac{xi}{di} \right]^2 \quad (3)$$

Ecuación de Rose

Rose desarrolló la siguiente expresión para determinar la pérdida de carga hidráulica inicial en un filtro:

$$hf = f'' \frac{L}{d} \frac{1}{p^4} \frac{Vs^2}{g} \quad (4)$$

donde:

hf = pérdida de carga (L).

f'' = factor de fricción (adimensional).

L = Longitud o espesor del lecho filtrante (L).

d = diámetro de las partículas del lecho filtrante (L).

p = porosidad del lecho filtrante (adimensional).

Vs = velocidad de aproximación del fluido (LT⁻¹).

g = aceleración de la gravedad (LT⁻²).

Se encontró que el factor de fricción (f'') se podía relacionar con el coeficiente de roce Cr :

$$f'' = 1,067 Cr$$

donde:

$$Cr = \frac{24}{Nr} + \frac{3}{\sqrt{Nr}} + 0,34$$

y el factor Nr se puede determinar como:

$$Nr = \frac{Ce d Vs}{\gamma}$$

donde:

Ce = coeficiente de esterilidad (adimensional)

d = diámetro de las partículas del lecho filtrante (L).

Vs = velocidad de aproximación del fluido (LT⁻¹).

γ = viscosidad cinemática (L²T⁻¹).

Cuando las partículas del lecho filtrante no son esféricas ni de tamaño uniforme y no están estratificadas en el lecho, la ecuación (4) se convierte en:

$$\Delta hf = 1,067 \frac{1}{p^4} \frac{Vs^2}{gCe} Cr \frac{\Delta L}{d}$$

como:

$$hf = \sum_{i=1}^n \Delta hfi$$

entonces:

$$hf = 1,067 \frac{1}{p^4} \frac{Vs^2}{gCe} \sum_{i=1}^n Cri \frac{\Delta Li}{di}$$

pero como:

$$\Delta Li = xi L$$

reemplazando se obtiene:

$$hf = 1,067 \frac{1}{p^4} \frac{Vs^2}{gCe} L \sum_{i=1}^n \frac{Cri xi}{di} \quad (5)$$

Mediante la pérdida de carga inicial se puede evaluar el comportamiento de un lecho filtrante.

Cuando las pérdidas iniciales son muy altas, disminuye el período de funcionamiento del filtro. En otras palabras, como la pérdida de carga total es función de la pérdida de carga inicial, de la pérdida de carga producida por la capa superficial de impurezas y de la pérdida de carga producida por la disminución de la porosidad del lecho con el tiempo, cuando hf es grande, las dos restantes, que son función del tiempo, deben ser pequeñas, para lo cual el tiempo de funcionamiento debe ser muy corto, siendo necesario lavar el filtro con intervalos breves de tiempo, produciendo serios inconvenientes en el funcionamiento de la estación de filtrado.

CARACTERISTICAS DE LOS FILTROS EVALUADOS

Filtro de arena a presión

Los filtros a presión son filtros de arena rápidos, encerrados en un tanque metálico. La rata de filtración, el lavado, el drenaje y el lecho filtrante son similares a los de los filtros rápidos por gravedad.

Un filtro de arena a presión consta de las siguientes partes (ver Figura 1):

—Tanque o cuerpo cilindro: es una estructura metálica que contiene el lecho filtrante.

—Pantalla difusora: está colocada a la entrada del agua (a presión) para distribuirla uniforme-

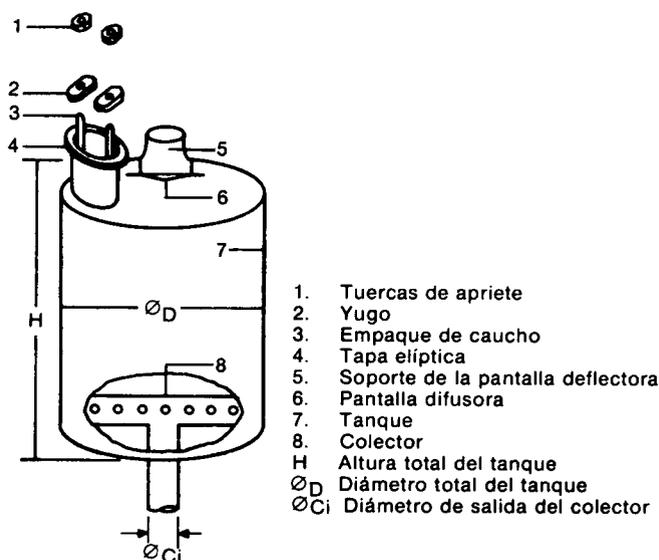


FIGURA 1. Filtro de arena

mente sobre el lecho filtrante.

- Lecho filtrante: conformado por una capa de arena y una capa de grava en forma descendente (lecho convencional).
- Colector: denominado "sistema de drenaje", está conformado por una tubería principal, al lado y lado de la cual se conectan tubos perforados y su función es coleccionar el agua filtrada.

Filtro de malla

El filtro de malla esta conformado por una estructura metálica en cuyo interior va un cilindro concéntrico recubierto con una malla plástica o de acero inoxidable para evitar que sea atacada por los fertilizantes aplicados con el agua de riego.

El proceso de filtrado ocurre porque el tamaño de los orificios de la malla permite el paso de materiales de un tamaño inferior al diámetro de éstos, separando así las partículas extrañas.

Los elementos componentes del filtro de malla se aprecian en la Figura 2.

