

24/153



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**FILTRACION RAPIDA SOBRE  
LECHOS DE ARENA**

**T E S I S**

Que Para Obtener el Titulo de:

**INGENIERO QUIMICO**

**P r e s e n t a :**

**REYES MARTIN MATA FRANCO**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**México, D.F.**

**1988**

**EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABLAS	3
NOMENCLATURA	4
RESUMEN	7
INTRODUCCION	9
1. TEORIA DE LA FILTRACION	11
1.1 <i>Definición</i>	11
1.2 <i>Aspectos generales</i>	11
1.2.1 <i>Clasificación de las partículas suspendidas</i>	12
1.2.2 <i>Clasificación general de filtros</i>	13
1.3 <i>Aplicación de la filtración al tratamiento de aguas residuales</i>	15
1.3.1 <i>Historia de la filtración en tratamiento de aguas</i>	17
1.3.2 <i>Clasificación de filtros</i>	19
1.4 <i>Filtración rápida</i>	20
1.4.1 <i>Variables de filtración</i>	21

	Pág.
1.4.2 Mecanismos principales de la filtración	22
1.4.3 Hidráulica de flujo	24
1.4.4 Ensuciamiento	26
1.4.5 Medio poroso	28
1.4.6 Retrolavado	32
1.5 <i>Parámetros de control de operación</i>	34
2. TRABAJO EXPERIMENTAL	36
2.1 <i>Descripción del modelo experimental</i>	36
2.2 <i>Condiciones experimentales</i>	44
2.2.1 <i>Soporte y lecho filtrante</i>	46
2.3 <i>Métodos analíticos empleados</i>	53
2.3.1 <i>Monitoreo</i>	53
2.3.2 <i>Lavado</i>	53
3. ANALISIS DE RESULTADOS	55
3.1 <i>Determinación del final de la carrera</i>	55
3.2 <i>Características del depósito</i>	56
3.3 <i>Duración de la corrida</i>	56
3.3.1 <i>Concentración del influente</i>	56
3.3.2 <i>Velocidad de filtración</i>	58
3.4 <i>Eficiencias de remoción de sólidos</i>	59
3.5 <i>Desarrollo de las pérdidas de carga</i>	64

	Pág.
3.5.1 Relación entre la pérdida de carga y eficiencia del filtro	64
3.5.2 Pérdida de carga inicial	65
3.5.3 Pérdida de carga a través del filtro	66
3.6 Lavado	69
3.6.1 Eficiencia del lavado	70
3.7 Cantidad de agua tratada	75
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
4.1 Conclusiones	77
4.2 Recomendaciones	79
BIBLIOGRAFIA	82
ANEXOS	86
ANEXO 1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES	87
ANEXO 2. RESULTADOS DEL LAVADO	103
ANEXO 3. DESCRIPCION DEL EXPERIMENTO	105

- LISTA DE FIGURAS

No. Figura		Pág.
1	Evolución de la pérdida de carga	27
2	Distribución granulométrica	29
3	Filtros piloto. Vista general	38
4	Filtros piloto. Vistas laterales	40
5	Filtros piloto. Perspectiva	42
6	Difusores de aire	43
7	Distribución granulométrica	49
8	Efecto de la concentración del influente en la duración de corridas de filtración	57
9	Efecto de la velocidad en la duración de la corrida de filtración	58
10	Efecto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción por turbiedad	60
11	Efecto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción por SST	61
12	Evolución de la turbiedad influente-efluente para el conjunto $UTN_{\lambda}$ altas	62

No. Figura		Pág.
13	Evolución de la turbiedad influente-efluente para el conjunto $UTN_i$ bajas	63
14	Evaluación de la caída de presión y eficiencia del filtro	64
15	Efecto de la velocidad de filtración sobre la pérdida de carga inicial	65
16	Evolución de la pérdida de carga. Turbiedad = 7.3 $UTN$	66
17	Evolución de la pérdida de carga. Turbiedad = 6.0 $UTN$	67
18	Evolución de la pérdida de carga. Turbiedad = 1.6 $UTN$	68
19	Curva de lavado	70

## LISTA DE TABLAS

No. Tabla		Pág.
1	Clasificación de filtros	19
2	Tabla auxiliar para la construcción de la curva granulométrica	28
3	Condiciones de operación y parámetros medidos	45
4	Mallas empleadas en el estudio	47
5	Resultados granulométricos	48
6	Tabla auxiliar para el cálculo de pérdidas de carga iniciales	51
7	Tabla de comparación entre las pérdidas de carga iniciales calculadas y las experimentales	52
8	Eficiencias de lavado	72
9	Cantidad de sólidos en la arena	73
10	Cantidad de agua tratada	75
11	Producción de agua tratada y agua de <u>re</u> trolavado para un mes de operación.	76



## NOMENCLATURA

- A : área de la sección transversal del filtro ( $L^2$ )
- A·F : área entre las curvas de influente-efluente, ( $L^2$ )
- $A_L$  : área bajo la curva de lavado ( $L^2$ )
- $A_T$  : área de la sección transversal del filtro (Camp), ( $L^2$ )
- $C_e$  : coeficiente de esfericidad, adimensional
- CU : coeficiente de uniformidad, adimensional
- D : apertura del tamiz, (L)
- $D_A$  : duración del lavado con agua, (T)
- di : diámetro medio de aberturas entre dos tamices adyacentes, (L)
- $\delta P$  : incremento en la caída de presión, (L)
- $\Delta P$  : caída de presión a través del medio, (L)
- $\Delta P_\delta$  : caída de presión final, (L)
- $\Delta P_0$  : caída de presión inicial, (L)
- $\Delta P_{0C}$  : caída de presión inicial calculada (ec. Fair y Hatch), (L)
- $\Delta P_{0_{exp}}$  : caída de presión inicial experimental, (L)
- $D_{SA-A}$  : duración del lavado con aire-agua, (T)
- $\delta' = \frac{K}{T\delta}$  (K: coeficiente de fricción), adimensional
- $\gamma_s$  : densidad del lecho, ( $ML^{-3}$ )
- g : gravedad, ( $LT^{-2}$ )
- $h^*$  : espesor del lecho (L)
- $h_0$  : pérdida de carga inicial (ec. Fair y Hatch), (L)
- H : columna de agua, (L)

- $H$  : hora (anexo 1), (T)  
 $H^*$  : espesor del medio (ec. Camp), (L)  
 $L$  : longitud del medio (ec. Fair y Hatch), (L)  
 $M \cdot D$  : material desprendido, (M)  
 $M \cdot R$  : material retenido, (M)  
 $N$  : número de muestreos, adimensional  
 $\eta$  : eficiencia de remoción, adimensional  
 $\eta_L$  : eficiencia de lavado, adimensional  
 $\eta_{SSTe}$  : eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales referido al efluente, adimensional  
 $\eta_{SSTi}$  : eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales referido a la parte media del lecho, adimensional  
 $\eta_{SSTL}$  : eficiencia de lavado referido a sólidos suspendidos totales, adimensional  
 $\eta_{UTN}$  : eficiencia de remoción de turbiedad, adimensional  
 $\eta_{UTNL}$  : eficiencia de lavado referido a turbiedad, adimensional  
 $P_o$  : porosidad del lecho, adimensional  
 $Q$  : gasto volumétrico de filtración, ( $L^3 T^{-1}$ )  
 $\rho_a$  : densidad de la arena (ec. Camp), ( $ML^{-3}$ )  
 $S.F.$  : mg\*minuto/litro durante la filtración, ( $ML^{-3}T$ )  
 $S.L.$  : mg\*minuto/litro durante el lavado ( $ML^{-3}T$ )  
 $SST$  : sólidos suspendidos totales, ( $ML^{-3}$ )  
 $t$  : tiempo, (T)  
 $T.E.$  : tamaño efectivo, (L)  
 $v$  : tasa de filtración (ec. Fair y Hatch), ( $L^3 L^{-2} T^{-1}$ )

- $v$  : velocidad de filtración (Tabla 3),  $(LT^{-1})$
- $v_a$  : volumen de arena,  $(L^3)$
- $u_L$  : velocidad del lavado  $(LT^{-1})$
- $u_b$  : velocidad de filtración (Tabla 8),  $(LT^{-1})$
- $Vol$  : volumen (Tabla 9),  $(L^3)$
- $V_T$  : volumen total del lecho,  $(L^3)$
- $\nu$  : viscosidad cinemática,  $(L^2 T^{-1})$
- $w$  : peso de la arena (ec. Arboleda),  $(M)$
- $w_a$  : peso de la arena (ec. Camp),  $(M)$
- $X_i$  : % peso de arena retenida en cada tamiz del análisis granulométrico, adimensional
- $Z$  : material retenido por metro cúbico de arena,  $(ML^{-3})$

## RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es el determinar la velocidad de filtración óptima de lechos de arena sílica, para tratamiento de aguas residuales. El trabajo experimental se desarrolló en el intervalo de filtración rápida. Dicha evaluación se llevó a cabo en filtros piloto instalados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria.

En el primer capítulo se presentan los conceptos e información básica, para comprender en qué consiste la filtración, así como conocer su aplicación en el campo de tratamiento de aguas residuales.

En el capítulo 2 se realiza la descripción del modelo y se presenta la metodología experimental empleada.

En el capítulo 3 se analizan los resultados obtenidos para posteriormente presentar las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

De acuerdo con este estudio se obtiene que la velocidad de filtración óptima es de 15 m/h, velocidad que permite una alta producción de agua.

## INTRODUCCION

Uno de los tantos problemas con que la humanidad se ha topado en su larga historia y que actualmente se ha acrecentado más y más es el referido a la contaminación de agua, aire y suelo; elementos que constituyen el conjunto vital de nuestra supervivencia. En México dicho problema es aún más grave pues no había existido un interés real por prevenir y controlar el estrago que la contaminación trae consigo. La preocupación imperante que en la mayoría de los mexicanos existía era eliminar de una forma rápida, sencilla y sin costo los desechos producidos; es evidente que ello no constituye un proceso ideal de control sino, sencillamente, del arrojó inconciente de contaminantes a la atmósfera, ríos, lagos, suelo, etc. y esto se da desde nuestro modesto hogar hasta la más compleja y enorme industria. Es difícil y triste aceptar, que en nuestro país, la solución de muchos problemas se presenta o se

trata de realizar hasta que la situación es casi irreversible.

La tecnología que actualmente se utiliza en México para el control de la contaminación es, en su mayoría, importada, y se afirma que la situación de crisis que prevalece hace muy costoso desarrollarla. Sin embargo, debería pensarse que el elaborar tecnología propia no es competir con otros países sino poder controlar y tratar la contaminación con nuestros propios recursos, sin pagar regalías por importación. Esto en un futuro será más rentable.