De acuerdo con Medina (4), los filtros de malla se caracterizan por la densidad de orificios que hay en una pulgada lineal; esto es lo que se denomina número mesh. Mientras más orificios haya, mayor será el número mesh y menor el tamaño de las partículas que deja pasar.

Existe una equivalencia entre el número mesh y

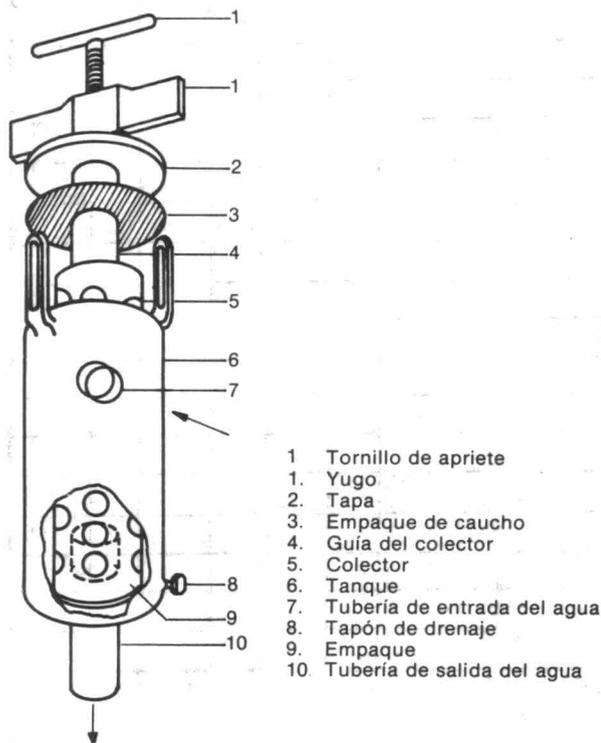


FIGURA 2. Filtro de malla.

el tamaño del orificio de la malla (mm), como se aprecia en la siguiente tabla:

mesh	φ mm	mesh	φ mm	mesh	φ mm
4	3.5	30	0.5	120	
6	2.5	50	0.3	155	
10	1.5	75	0.2	200	
20	0.8	120	0.13	400	0.02

Una regla que debe seguirse es la utilización de mallas con orificios cuyo diámetro sea la décima parte del diámetro del orificio del gotero. Por ejemplo si el orificio del gotero tiene un diámetro de 1 mm, se debe utilizar una malla de 155 mesh, es decir, con diámetro de 0.10 mm.

La colocación de mallas más densas provoca obstrucciones frecuentes en los filtros y, por tanto, pérdidas de tiempo en limpiezas, que en ocasiones, resultan engorrosas de realizar.

ENSAYOS EFECTUADOS

Ensayos de Laboratorio

- Granulometría: de la arena y de la grava.
- Ensayo de permeabilidad (método de cabeza constante).
- Ensayo de porosidad: de la arena y de la grava.
- Curva característica del filtro de arena (pérdidas de presión).
 - Lecho convencional.
 - Lecho invertido.

Ensayos de campo

- Caída de presión en el filtro de arena con flujo descendente.
 - Lecho convencional
 - Lecho invertido
- Caída de presión en el filtro de arena con flujo ascendente.
 - Lecho convencional
 - Lecho invertido
- Caída de presión en el filtro de malla.

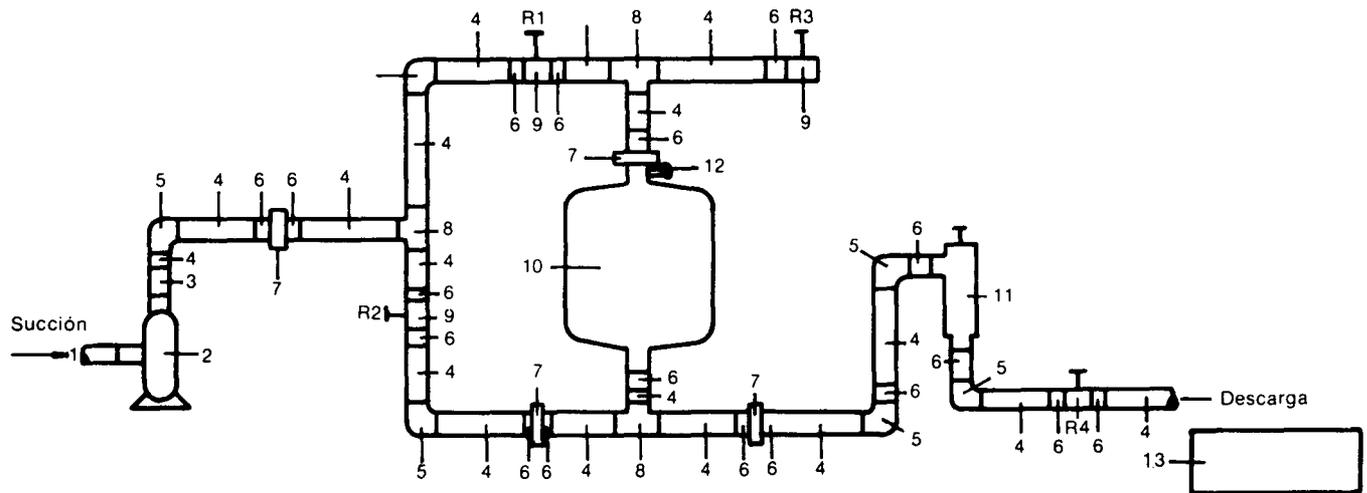
Para cada uno de los ensayos, de campo se realizaron 5 pruebas con el fin de obtener valores representativos. En la Figura 3 se aprecia el esquema de la instalación.

Ensayo de sólidos suspendidos totales, de las pruebas realizadas a nivel de campo

RESULTADOS Y ANALISIS

Ensayos de laboratorio

1. Granulometría de la arena. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 4. De la curva de granulometría se obtiene:



- LISTA DE PARTES:
 "Todos los accesorios son de diámetro 3"
- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1. Tubería de succión | 6. Adaptador macho roscado en PVC |
| 2. Bomba centrífuga 2020 HC - Bomba de motor de 16 HP a gasolina. | 7. Universal galvanizada |
| 3. Nipple galvanizado | 8. Tee |
| 4. Tramo de tubería PVC | 9. Registro de compuerta |
| 5. Codo PVC de 90° de radio corto | 10. Filtro de arena |
| | 11. Filtro de malla |
| | 12. Manómetro de agua |
| | 13. Tanque de aforo |

FIGURA 3. Instalación para el proceso de filtrado.

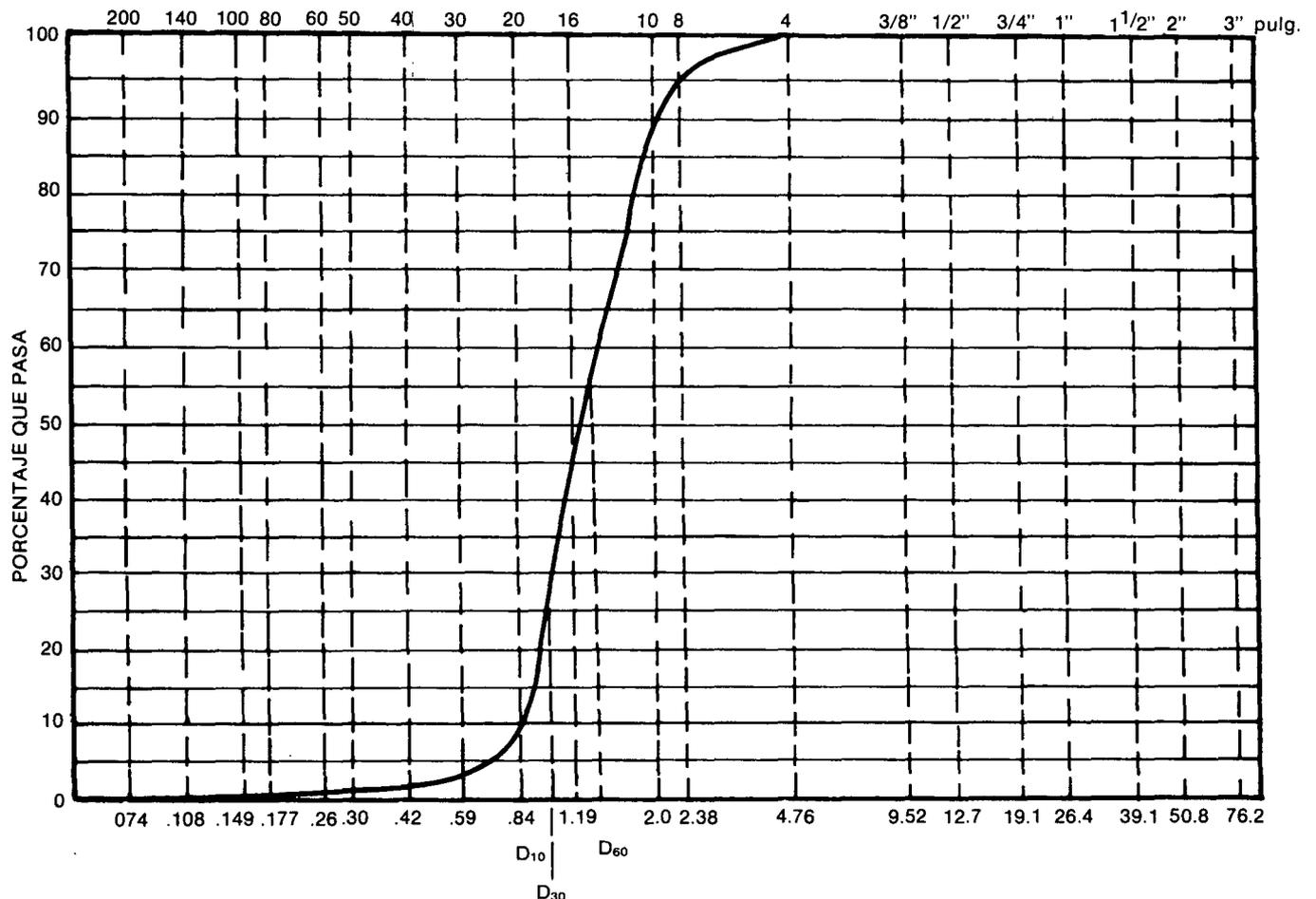


FIGURA 4. Granulometría de la arena.

$$\begin{aligned} D_{10} &= 0.84 \text{ mm} \\ D_{30} &= 1.05 \text{ mm} \\ D_{60} &= 1.43 \text{ mm} \end{aligned}$$

El coeficiente de uniformidad (Cu) se obtiene de

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{1.43}{0.84} = 1.70$$

El coeficiente de gradación (Cg) se define como:

$$C_g = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{(1.05)^2}{0.84 \cdot 1.43} = 0.92$$

Las arenas se consideran bien gradadas cuando el Cu > 6 y el Cg está entre 1 y 3. En este caso la arena no es bien gradada pero sí uniforme.