Este trabajo se abocó a la problemática del agua. El problema abarca desde la falta del líquido hasta la producción de aguas de desecho. Un enfoque para remediar este problema es reusar las aguas después de un tratamiento para ahorrar agua potable y controlar la contaminación. Uno de los usos más fáciles de agua tratada es el riego de áreas verdes.

La filtración como tratamiento terciario, en el proceso de reutilización del agua de desecho es una parte importante que afina el efluente de un tratamiento secundario. De ahí, el objetivo de sentar las bases de diseño de filtros con un medio barato y de determinar una metodología adecuada de la operación.

## 1. TEORIA DE LA FILTRACION

### 1.1 *Definición*

La filtración es una operación unitaria clasificada dentro de las separaciones mecánicas, Mc Cabe y Smith (1963). Implica separar partículas sólidas contenidas en un fluido, por su paso a través de un medio, ya sea poroso, fibroso o granular en el cual, quedan retenidas las partículas.

### 1.2 *Aspectos generales*

En la filtración se considera que intervienen dos fases. Una integrada por el fluido, ya sea gas ó líquido, y la otra, integrada por el conjunto de partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el fluido.



La consideración de quién es el contaminante o la fase a purificar es relativa pues, en ocasiones, la filtración tiene por objeto:

- 1) Recuperar sólidos
- 2) Recuperar el fluido
- 3) Recuperar ambas partes
- 4) Ser un pretratamiento para facilitar otras operaciones como un presecado, un lavado de materiales solubles depositados en los sólidos, una cristalización, etc.

En general se considera que la suspensión de alimentación debe contener más de 1% de sólidos en volumen (Valiente, 1973).

#### 1.2.1 Clasificación de las partículas suspendidas

Las partículas sólidas que se retienen pueden ser:

- a) Gruesas o finas
- b) Rígidas o plásticas
- c) Redondas o alargadas
- d) Individuales separadas o agregados
- e) Orgánicas o inorgánicas

Por otra parte, la suspensión de alimentación (o influente) puede tratarse fría o caliente y encontrarse sometida a vacío o alta presión. La separación deseada tiene, además,

la alternativa de ser parcial o prácticamente total.

Las consideraciones anteriores forman el punto de partida para el diseño de un filtro.

### 1.2.2 Clasificación general de filtros

En función de su uso, los filtros se dividen en cuatro grandes grupos (Mc Cabe y Smith, 1963):

- 1) Coladores
- 2) Clarificadores
- 3) Filtros de torta
- 4) Espesadores

#### 1.2.2.1 Coladores

Un colador es generalmente una tela metálica colocada perpendicularmente a un canal de flujo. Sirve para separar la suciedad o herrumbre de un líquido en movimiento. Su mantenimiento es sencillo, pues el cambio de dicha tela es fácil.

#### 1.2.2.2 Clarificadores

El medio filtrante en este tipo de filtros es una membrana de tela o papel, o bien, un cartucho de discos metálicos.

Un clarificador también separa pequeñas cantidades de sólidos para producir líquidos translúcidos. Los sólidos retirados se desechan en la mayoría de los casos.

#### 1.2.2.3 Filtros de torta

Los filtros de torta remueven grandes cantidades de sólidos en forma de una pasta de cristales o lodo. En muchos casos, están provistos de dispositivos para lavar y escurrir el material retenido.

#### 1.2.2.4 Espesadores

Un filtro espesador produce una separación parcial de una suspensión ligera. En este sistema se obtiene el líquido claro y una suspensión espesada.

Puesto que el fluido pasa a través de un medio filtrante en virtud de una presión diferencial, los filtros se clasifican en (Badger, 1964):

- a) Filtros a presión. Operan con una presión superior a la atmosférica en el lado de carga del medio filtrante.
- b) Filtros de gravedad o a cielo abierto. Operan a presión atmosférica.

- c) Filtros al vacío. Cuando la presión ejercida en el lado donde se recibe el líquido es inferior a la atmosférica.

Con respecto a la forma de operación los filtros se dividen en:

- a) Filtros continuos. Tanto la descarga de sólidos como la del fluido es ininterrumpida, cuando el equipo está en operación.
- b) Filtros discontinuos. El flujo del fluido a través del equipo se interrumpe periódicamente para permitir la descarga de sólidos acumulados (Mc Cabe y Smith, 1963).

### 1.3 Aplicación de la filtración al tratamiento de aguas residuales

Se considera agua residual la proveniente de los desechos líquidos domésticos, industriales o de cualquier otra actividad humana. Su color varía del gris (fresca) hasta el negro (séptica). Tratar el agua es reducir su concentración de contaminantes y para lograr este objetivo se llevan a cabo los siguientes procesos (Ramalho, 1977):

- a) Pretratamiento. Consiste en eliminar la materia, que

por sus características físicas, es fácil de separar mediante una rejilla de cribado, un desarenador y un desnatador.

- b) Tratamiento primario. Es la eliminación de los lodos o sólidos precipitados mediante la decantación.
- c) Tratamiento secundario. Tiene por objetivo reducir la concentración de materia orgánica mediante procesos biológicos o fisicoquímicos. Después de esta operación se realiza la sedimentación, que elimina los lodos precipitables formados.
- d) Tratamiento terciario. Utilizado para reducir lo que haya logrado pasar del tratamiento anterior, un ejemplo de ello es la filtración terciaria.

La filtración se usa para preparar el agua residual y enviarla a procesos de tratamiento posteriores o para su utilización directa, como agua de reuso. Puede aplicarse directamente al efluente de una planta de tratamiento biológico o a continuación de un proceso coagulación-sedimentación (Metcalf y Eddy, 1977).

La utilización de un lecho filtrante granular (filtración a profundidad) se debe, principalmente, a que retiene gran

cantidad de materia de dimensión relativamente pequeña (De-grémont, 1973).

### 1.3.1 Historia de la filtración en tratamiento de aguas

Inicialmente los filtros tuvieron un carácter doméstico. En México, se usaron por mucho tiempo los filtros de piedras porosas colocadas en tinajeros (Arboleda, 1973).

En Francia se difundieron mucho los filtros de esponjas, paños, lana y otros durante los siglos XVIII y XIX.

Cuando se hicieron los primeros filtros no domésticos el agua filtrada se vendía por galones al consumidor. A partir de 1856 aparecieron en Francia los filtros a presión (Fonvielle y Suchon). Los primeros estaban contruidos con un cono truncado de hierro fundido y tapa semiesférica en el cual, había 0.70 m de lecho filtrante compuesto de 0.25 m de esponjas marinas, 0.25 m de piedra caliza y 0.20 m de arena de río. El lavado se efectuaba por la extracción del material filtrante. En cambio los filtros Suchon estaban contruidos por tres lechos de paño de 0.20 m de espesor.

En Parsley, Escocia (1804), fue donde por primera vez se pensó en hacer una instalación de filtros para toda una población. Más tarde, en 1829, en Londres (Chelsea), se cons-

truyó la primera planta de filtros lentos de arena, hecha por "The Chelsea Water Work, Co.". A principios del siglo XIX el uso de filtros lentos de arena (ingleses) se popularizó, tanto en Europa como en América. Posteriormente, el mejor conocimiento del proceso condujo al diseño de filtros rápidos que aparecieron en Norteamérica. El primer filtro rápido apareció en 1855 en Somerville (E.U.) y fue diseñado por L. Smith Hyatt. Este sistema pasó a Bélgica, Alemania y Francia, países que obtuvieron sus propias patentes. Estos filtros se denominaron filtros "mecánicos o americanos", ya que contaban con la innovación de un sistema de lavado, por inversión del sentido del flujo. Esta operación se ejecutaba junto con el raspado de la capa superior.

En aquel tiempo, no se contaba con un sistema de sedimentación. Esto hacía que los filtros se taparan con demasiada frecuencia, sobre todo cuando la concentración de sólidos en el influente era muy alta. Surgió por tanto, el inconveniente de tener un elevado consumo de agua para el propio lavado del filtro, por lo que se adicionó una etapa previa de floculación-sedimentación. Siendo así como nacieron los esquemas tradicionales de potabilización en los cuales, los tratamientos son preparatorios o complementarios a la filtración.

### 1.3.2 Clasificación de filtros

La filtración puede efectuarse en muchas formas: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos); en medios porosos (pastas arcillosas, papel filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate o combinados); con flujo ascendente, descendente o mixto; y, por último, los filtros pueden trabajar a presión o por gravedad (Tabla 1).

TABLA 1. CLASIFICACION DE FILTROS

Según la velocidad de filtración	Según el medio filtrante	Según el sentido del filtro	Según la carga sobre el lecho
Rápidos 120-360 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día  5-15 m/h	1. Arena (h* = 60-75 cms)  2. Antracita (h = 60 - 75 cms)  3. Mixtos: antracita (50-60 cms) y arena (15-20 cms)  4. Mixtos arena antracita, granate	Ascendente  Descendentes  Flujo mixto	Por gravedad  Por presión
Lentos 7-14 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día 0.29-0.58 m/h	Arena (h = 60-100 cms)	Descendente Ascendente	Por gravedad

\* h: espesor del lecho

FUENTE: (Arboleda, 1973)



#### 1.4 Filtración rápida

En la actualidad, la filtración rápida es la más utilizada debido a la importante cantidad de agua que trata, aunque se pierden las ventajas, eventuales, de una posible descontaminación por acción biológica.

Durante la filtración el depósito del material se efectúa como una cubierta alrededor de los granos de arena, lo que hace disminuir la porosidad del lecho (Camp, 1964). La mayor parte de los sólidos son retenidos en las capas superiores del empaque (aún si se utilizan velocidades de filtración elevadas). La operación del filtro es importante en este aspecto, ya que si de pronto se aumentara la velocidad de filtración los sólidos depositados serían arrastrados.

Otro factor relevante es la calidad del influente, ya que si este varía la evolución del porcentaje de material retenido no sería constante (variación entre el 50 y 95%, Degrémont, 1973); al igual que la duración de la corrida que variaría en proporciones aún mayores. Por otra parte, la duración de la corrida está también ligada a la presencia accidental de materias capaces de atascar el filtro en las primeras capas. Bajo estas condiciones, se han observado disminuciones de 1 a 10 menores (Degrémont, 1973).

En general, los filtros son altamente eficaces en la remoción de sólidos, tal eficiencia se incrementa con tamaños de grano chicos, baja porosidad, grandes espesores de lecho y bajas tasas de filtración.