Al observar la Figura 4 se aprecia que aproximadamente el 80% de las partículas de arena están comprendidas entre los tamices 10 y 20, lo que quiere decir que es una arena 10-20.

—Granulometría de la grava

Los datos conseguidos se resumen en la Figura 5 de la curva de granulometría de la grava, obteniéndose:

$$\begin{aligned} D_{10} &= 0.94 \text{ mm} \\ D_{30} &= 2.59 \text{ mm} \\ D_{60} &= 3.92 \text{ mm} \end{aligned}$$

El coeficiente de uniformidad (Cu) es:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{3.92}{0.94} = 4.17$$

El coeficiente de gradación (Cg) es:

$$C_g = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} = \frac{(2.59)^2}{(0.94)(3.92)} = 1.82$$

La grava se considera bien gradada cuando el Cu > 4 y el Cg están entre 1 y 3; como los dos criterios se cumplen, se deduce su correcta gradación. En la gráfica 5 se observa que está muestra una curva ligeramente extendida, lo que significa que presenta un alto porcentaje de finos (alrededor del 25%).

2. Permeabilidad (k)

El cálculo de la permeabilidad de la arena obtuvo el siguiente valor:

$$K = 0,214 \text{ cm/seg} = 770,4 \text{ cm/hr.}$$

El valor obtenido para la grava fue de:

$$K = 0,272 \text{ cm/seg} = 979,2 \text{ cm/hr}$$

El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) ha propuesto una escala de siete

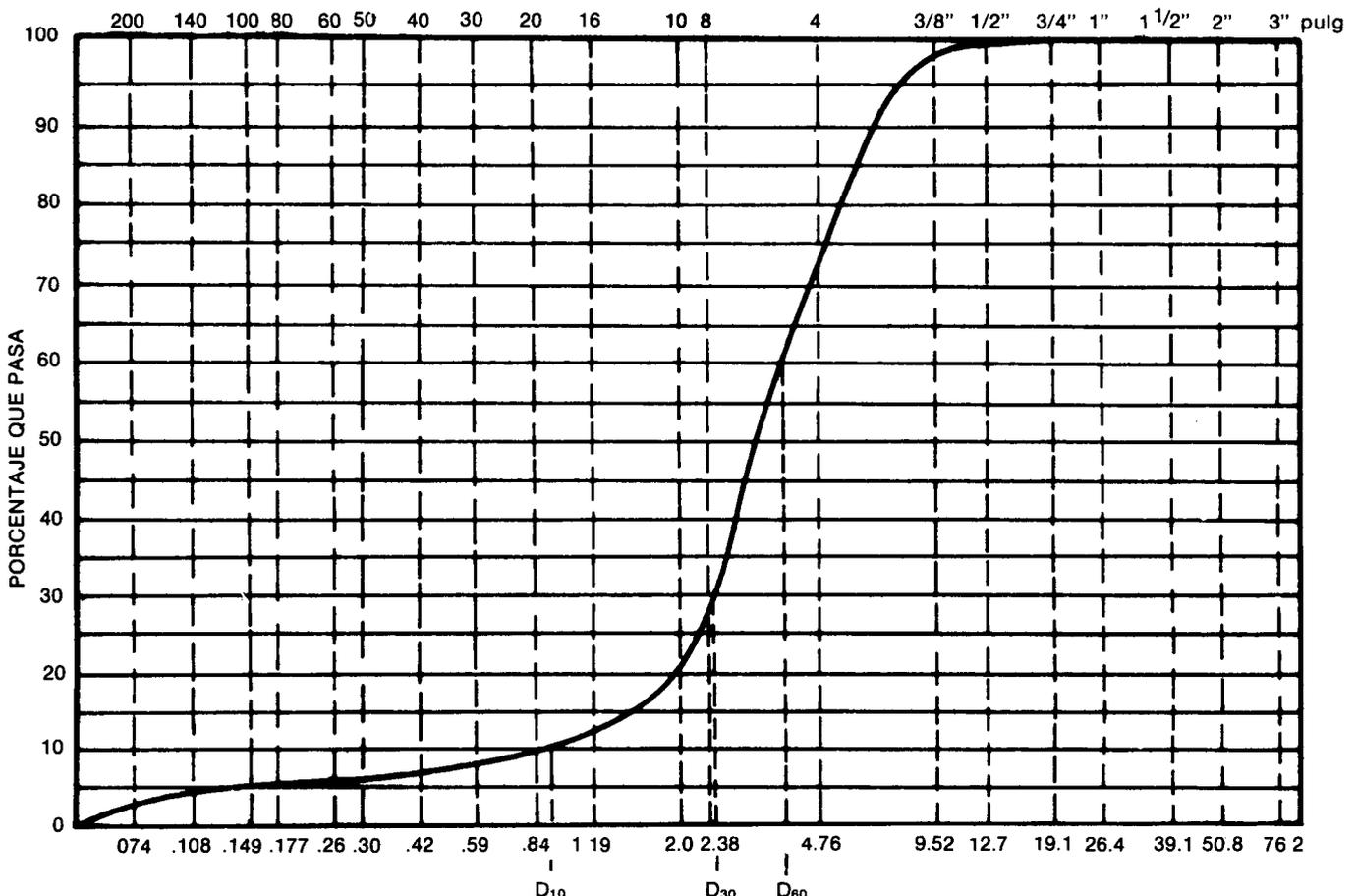


FIGURA 5. Granulometría de la grava.