#### 1.4.1 Variables de la filtración

Como variables de operación tenemos (Deb, 1969):

- Características del medio:

- a) Espesor
- b) Forma
- c) Porosidad
- d) Tamaño efectivo
- e) Coeficiente de uniformidad
- f) Características de superficie

- Características de las partículas suspendidas:

- a) Tamaño
- b) Forma
- c) Densidad
- d) Concentración
- e) Porosidad del depósito

- Características del líquido filtrado:

- a) pH
- b) Temperatura
- c) Concentración de sólidos
- d) Turbiedad

- Características de operación:

- a) Tasa de filtración
- b) Pérdida de carga
- c) Método de operación

- Lavado del lecho

Es necesario combinar estas variables para obtener los parámetros de construcción, diseño y operación.

#### 1.4.2 Mecanismos principales de la filtración

Los mecanismos dominantes dependen de las características físicas y químicas de la suspensión y del medio, velocidad de filtración y características químicas del agua, (Weber, 1979).

En los filtros granulares profundos la eliminación de sólidos

dos tiene lugar dentro del lecho del filtro, y se denomina filtración a profundidad. La eficiencia de la filtración depende de varios mecanismos. Algunos sólidos son separados por el simple proceso mecánico de tamizado intersticial (que es el más viable para filtración rápida); y otros, los más pequeños, por mecanismos de transporte y fijación (Weber, 1979).

#### 1.4.2.1 Mecanismo de transporte

Lleva la partícula pequeña desde la masa principal del fluido hasta la superficie del medio y de aquí a los intersticios disponibles. Los mecanismos de transporte incluyen la decantación por gravedad, la difusión, la intercepción y la hidrodinámica. Estos mecanismos dependen del espesor del lecho, de la velocidad de filtración, la temperatura del fluido y la densidad y el tamaño de las partículas en suspensión.

#### 1.4.2.2 Mecanismo de fijación

La retención de la partícula implica interacciones electrostáticas, enlaces químicos por puentes o adsorción específica, (en función del tipo de coagulantes si se han empleado en el pretratamiento), de las características del agua y del medio filtrante.

En los filtros granulares, la eliminación se produce por la combinación de los mecanismos mencionados. Aún más, a medida que el ciclo del filtro progresa, el tipo de los mecanismos de transporte y fijación que intervienen pueden cambiar. Lo anterior da lugar a diferentes calidades de efluente y pérdida de carga durante una corrida. Por ejemplo, si la fijación es favorecida por la adsorción específica de las partículas sobre el medio filtrante limpio pero no es favorecida por la adsorción sobre partículas fijas, se debe esperar un cambio de comportamiento cuando los lugares de adsorción están agotados (Weber, 1979).

#### 1.4.3 Hidráulica de flujo

El flujo del agua a través de un filtro es hidráulicamente el mismo que el flujo a través de un estrato subterráneo. El flujo sigue un comportamiento laminar para el lecho filtrante limpio y permanece así hasta que el lecho queda obstruido por la materia en suspensión (Weber, 1979). Al suceder lo anterior, el filtro debe retirarse de operación y el medio filtrante ser lavado. La obstrucción del medio ocurre cuando:

- a) La pérdida de carga es muy grande
- b) Disminuye el caudal deseado con el sistema de equipo disponible

- c) La calidad del efluente se deteriora debido al paso de sólidos.

#### 1.4.3.1 Desarrollo de la pérdida de carga

El simple paso del agua a través de un medio poroso provoca una pérdida de carga la cual es mínima al inicio de la corrida ( $h_0$ ).

La ecuación 1 permite calcular la pérdida de carga inicial para granos no esféricos, de diámetro no uniforme y lechos estratificados (Fair y Hatch, 1933).

$$h_0 = \frac{f'v}{g} v \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \frac{36}{C_e^2} L \left[ \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{d_i^2} \right] \quad (1)$$

donde:

$C_e = 0.75$  ; coeficiente de esfericidad, para arena (promedio de varios tipos) (Carman, 1987).

$f' = 5$  ; valor constante experimental y adimensional =  $\frac{K}{16}$ ;  $K$  = coeficiente de fricción

$g = 7.323 \times 10^{10}$  m/día<sup>2</sup>, gravedad

$L$  : longitud del medio

$v = 0.082$  m<sup>2</sup>/día a 22°C (viscosidad cinemática)

$P_0$  : porosidad del lecho

$X_i$  : % peso de arena retenida en cada tamiz del análisis granulométrico

$v$  : tasa de filtración (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·día)

$d_i$ : diámetro medio de las aberturas entre dos tamices adyacentes

En un filtro por gravedad se desarrolla una presión menor a la atmosférica cuando la pérdida de carga excede la profundidad de la columna de agua sobre el filtro. Este fenómeno genera que se formen bolsas de aire, provenientes de la liberación de los gases disueltos en el agua o de posibles rupturas en la pared del filtro. Este fenómeno ("embolia del filtro") reduce el área efectiva de filtración, aumenta la velocidad paso del flujo y la pérdida de carga, lo que ocasiona la degradación del efluente.

En la figura 1 se muestra la evolución de la pérdida de carga durante una corrida de filtración (Degrémont, 1973).

#### 1.4.4 Ensuciamiento

Los sólidos naturales que se separan por filtración son compresibles (algas, hierro, arcilla, células biológicas, etc.). Consisten principalmente de agua adsorbida en un 95% de su peso total. A medida que la pérdida de carga aumenta los materiales depositados se comprimen y se induce la formación de un aglomerado permeable que actúa como filtro ayuda y aumenta la eficiencia de remoción. A este aglomerado se le

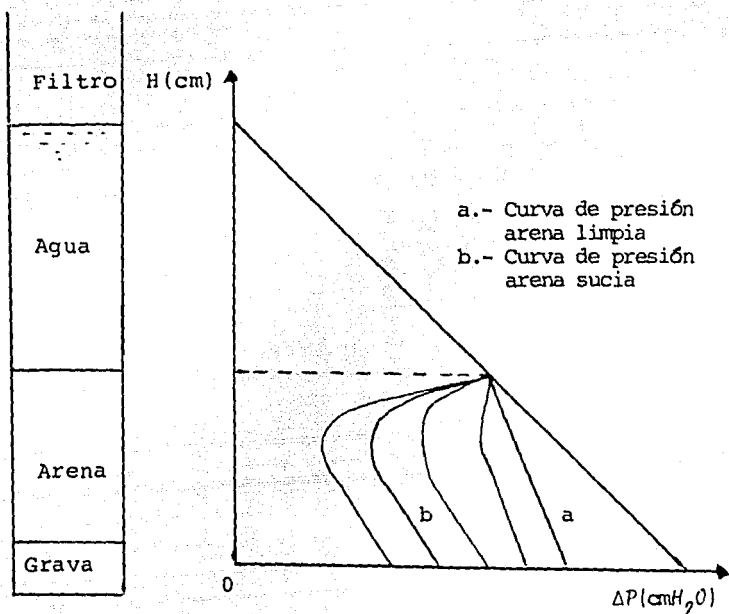


Fig 1. Evolución de la pérdida de carga

denomina "torta" ó "cake". Si la cantidad de sólidos retenidos se incrementa, la permeabilidad de la torta disminuye y debe suspenderse la corrida de filtración para fines de limpieza (Camp, 1964).

La inspección visual de un lecho filtrante durante una corrida demuestra que la penetración de los sólidos ocurre a mayor profundidad del lecho al incrementar la tasa de filtración (Young, 1977).



Durante el proceso de ensuciamiento el grano del lecho experimenta un aumento de diámetro por la deposición del material suspendido. Algunos autores (Camp, 1964) consideran que se origina una capa o envoltura uniforme.

#### 1.4.5 Medio poroso

Un material filtrante se caracteriza generalmente por los siguientes factores (Degrémont, 1973):

##### 1.4.5.1 Granulometría

Se evalúa mediante una curva representativa de los porcentajes en peso de los granos que pasan a través de las mallas de una sucesión de tamices normalizados (Tabla 2, Fig 2).

TABLA 2. TABLA AUXILIAR PARA LA CONSTRUCCION DE LA CURVA GRANULOMETRICA

Diámetro malla mm	% Material retenido	% Material que pasa acumulado
X	X	X
X	X	X
X	X	X
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮

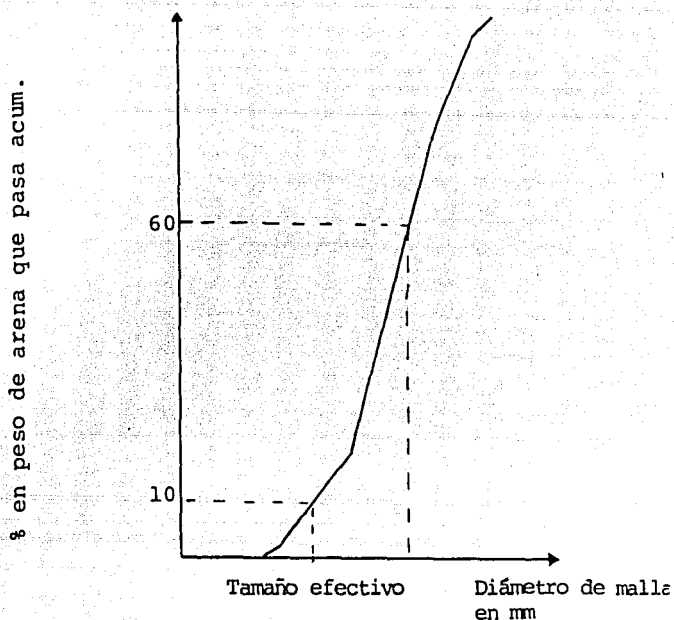


Fig 2. Distribución granulométrica

#### 1.4.5.2 Tamaño efectivo (T.E.)

Es la apertura de la malla correspondiente al diez por ciento de la curva granulométrica. Determina junto con los factores siguientes, en gran parte, la calidad del filtrado.

#### 1.4.5.3 Coeficiente de uniformidad (C.U.)

Es la relación de las aperturas correspondientes a los porcentajes 60 y 10 de la curva granulométrica. Se recomienda sea mayor a la 1.3 y menor a 1.7. (ASCE, et al, 1969).

#### 1.4.5.4 Forma de los granos

Es muy variada y va desde los granos angulosos (material triturado) hasta los redondos (arena de río y de mar).

Para una misma granulometría el aumento de pérdida de carga es menor con granos angulosos, ya que se acoplan poco unos con otros y dejan secciones de paso mayores.

El intervalo de tamaño para un medio granular va de 0.1 a 10 mm (Montgomery, 1985). El uso de granos de mayor tamaño permiten corridas de filtración más largas pues la porosidad aumenta pero existe un óptimo, ya que la calidad del efluente decrece al mismo tiempo.

Se sabe que el medio más frecuentemente usado es un lecho granulométrico de arena sílice. Pero no se descarta el hecho de la existencia de medios duales y múltiples. Un filtro que se utiliza ampliamente es el de antracita sobre arena (Young, 1977). Por otra parte, también existen filtros de medio múltiple compuestos de antracita, arena sílice y granate.

En un medio dual el primer medio, de talla superior, captura los sólidos suspendidos gruesos y el segundo los más finos. El tamaño de los granos de antracita pueden ser hasta

tres veces más grandes que los de la arena (Dahab, 1977).

La distribución homogénea de tamaño de granos provee de un promedio de tamaño de poro uniforme a lo largo de la cama del filtro. Esto ayuda a mejorar la filtración ya que, la oportunidad de captura de sólidos no se reduce con la profundidad como podría suceder en filtros de lecho estratificados (Young, 1977).

La formación de bolas de lodo (mudballs) ocurre frecuentemente en filtros con lechos estratificados. La acumulación de estas provoca incrementos en las pérdidas de carga inicial y reduce la duración de la corrida y, eventualmente, la calidad del efluente.

Se recomienda como ideal, un lecho de granos más gruesos en la superficie y los más finos en el fondo, aunque desafortunadamente, en la realidad, la estratificación producida por el mecanismo del lavado es al revés (ASCE et al, 1969).

#### 1.4.5.5 Porosidad

La porosidad,  $P_0$ , es el parámetro más importante en relación con la duración de corrida y la pérdida de carga.

La porosidad promedio en un lecho limpio se determina divi-

diendo el volumen total del lecho menos el volumen de la arena entre el volumen total. El volumen de la arena puede obtenerse con el peso y gravedad específica (para arena sílice el valor de su gravedad específica es 2.65). Se recomienda que la porosidad no sea menor a 0.35 ni mayor de 0.45 (Camp, 1964, ASCE et al, 1969).

La porosidad puede también calcularse mediante la ecuación 2 (Arboleda, 1973):

$$P_o = 1 - \frac{(W/A)}{\gamma_s L} \quad (2)$$

donde;

$P_o$  : porosidad

$W$  : peso de la arena requerida para el lecho

$A$  : área de la sección transversal del filtro

$L$  : espesor del lecho

$\gamma_s$  : densidad del lecho

#### 1.4.6 Retrolavado

Es el proceso por el cual se eliminan los sólidos retenidos en el filtro de arena al término de una corrida con el objeto de acondicionarlo para iniciar una nueva.

El retrolavado se realiza con flujo ascendente. La escuela

americana indica realizar dicho proceso sólo con agua, y la escuela europea, propone hacerlo con una combinación de aire-agua (Metcalf - Eddy, 1977). En ambos casos el agua empleada es la producida por el propio filtro.

Durante el retrolavado el lecho filtrante se fluidifica, es decir, los granos pasan a formar parte de una suspensión donde ocurre la eliminación de los sólidos retenidos. La expansión recomendada para suspender los granos profundos es de un 20 a un 50% (ASCE et al, 1969). La expansión de la cama varía inversamente con la viscosidad del agua de lavado (Camp, 1964). La resistencia de fricción máxima que el grano ofrece es su propio peso, ya que durante la fluidificación se encuentra libre.

Es esencial realizar estudios piloto de retrolavado para el diseño de filtros.

Como se había mencionado, el uso de granos de mayor tamaño permite corridas de filtración más largas, pero requiere de altas velocidades de retrolavado, esto limita las aplicaciones de diseño. (Camp, 1964 y Young, 1977). Por ejemplo el intervalo de velocidad del agua de lavado depende del porcentaje que se requiera fluidificar el lecho (20 a 50 m/h de acuerdo con Young, 1977). Como dato se señala que la mínima velocidad que se necesita para una cama de dos milf-

metros de diámetro es de 112 m/h (Dahab y Young, 1977).

El tiempo recomendado para un lavado completo va de 3 a 10 min según ASCE et al, 1969.

El utilizar aire y agua simultáneamente evita que se formen zonas muertas. Los granos del medio se mueven en forma circular de la base a lo alto del lecho.

Para el lavado es necesario definir los gastos de el aire y el agua, la expansión del lecho y la duración del retrolavado.

Por otra parte, durante el lavado puede haber pérdidas del medio filtrante por la violenta agitación que se produce, para reducir esta pérdida se usa medio de arena con un tamaño mayor de 1.5 mm y tasas de retrolavado menores a 20 m/h de agua y 144 m/h de aire (Young, 1977).

### 1.5 Parámetros de control de operación

Para llevar un registro del transcurso ó progreso de la corrida, se hace un monitoreo continuo del efluente de cada filtro y de las condiciones de operación. Montgomery, 1985 propone determinar:

- a) Pérdida de carga. Mediante la lectura de la diferencia de niveles de agua. Para ello, se instalan dos tubos transparentes y graduados, uno conectado a la línea del influente y otro a la del efluente (ASCE et al, 1969).
  
- b) S.S.T. (Sólidos suspendidos totales), el análisis se realiza por gravimetría de acuerdo con los métodos estándar (ASCE, et al, 1985).
  
- c) Tasa de filtración. Medida que se obtiene por medio de un medidor de flujo (ASCE et al, 1969).
  
- d) Turbiedad. Se determina en el influente y efluente con el fin de evaluar el rendimiento.



## 2. TRABAJO EXPERIMENTAL

La aportación principal de esta tesis se basa en el estudio de aplicación de un sistema de filtración a cielo abierto, con medio simple y de alta tasa para la filtración de un efluente biológico. A fin de adquirir un mayor número de datos en un tiempo menor, se construyeron dos modelos físicos (fig 3).

### 2.1 Descripción del modelo experimental

Los filtros fueron diseñados atendiendo a las recomendaciones expuestas por Metcalf y Eddy (1979). En estas recomendaciones se establece que con el fin de evitar el "fenómeno de pared" en un modelo físico es necesario tener un área superior a  $0.1 \text{ m}^2$  para estudio del retrolavado.

## EQUIPO AUXILIAR Y ACCESORIOS DE FILTROS PILOTO

CLAVE	SERVICIO
L-1	Tubería de alimentación a filtros
B-1	Bomba de alimentación a filtros
L-2	Tubería para agua filtrada
L-5	Tubería de recirculación del influente
L-3	Tubería para agua de lavado de filtros
B-3	Compresora de aire
L-4	Tubería para aire de lavado de filtros
T-1	Tanque de almacenamiento de agua filtrada y agua para lavado
V-1	Válvulas de control del influente
V-P	Válvula reguladora de presión y control de paso de aire
V-R	Válvula de recirculación
V-2	Válvula de paso para aire
C	Piezómetros
B-2	Bomba de agua de lavado
D	Desagüe
V-3	Válvula de control del efluente
V-4	Válvula de control de la entrada de agua de lavado
V-5	Válvula de control de la salida de agua de lavado

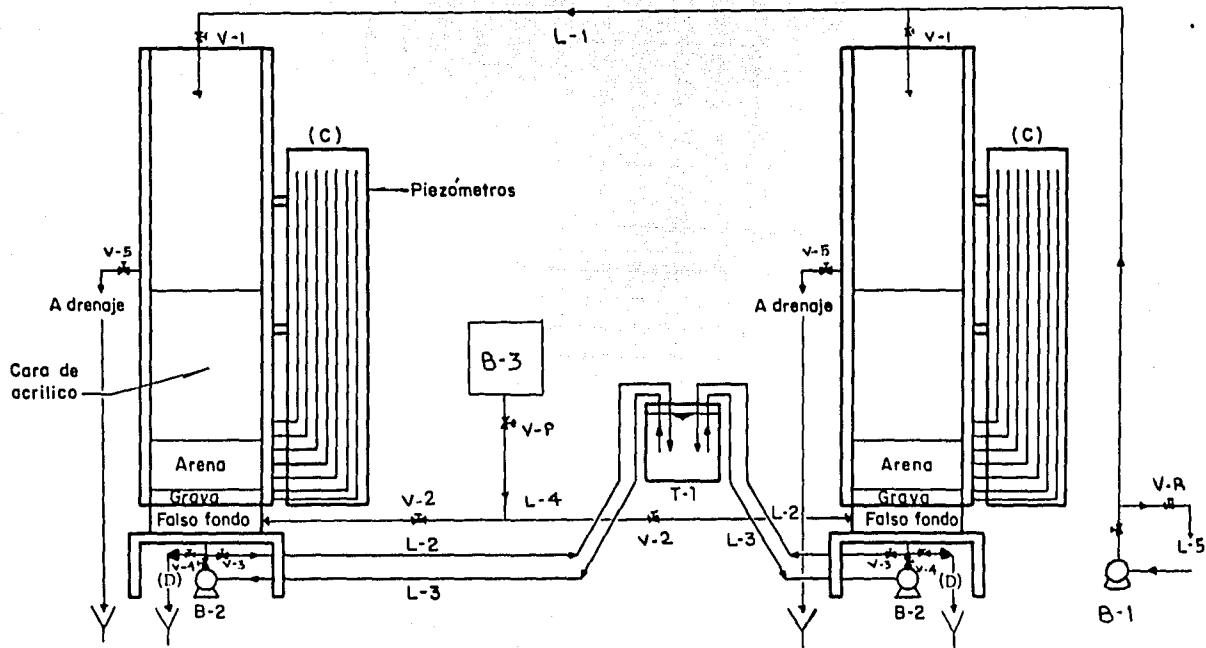


Figura 3. Filtros piloto. Vista general

Los filtros tienen una altura de 5.35 m y cuentan con una base de 0.67 m por lo que su altura total sobre el nivel del suelo es de aproximadamente 6 m (fig 4).

El área transversal de cada uno es de  $0.25 \text{ m}^2$  ( $0.5 \times 0.5 \text{ m}$ ) y están provistos en su parte inferior de un falso fondo de 0.3 m de altura. En la parte frontal existe una placa de acrílico de 0.6 m de base por 2.4 m de altura y 18 mm de espesor, (para efectuar inspecciones visuales).

En la cara B (fig 4), los filtros cuentan con 6 boquillas de 1.5" de diámetro, con el fin de mantener el nivel de carga hidráulica deseada.

Se tienen mangueras de 1 3/4" de diámetro como accesorios para las boquillas de nivel así como para la descarga del filtrado y retrolavado. En la cara A (fig 5), están instalados 7 puertos de muestreo los cuales tienen dos funciones: 1) coleccionar muestras y 2) registrar las pérdidas de carga.

Los piezómetros son de 0.01 m de diámetro y están soportados sobre una tabla de 0.35 m de base por 4 m de altura y 0.03 m de espesor. A lo largo de dicha tabla se encuentra adherida una escala con el fin de leer durante la corrida las pérdidas de carga,  $(\Delta P)$ , en cm de  $\text{CH}_2\text{O}$ .