clases de permeabilidad, con el fin de clasificar la aptitud del suelo para la transmisión del agua, así:

CLASE	PERMEABILIDAD (cm/hr)
1. Muy lenta	menor de 0.1
2. Lenta	0.1 a 0.5
3. Moderadamente lenta	0.5 a 2.0
4. Moderada	2.0 a 6.0
5. Moderadamente rápida	6.0 a 12.0
6. Rápida	12.0 a 18.0
7. Muy rápida	mayor de 18.0

De acuerdo con los resultados obtenidos la arena y la grava superan el valor de 18.0 cm/hora, luego tienen una permeabilidad muy rápida.

3. Porosidad (p)

La porosidad de la arena fue 41,4% y la de la grava de 41, 9%.

4. Curva característica del filtro de arena y de malla

Los resultados de los ensayos se resumen en la Figura 6, en donde se indican las pérdidas de presión media Δp , en función de la presión de entrada P_e . Aunque las mediciones se realizan con un manómetro diferencial de mercurio (Hg) en centímetros (cm), éstos se transforman en libras por pulgada cuadrada (psi) por convención.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de la curva característica del filtro de

arena (agua limpia), se encontró que la pérdida de presión debida al lecho es de 5,6 cm de Hg (1,08 psi), para una presión de entrada de 45 psi y con un caudal de 100 gpm en el lecho convencional. Esta valor es la base para verificar la validez de las ecuaciones de Fair y Hatch y de Rose que determinan la pérdida de presión inicial en un filtro de arena.

Ecuación de Fair y Hatch. La caída de presión inicial en el lecho filtrante será:

$$hf = hfa + hfg$$

donde

hf = pérdida de presión total en el lecho.

hfa = pérdida de presión debida a la arena.

hfg = pérdida de presión debida a la grava.

Obteniéndose $hf = 4,33 + 0,45 = 4,78$ cm de Hg (0.92 psi)

Siendo la pérdida teórica (4,78 cm de Hg) ligeramente menor a la pérdida real (5,6 cm Hg), esto se puede explicar porque en la ecuación empleada no se tiene en cuenta la pérdida causada por accesorios, tales como la pantalla deflectora y el colector. Se puede deducir que la fórmula de Fair y Hatch tiene una buena aproximación.

Ecuación de Rose. La caída de presión tiene una forma similar a la anterior:

$$hf = hfa = hfg$$

Remplazando

$hf = 7,6 + 1,89 = 9,49$ cm de Hg (1.83 psi)

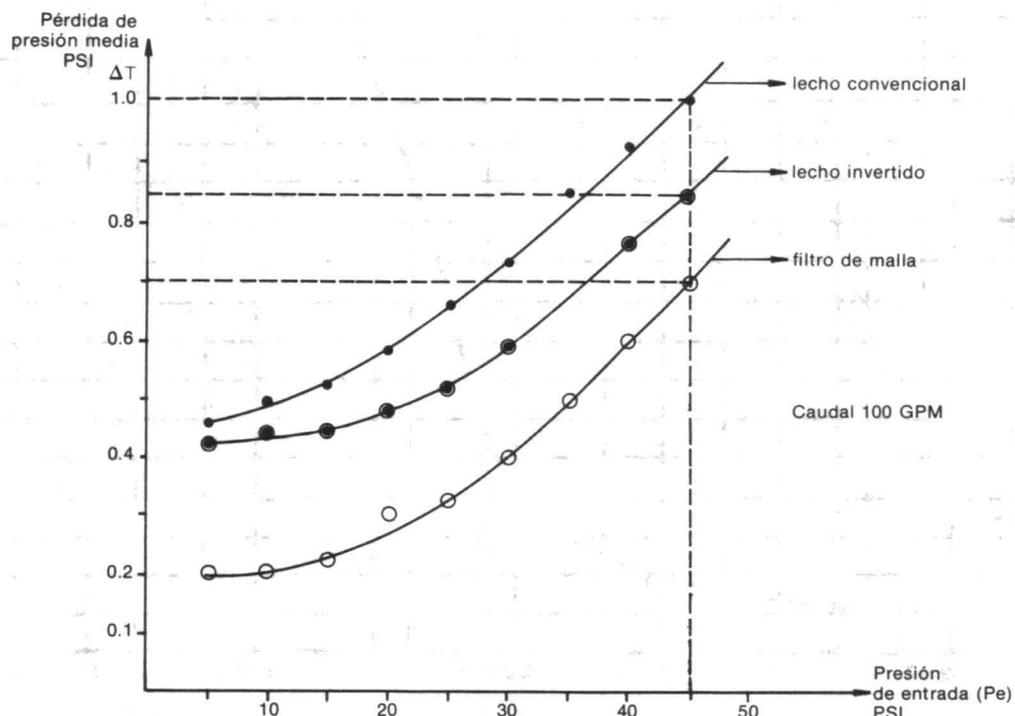


FIGURA 6. Curvas características del filtro de arena y de malla.