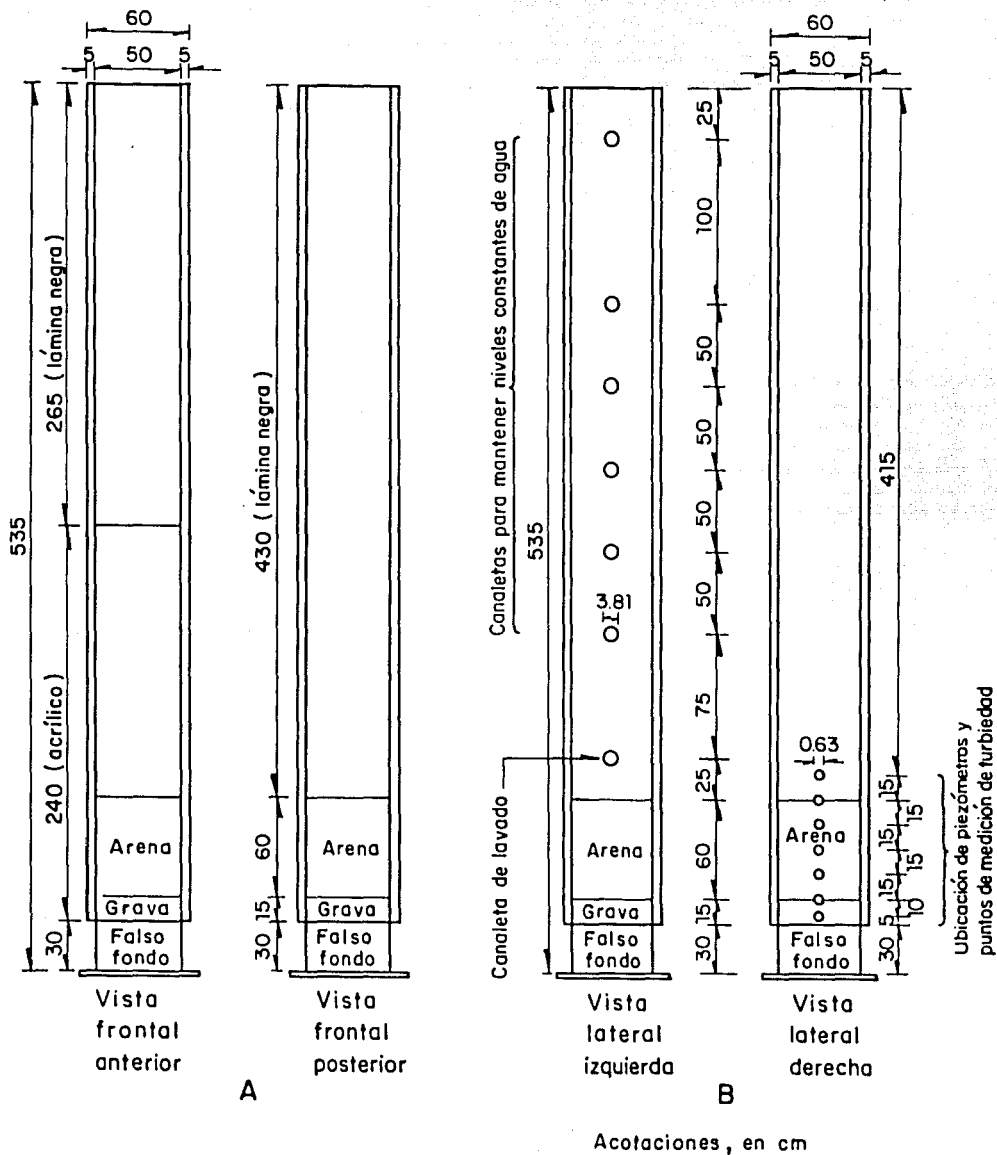


Figura 4. Filtros piloto. Vistas laterales

La distribución de los piezómetros se muestra en la figura 4. El piezómetro No. 1, más alto, sirve para coleccionar la muestra del influente y los siguientes para muestras a diferentes profundidades del lecho.

La estructura de los filtros cuenta con tensores y placas angulares metálicas como refuerzo, para darles estabilidad mecánica durante su funcionamiento.

La parte superior de los filtros está abierta a la atmósfera. Es aquí donde se efectúa la descarga del influente. Dicha descarga se controla mediante una válvula de compuerta (una en cada filtro). El influente es enviado por medio de una bomba centrífuga de 1 HP y está instalada justo en la salida del efluente del sedimentador. Como dispositivo de seguridad y control, dicha bomba cuenta con una válvula check en la succión y una de compuerta en la descarga, aparte de una recirculación. (Fig 5).

En la sección inferior de cada filtro se encuentra localizada la descarga del filtrado, controlada por una válvula de compuerta sobre una tubería de 1 3/4" de diámetro y 0.25 m de largo. Existe una derivación en este punto de 1" de diámetro y 0.5 m de largo que tiene una válvula de control y que sirve para efectuar el retrolavado.

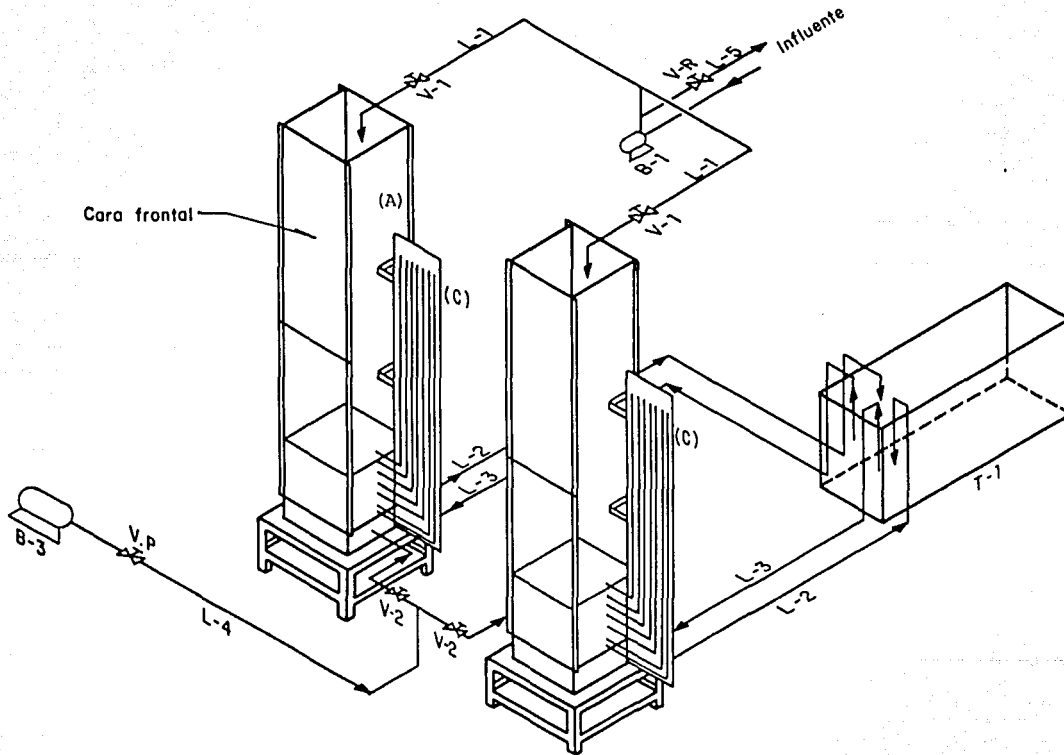


Figura 5. Filtros piloto. Perspectiva

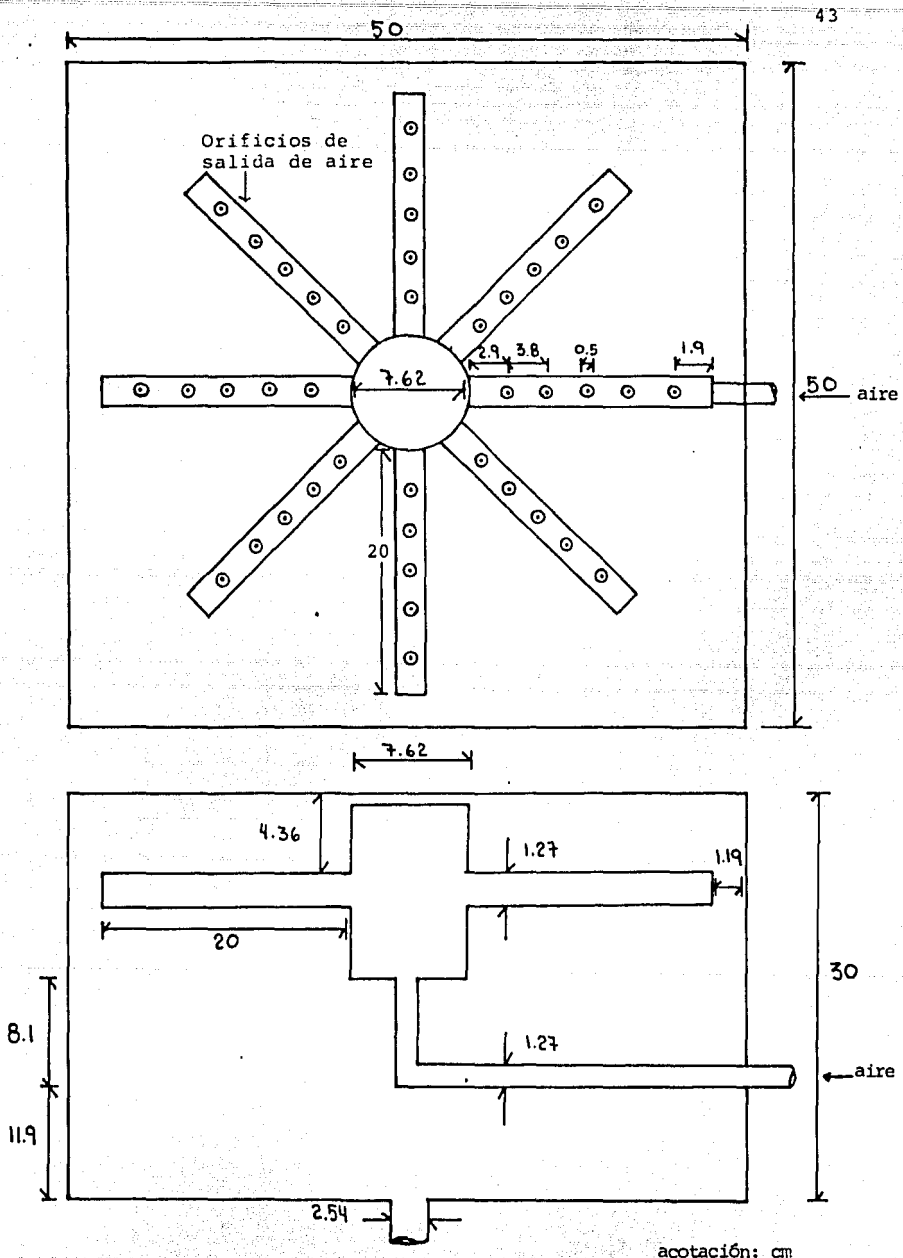


Figura 6. Difusores de aire



Para almacenar el agua de lavado se cuenta con un tanque de  $1 \text{ m}^3$  de capacidad. La bomba de agua utilizada en esta operación es una centrífuga de 1/2 HP. La succión se realiza mediante una manguera de 1 3/4" de diámetro y la descarga con una de 1 1/4". La bomba se opera sobre el piso y puede cambiarse fácilmente de lugar para retrolavar uno u otro filtro.

Como complemento al retrolavado se dispone de un sistema de aire comprimido, la línea llega por un costado a cada filtro en la parte central del falso fondo. El control del gasto se efectúa mediante una válvula de compuerta (una para cada filtro), por una placa de orificio.

La descarga del retrolavado se encuentra del lado de las boquillas, esta salida es de 1 3/4" de diámetro y está controlada por una válvula.

La fig 6 muestra el sistema de difusión del aire en el falso fondo.

## 2.2 Condiciones experimentales

A partir de un estudio previo, se fijó una presión de trabajo de alrededor de 1 m c.a., Avila-Huerta (1987). El influente tratado fue el efluente secundario de lodos activados después de sedimentación de la planta de tratamiento de

aguas residuales de Ciudad Universitaria, para mayores detalles de la planta consultar Jiménez, et al (1985).

La experimentación consistió básicamente en variar la velocidad de filtración dentro del intervalo 5-15 m/h. Se probaron cinco velocidades: 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 y 15 m/h (Tabla 3). Cada corrida se realizó por triplicado por lo que el número total de corridas fue de 15. (Consultar Anexo 3).

TABLA 3. CONDICIONES DE OPERACION Y PARAMETROS MEDIDOS.

Corrida No.	v m/h	Turbiedad			SST			$\Delta P$	
		UTN			mg/l			cm H <sub>2</sub> O	
		Inf.	Perf.	Ef.	Inf.	Int.	Ef.	Perf.	Ef.
1	5.0	X	X	X	X	X	X	X	X
2	7.5	X	X	X	X	X	X	X	X
3	10.0	X	X	X	X	X	X	X	X
4	12.5	X	X	X	X	X	X	X	X
5	15.0	X	X	X	X	X	X	X	X

Inf. = influente

Ef. = efluente

Perf. = perfil

v = velocidad de filtración

SST = sólidos suspendidos totales

$\Delta P$  = caída de presión o pérdida de carga

Cada vez que el  $\Delta P$  se incrementó en  $\delta P$ , ecuación (3), se realizó el muestreo y se evaluó el flujo del efluente, la caída de presión, el tiempo de corrida y la hora

$$\delta P = \frac{\Delta P_6 - \Delta P_0}{N} \quad (3)$$

donde

$\Delta P_0$  : caída de presión inicial

$\Delta P_6$  = 90 cm  $H_2O$  (caída de presión final)

$N$  = 14 (número de muestreos)

$\delta P$  : incremento en la caída de presión.

## 2.2.1 Soporte y lecho filtrante

### 2.2.1.1 Soporte

Como soporte se utilizó grava de diámetros: 19.05, 12.7, 4 y 2 mm, con espesores de capa de 10, 4, 3 y 3 cm respectivamente (total 20 cm).

### 2.2.1.2 Lecho filtrante

A la arena proporcionada por la SARH para la experimentación se le realizó el análisis granulométrico de la siguiente forma:

La muestra de arena se dividió en tres partes y se analizaron por separado. Al final, se hizo un promedio. Los pesos fueron de: 1000 g, 500 g, 160 g (escogidos arbitrariamente).

Las mallas utilizadas se presentan en la Tabla 4.

TABLA 4. MALLAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO

No. Malla	D <sub>mm</sub>
12	1.41
14	1.19
16	1.16
18	1.00
20	0.84
30	0.59
40	0.42
>40	<0.40

D: Apertura del tamiz

Los resultados se muestran en la Tabla 5.

En la figura 7 se muestra la gráfica de la distribución granulométrica a partir de la cual se calculó lo siguiente:

Tamaño efectivo = 0.66 mm

Tamaño al 60% = 1.05 mm

C.U. = 1.59

TABLA 5. RESULTADOS GRANULOMETRICOS

Malla No.	MUESTRA No. 1		MUESTRA No. 2		MUESTRA No. 3		PROMEDIO	
	% Retenido	% Pasa Acumulado	% Retenido	% Pasa Acumulado	% Retenido	% Pasa Acumulado	% Retenido	% Pasa Acumulado
12	0.09	99.91	0.14	99.86	0.23	99.77	0.15	99.85
14	5.51	94.40	7.22	92.64	6.79	92.98	6.51	93.34
16	12.52	81.88	14.41	78.23	3.04	79.94	13.32	80.02
18	45.44	36.44	45.51	32.72	43.90	36.04	44.95	35.07
20	3.10	33.34	3.78	28.94	5.18	30.86	4.03	31.04
30	32.87	0.47	28.50	0.44	30.52	0.33	30.63	0.41
40	0.10	0.37	0.12	0.32	0.13	0.21	0.11	0.30
>40	0.37	0.00	0.32	0.00	0.21	0.00	0.30	0.00

El espesor empleado del lecho fue de 0.60 m

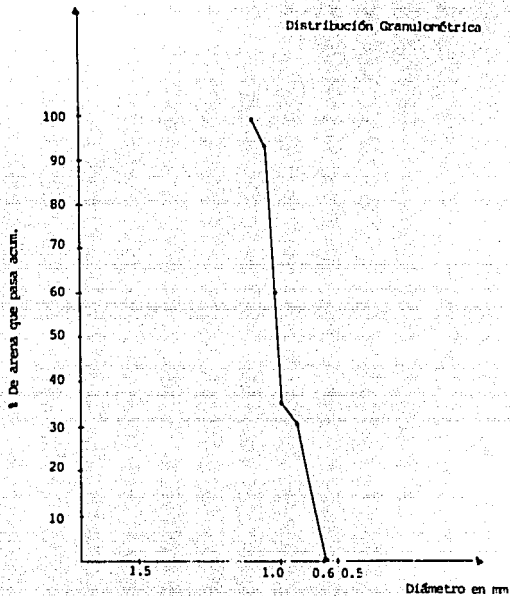


Fig. 7. Distribución granulométrica

#### 2.2.1.2.1 Cálculo de la porosidad promedio

Camp (1964) propuso la siguiente ecuación para el cálculo de la porosidad promedio en lechos filtrantes limpios:

$$P_o = \frac{V_T - V_a}{V_T} \quad (4)$$

donde,

$P_o$ : porosidad promedio del lecho limpio

$V_T$ : volumen total del lecho

$V_a$ : volumen de la arena. Igual a la relación entre el peso de la arena  $w_a$  y su densidad ( $\rho_a$ )

Tomando como base los siguientes datos obtenidos para el medio empleado;

$$w_a = 225 \text{ kg}$$

$$\rho_a = 2650 \text{ kg/m}^3$$

$$V_a = \frac{225 \text{ kg}}{2650 \text{ kg/m}^3} = 0.085 \text{ m}^3$$

$$A_T = 0.25 \text{ m}^2 \text{ (área transversal del filtro)}$$

$$H^* = 0.6 \text{ m (espesor del lecho)}$$

$$V_T = 0.25 \text{ m}^2 \times 0.6 \text{ m} = 0.15 \text{ m}^3$$

La porosidad es:

$$P_o = \frac{(0.15 - 0.085) \text{ m}^3}{0.15 \text{ m}^3} = 0.43$$

Arboleda (1973) propone otro método para obtener dicho valor.

De acuerdo con la ecuación 2:

Así que,

$$P_0 = 1 - \frac{(225 \text{ kg}/0.25 \text{ m}^2)}{2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.6 \text{ m}} = 0.43$$

### 2.2.1.2.2 Cálculo de pérdidas de carga inicial (lechos limpios)

- Ejemplo de cálculo

TABLA No. 6

Diámetro de malla mm	$d_i$ mm	$X_i$ % Retenido	$X_i/d_i^2$ mm <sup>-2</sup>
> 1.41	1.41	0.15	0.0754
1.19	1.30	6.51	3.852
1.16	1.175	13.32	9.648
1.00	1.08	44.95	38.537
0.84	0.92	4.03	4.7613
0.59	0.715	30.63	59.915
0.42	0.505	0.11	0.4313
< 0.42	0.42	0.30	1.7006
$d_i$ = promedio de diámetros de mallas adyacentes			Σ118.9206
$X_i$ = % de material retenido en cada malla			1.189206x10 <sup>6</sup> m <sup>-2</sup>

Pérdida de carga inicial para granos no esféricos, ni de diámetro uniforme, estratificados. Con presencia de flujo laminar.



Al sustituir en la ec 1 los siguientes datos:

$$C_e = 0.75$$

$$P_o = 0.43$$

$$d' = 5$$

$$v = 120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$$

$$g = 7.323 \times 10^{10} \text{ m/día}^2$$

$$v = 0.082 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$L = 0.68 \text{ m}$$

$$\sum_{i=1}^N X_i/d_i^2 = 1.189206 \times 10^6 \text{ m}^{-2}$$

se tiene que:

$$h_o = \frac{(5)(0.082)(120)}{7.323 \times 10^{10}} \frac{(1-0.43)^2}{(0.43)^3} - \frac{36}{(0.75)^2} (0.68)(1.189206 \times 10^6) = 0.142 \text{ m}$$

En la Tabla 7 se presenta una comparación entre los valores teóricos calculados mediante la ecuación 1 y los obtenidos experimentalmente para las diferentes velocidades de filtración.