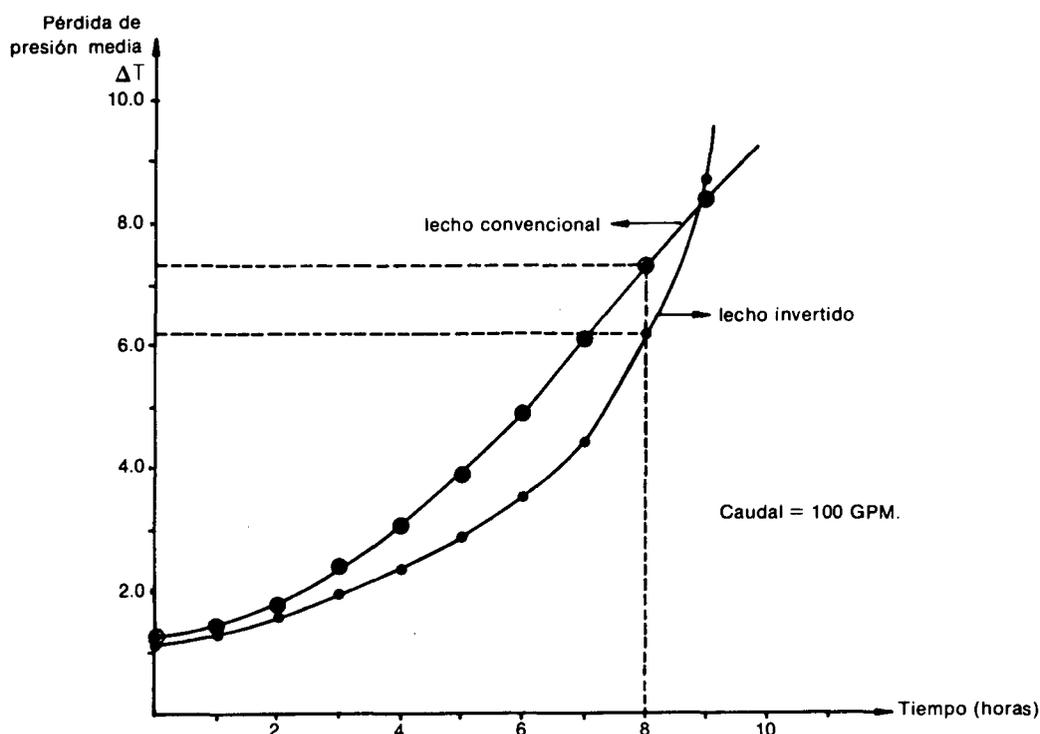


FIGURA 7. Caída de presión en el filtro de arena (flujo descendente).

Como se aprecia, este valor difiere apreciablemente del obtenido en la prueba precedente y, como en el caso anterior, no contempla la pérdida en los accesorios mencionados.

Ensayos de Campo

1. Caída de presión en el filtro de arena.

—Lecho convencional y flujo normal (descendente).

La caída de presión promedio (Δp) a diferentes

tiempos de operación (horas) para una presión a la entrada del filtro de 45 psi y un caudal de 100 gpm, se resume en la Figura 7.

—Lecho invertido y flujo normal descendente.

Los valores se aprecian en la Figura 7.

Durante las primeras 8 horas de funcionamiento, el lecho invertido presenta una menor caída de presión. Después esta pérdida se incrementa y supera la del lecho convencional, debido a que el

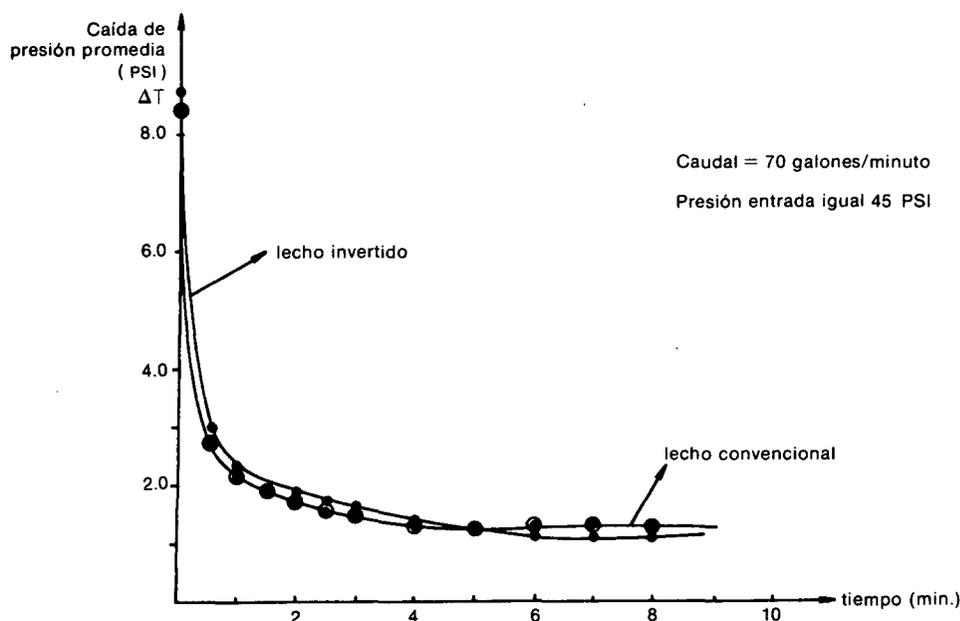


FIGURA 8. Caída de presión en el filtro de arena (flujo ascendente).

lecho invertido atrapa más sólidos en suspensión

2. Caída de presión en el filtro de arena con flujo ascendente (retrolavado).

Lecho convencional y lecho invertido: La caída de presión promedio (Δp) a diferentes tiempos de operación (minutos) para una presión de entrada de 45 psi y un caudal de 70 gpm, se aprecian en la Figura 8.

En el lecho convencional es más notoria la recuperación hasta los 5 minutos de iniciado el proceso de retrolavado, debido a que la mayoría de los sólidos retenidos se encuentra en la superficie de la arena, cerca a la salida del flujo de retrolavado. Después de este tiempo (5 minutos) la recuperación de la caída de presión es mayor en el lecho invertido.

3. Caída de presión en el filtro de malla con flujo ascendente (retrolavado).

La caída de presión promedio (Δp) a diferentes tiempos de operación (horas) con una presión de entrada de 45 psi y un caudal de 70 gpm, se resumen en la Figura 9.

La caída de presión en el filtro de malla es muy pequeña comparada con el filtro de arena: aproximadamente está entre el 10 y el 15% de las pérdidas ocurridas en el filtro de arena.

Promedio de Sólidos Suspendedos Totales (SST)

1. Filtro de arena con lecho convencional.

El promedio de Sólidos Suspendedos Totales en el agua a la entrada y a la salida del filtro para

diferentes períodos de tiempo (horas) y las partículas retenidas en miligramos por litro (mg/lt) fueron:

t (horas)	Referencia	S.S.T	Partículas Ret. (mg/lt)
2	Agua del depósito	44,0	
2	A la entrada del filtro	38,0	
2	A la salida del filtro	29,5	8,5
8	A la salida del filtro	16,0	22,0

2. Filtro de arena con lecho invertido.

Los resultados obtenidos fueron:

t (horas)	Referencia	S.S.T	Partículas Ret. (mg/lt)
2	A la entrada del filtro	38,0	12,5
2	A la salida del filtro	25,5	26,5
8	A la salida del filtro	11,5	

3. Filtro de malla.

Los resultados fueron:

t (horas)	Referencia	S.S.T	Partículas Ret. (mg/lt)
2	A la entrada del filtro	29,5	16,5
2	A la salida del filtro	13,0	
8	A la entrada del filtro	16,0	7,4
8	A la salida del filtro	8,6	

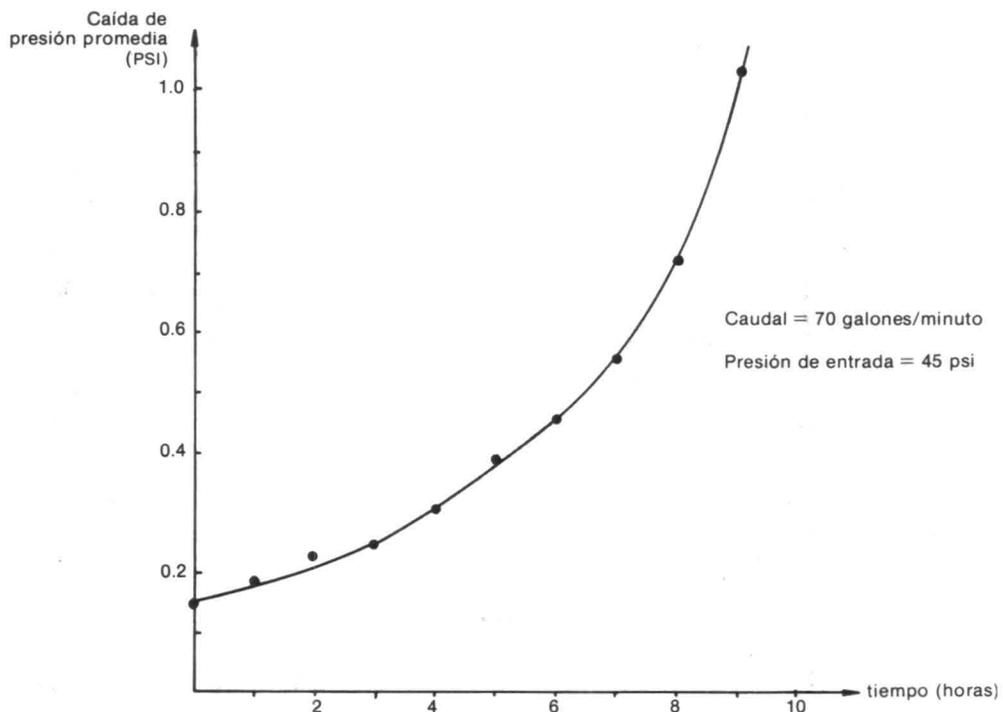


FIGURA 9. Caída de presión en el filtro de malla (flujo ascendente).

4. La eficiencia en el proceso del filtrado (NF) se determina como:

$$NF\% = \left(\frac{SSTe - SSTs}{SSTe} \right) * 100$$

donde

NF = Eficiencia en el proceso de filtrado al tiempo en horas.

SSTe = Sólidos Suspendidos Totales a la entrada del filtro.

SSTs = Sólidos Suspendidos Totales a la salida del filtro.

Filtro de arena lecho convencional:

$$NF_2 = 22,3 \% \approx 22\%$$

$$NF_8 = 57,89\% \approx 58\%$$

Filtro de arena lecho invertido:

$$NF_2 = 32,89\% \approx 33\%$$

$$NF_8 = 69,74\% \approx 70\%$$

Filtro de malla.

$$NF_2 = 55,93\% \approx 56\%$$

$$NF_8 = 46,25\% \approx 46\%$$

Se comprueba que el filtro de arena con lecho invertido realiza un mejor filtrado que con el lecho convencional. Como se aprecian en las tablas anteriores a las 2 horas de iniciado el proceso de filtrado el lecho convencional retuvo 8,5 mg/lit, mientras que el lecho invertido retuvo 12,5 mg/lit de sólidos suspendidos en el agua de riego. Para este mismo tiempo la eficiencia del filtrado con lecho convencional es de 22% y para el lecho invertido 33%. A las ocho horas de filtrado las eficiencias fueron de 58% y 70% para el lecho convencional e invertido, respectivamente.