TABLA 7

v m/h	v m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> día	$\Delta P_{oc}$ cm H <sub>2</sub> O	$\Delta P_{oexp}$ cm H <sub>2</sub> O	% Error
5.0	120	14.2	14.5	2.1
7.5	180	21.3	21.5	0.9
10.0	240	28.4	30.0	5.3
12.5	300	35.5	36.0	1.4
15.0	360	42.6	43.0	0.9

v : velocidad de filtración

$\Delta P_{oc}$  : pérdida de carga inicial calculada

$\Delta P_{oexp}$  : pérdida de carga inicial experimental

$$\% \text{ Error: } \frac{\Delta P_{oexp} - \Delta P_{oc}}{\Delta P_{oexp}} \times 100$$

## 2.3 Métodos analíticos empleados

### 2.3.1 Monitoreo

De acuerdo con las recomendaciones de Montgomery (1985), a las muestras tomadas se les determinó:

- a) Turbiedad: Analizadas mediante un nefelómetro marca Turner con precisión de 0.01 UTN. (Anexo 3)
- b) Sólidos suspendidos totales: Analizados por gravimetría de acuerdo con los métodos estándar (1985).
- c) Caída de presión: Los valores se obtuvieron directamente por medio del sistema de piezómetros instalados.
- c) Velocidad de filtración. Este parámetro de operación se determinó sencillamente, al registrar el tiempo en que cierto volumen de un recipiente, era cubierto (método volumétrico).

### 2.3.2 Lavado

El retrolavado se llevó a cabo en un tiempo total de 10 minutos. Cinco, con agua a una velocidad de 24 m/h y aire a 50 m/h (Young, 1977). En los restantes cinco minutos única-

mente se introdujo agua a la misma velocidad, para enjuagar el medio (ASCE, et al, 1969). La toma de muestras durante el lavado se efectuó cada minuto y se les determinó su turbiedad.

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la experimentación para las quince corridas de filtración se encuentran en el anexo 1.

#### 3.1 *Determinación del final de la carrera*

El parámetro utilizado como indicador del término de la carrera de filtración fue la pérdida de carga (Weber, 1979). En todas las corridas la lectura final que se fijó fue de  $95 \pm 5$  cm  $\text{cH}_2\text{O}$ , que corresponde con la altura de columna de agua sobre el filtro (carga disponible). Este valor estuvo dado por la diferencia de niveles entre el piezómetro del influente y del efluente. Como también la literatura lo menciona, el caudal disminuyó por el paso de sólidos y la calidad del efluente empezó a deteriorarse (aumentó en un 25 - 40% en relación con el valor más bajo obtenido en

cada corrida). Llegado este punto se consideró necesario el lavado del lecho filtrante (ver sección 3.4, fig 13).

### 3.2 Características del depósito

Camp, 1964, afirmó que el depósito del material se efectúa como una cubierta uniforme alrededor de los granos de arena, lo que disminuye la porosidad del lecho. Las observaciones experimentales demuestran que, en efecto, la porosidad disminuye en la zona en que el lecho capta los sólidos pero, la adherencia de ellos al grano no es uniforme.

### 3.3 Duración de la corrida

Dos factores importantes influyeron en la duración de cada corrida:

- a) La concentración del influente y
- b) La velocidad de filtración

#### 3.3.1 Concentración del influente

Las primeras diez corridas se realizaron con una concentración alta en el influente, aproximadamente 30 mg/l (6 UTN). Las cinco restantes, a baja concentración, es decir 8 mg/l (1.5 UTN). La alta concentración se debió a problemas que

a menudo se presentan en el aerador del tanque de lodos activados de la planta de tratamiento de C.U.

En la figura 8 se muestra el efecto de la concentración en la duración de la corrida.

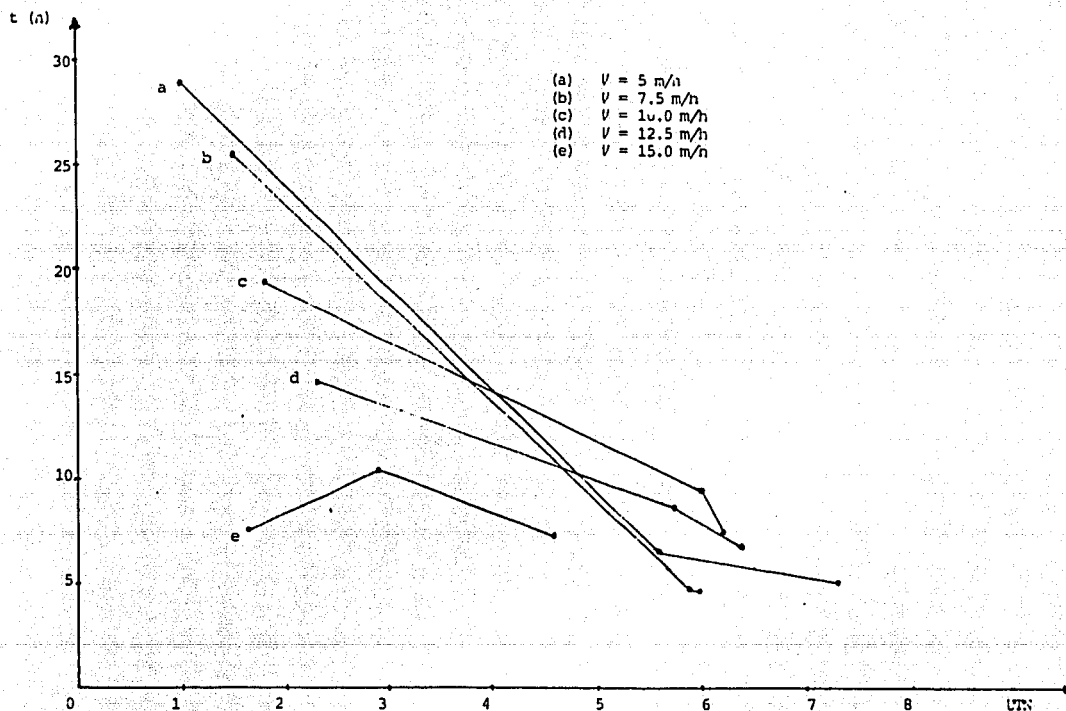


Fig 8. Efecto de la concentración del influente en la duración de corridas de filtración.

Se deduce en forma genérica que al aumentar la concentra-

ción en el influente la duración de la corrida disminuye. Para turbiedades altas varió de 5 a 10 h, y para bajas de 10 a 30 h. Dicha tendencia concuerda con lo expuesto por Dégrémont, 1973.

### 3.3.2 Velocidad de filtración

ASCE et al, 1969 y Dégrémont, 1973, mencionan que al aumentar la velocidad de filtración la duración de la corrida disminuye. Para confirmar lo anterior se realizó el correspondiente análisis, a turbiedad baja y a la alta (fig 9).

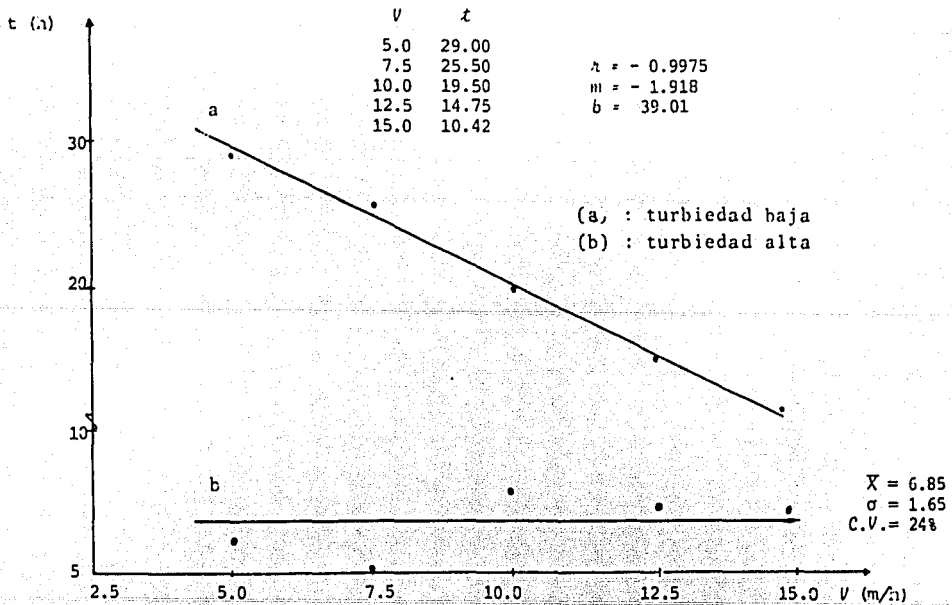


Fig 9. Efecto de la velocidad en la duración de la corrida de filtración.

El fenómeno sólo se observó en turbiedades bajas, ya que resultó que al aumentar la velocidad de filtración, la duración de la corrida disminuye en forma lineal.

En cambio, a turbiedades altas el aumento de la velocidad de filtración no provoca cambios significativos en la duración de la corrida. Probablemente esto se deba a que en ocasiones el influente contenía sólidos de tamaño uniforme (corridas a velocidades de 10.0, 12.5 y 15 m/h), y en otras los sólidos se presentaron en forma de aglomerados de tamaño heterogéneo (velocidades de 5 y 7.5 m/h) que taparon el medio y provocaron un fin prematuro de la corrida.

### *3.4 Eficiencias de remoción de sólidos*

Algunos autores como Metcalf & Eddy, 1977 y Degrémont, 1973 mencionan que la eficiencia de remoción en los filtros aumenta a bajas velocidades de filtración. Dicho fenómeno se analizó para turbiedades semejantes de influente. En las figuras 10 y 11 se muestra el efecto correspondiente tanto en turbiedad como en sólidos suspendidos totales.

Como se observa la eficiencia de remoción de sólidos decrece linealmente al aumentar la velocidad de filtración. La diferencia entre el máximo valor y el mínimo es de 10 unidades porcentuales.



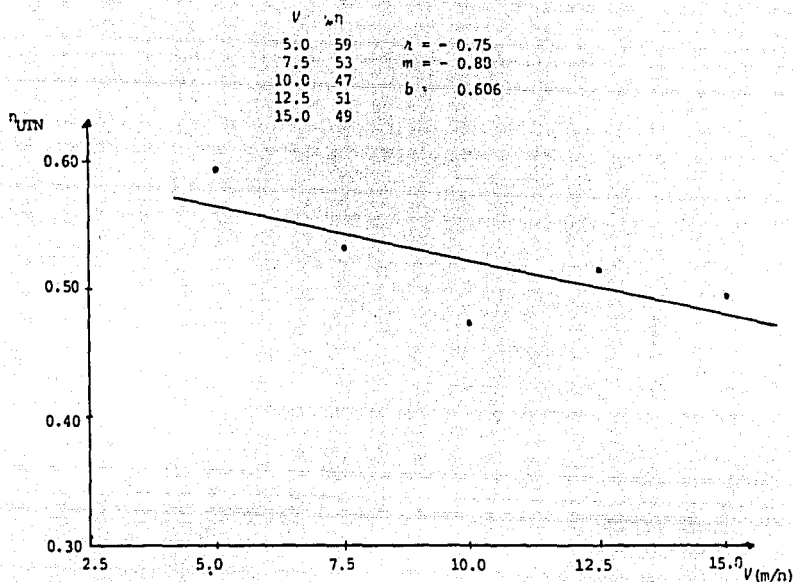


Fig 10. Efecto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción por turbiedad.