Considerando las pérdidas de presión causadas, el lecho convencional origina mayores caídas de presión que el lecho invertido en las primeras 8 horas de trabajo continuo (ver tablas y gráficas respectivas). Después de 8 horas de filtrado continuo, el filtro con lecho invertido presenta un mayor taponamiento, por la mayor retención de partículas que éste ha realizado, lo cual se traduce en un elevado incremento en la caída de presión, llegando a sobrepasar la del lecho convencional.

CONCLUSIONES

1. El filtro de arena con el lecho invertido presenta un mejor comportamiento hidráulico. Al utilizar agua limpia, la pérdida de presión (curva característica del filtro) es menor que la obtenida para el lecho convencional, según se aprecia en la Figura 3.
2. El filtro de arena con el lecho invertido presenta una mayor eficiencia de filtrado que el lecho convencional, como se aprecia en las eficiencias de filtrado a las 2 y 8 horas de

funcionamiento continuo de los filtros y en las partículas retenidas por los lechos.

3. El filtro de malla inicialmente es el responsable de la captación de sólidos suspendidos en el agua de riego. A medida que transcurre el tiempo de filtrado esta responsabilidad la va asumiendo el filtro de arena, hasta que finalmente la comparten los dos filtros. Lo anterior se aprecia en los valores de eficiencia; a las dos horas de funcionamiento el filtro de malla tiene una eficiencia del 56%, mientras que el filtro de arena con lecho convencional tiene una eficiencia del 22%. Ocho horas después de iniciado el proceso de filtrado, la eficiencia del filtro de malla disminuye al 46% y la del filtro de arena con lecho convencional aumenta a 58%.
4. El tiempo de lavado recomendado (establecido para una pérdida de presión de 5 psi) en el lecho convencional es de 6 horas, y la pérdida de presión en el filtro de malla es de 0,46 psi. Sumando esta pérdida a la obtenida para este mismo tiempo en el filtrado de arena, se tiene una pérdida de presión total en la estación de filtrado de 5,4 psi.

En el lecho invertido el tiempo máximo de operación sin limpieza es de 7,25 horas; para este tiempo la pérdida de presión en el filtro de malla es de 0,6 psi, lo que da un total de 5,6 psi de pérdida de presión en la estación de filtrado.

5. El filtro de arena invertido presenta una menor caída de presión que con el lecho convencional, para un mismo tiempo durante la operación de filtrado, lo que amplía los períodos de funcionamiento antes de efectuar el lavado del filtro.
6. La caída de presión en el filtro de malla es muy pequeña comparada con la caída de presión en el filtro de arena, ya sea con lecho convencional o con lecho invertido. La pérdida de presión en el filtro de malla fluctúa entre el 10 y el 15% de la pérdida de presión debida al lecho del filtro de arena.
7. En la operación de retrolavado (flujo de agua ascendente) el lecho invertido por su constitución evita la pérdida de la arena del lecho. Esta pérdida es muy frecuente en el lecho convencional debido a la proximidad entre la capa de arena y la salida de flujo de agua.

En el lecho invertido la grava actúa como contrapeso de la fuerza que hace el flujo ascensional de lavado, lo que permite un mayor caudal de lavado y una mayor expansión en la arena, con lo que se facilita la limpieza de los espacios vacíos de la arena.

8. La ecuación de Fair y Hatch, para hallar las pérdidas en un material filtrante no esférico, no uniforme ni estratificado, es válida para el filtro de arena utilizado en el riego por goteo.
2. Usar el lecho invertido por sus ventajas frente al lecho convencional.
3. Modificar el diseño de la pantalla deflectora de la entrada de agua al filtro de arena para evitar que las líneas de flujo se desplacen hacia las paredes internas del filtro, donde se presenta menor resistencia al paso del agua.

RECOMENDACIONES

1. Se debe lavar el material filtrante (arena y grava) antes de depositarlo en el filtro de arena, para eliminar las partículas de tamaño menor de 0,42 mm, es decir, hacerlo sobre el tamiz No. 40 para disminuir la caída de presión del lecho filtrante.
4. Realizar un estudio técnico-económico para cambiar el colector del filtro de arena (Múltiple y Laterales) por una placa porosa, debido a las ventajas que ésta presenta.

BIBLIOGRAFIA

1. Arboleda, V.J. **Manual de tratamiento de aguas potables**. Seminario realizado en Venezuela, 1970, pp. 140 - 217.
2. Boeles, J.E. **Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería civil**. Mc-GrawHill, pp. 35-47 y 97-105.
3. Lanbe, W.T. **Mecánica de suelos**. Limusa 1981. México. pp. 267-313.
4. Medina, S.J. **Riego por goteo. Teoría y práctica**. Mundi-prensa, 1979. Madrid, España.
5. Silva, L.F. **Diseño de plantas de purificación de agua**. 1980 -
6. Streeter y Wyle. **Mecánica de fluidos**. Mc-GrawHill. 1979. México.