En las figuras 12 y 13 se muestran dos curvas típicas de la evolución del influente y efluente a lo largo de una corrida. La primera representa al conjunto cuyo valor de UTN en el influente fue de 5.6 (promedio) y la segunda al de 1.0.

Se puede observar que la calidad del efluente se mantuvo relativamente constante. Para el intervalo de turbiedades altas el efluente tuvo como límite inferior 2 UTN y para el de bajas 0.4 UTN (a bajas o altas velocidades de filtración).

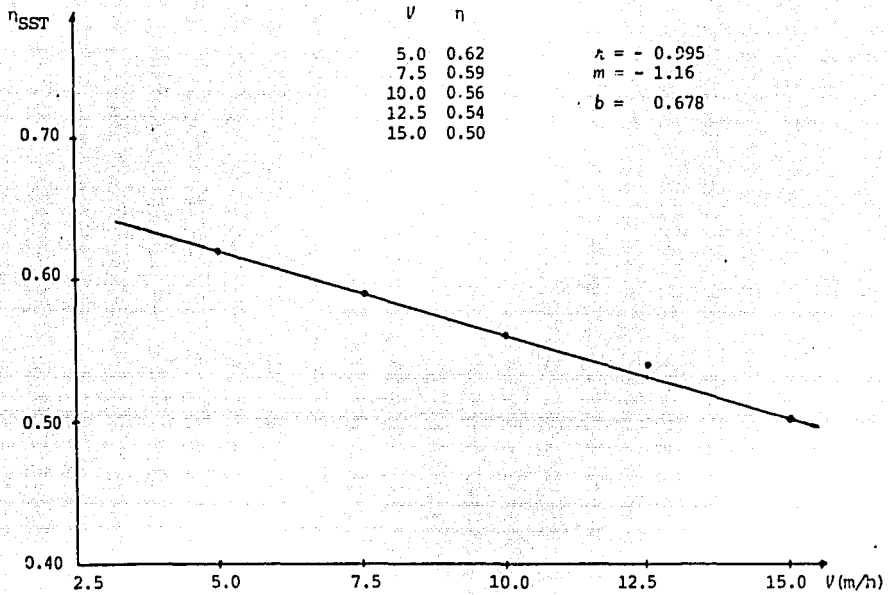


Fig 11. Efecto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción por SST.

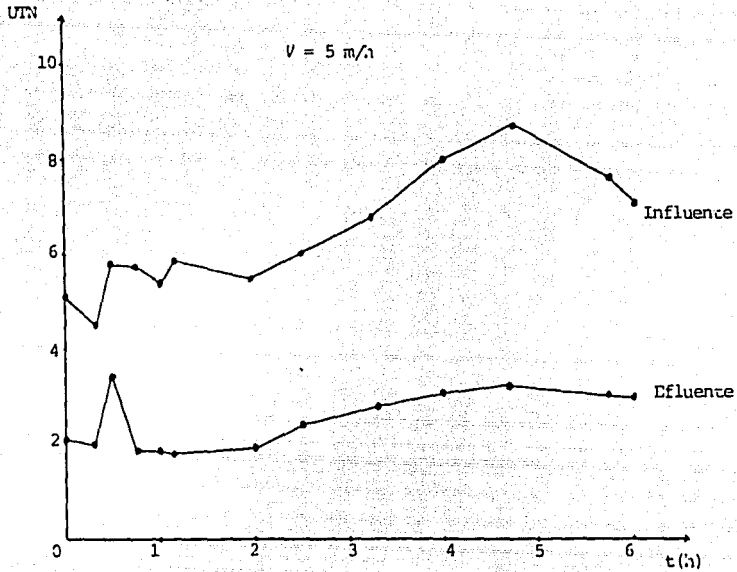


Fig 12. Evolución de la turbiedad influente-efluente para el conjunto  $UTN_i$  altas

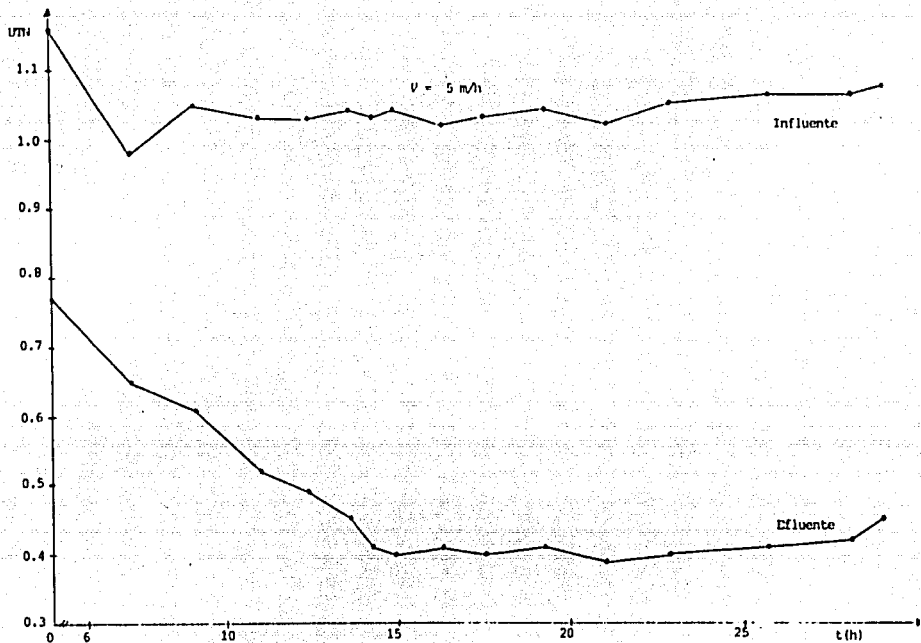


Fig 13. Evolución de la turbiedad influente-efluente para el conjunto  $UTN_i$  bajas

### 3.5 Desarrollo de las pérdidas de carga

#### 3.5.1 Relación entre la pérdida de carga y eficiencia del filtro

En la figura 14 se presenta la relación entre la pérdida de carga (o caída de presión) y la eficiencia del filtro.

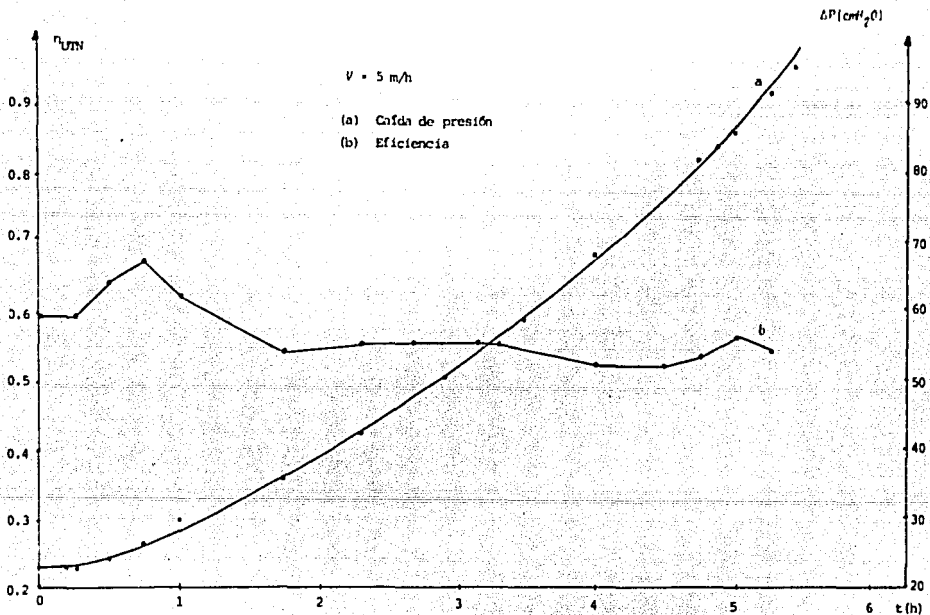


Fig 14. Evaluación de la caída de presión y eficiencia del filtro

El comportamiento mostrado en dicha figura fue el mismo para

la totalidad de las corridas. La pérdida de carga con respecto al tiempo tiene un desarrollo exponencial, mientras que la eficiencia se mantiene aproximadamente constante. Sólo se observó una ligera disminución de la eficiencia cuando la caída de presión empezó a marcar el fin de la corrida.

### 3.5.2 Pérdida de carga inicial

En la figura 15 se muestra el comportamiento de la pérdida de carga inicial con respecto a la velocidad de filtración.

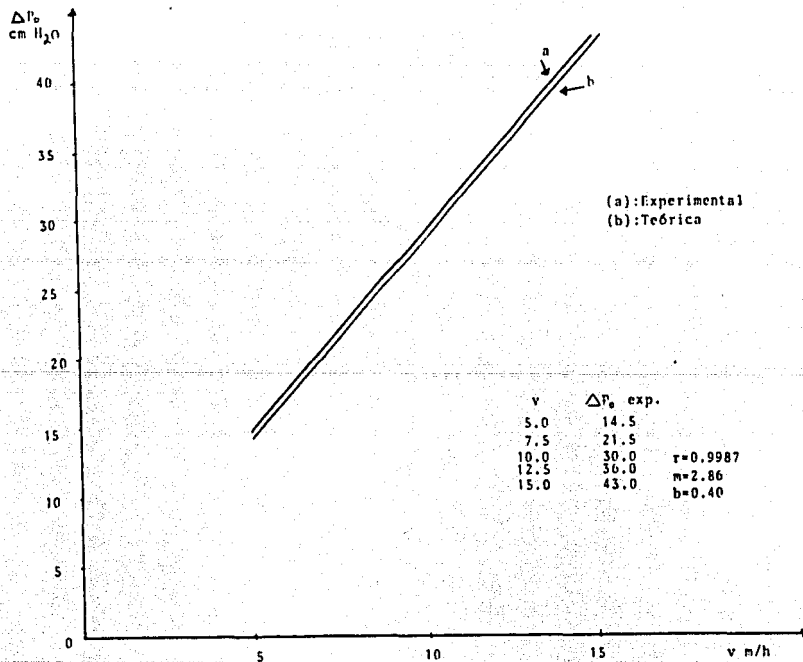


Fig 15. Efecto de la velocidad de filtración sobre la pérdida de carga inicial.

Al aumentar la velocidad de filtración aumenta linealmente la pérdida de carga inicial, como lo indica Arboleda (1973).

### 3.5.3 Pérdida de carga a través del filtro

Se obtuvieron gráficas de la relación de la caída de presión como la de la fig 16 que son del tipo de las presentadas por Degrémont, 1973 y Weber, 1977.

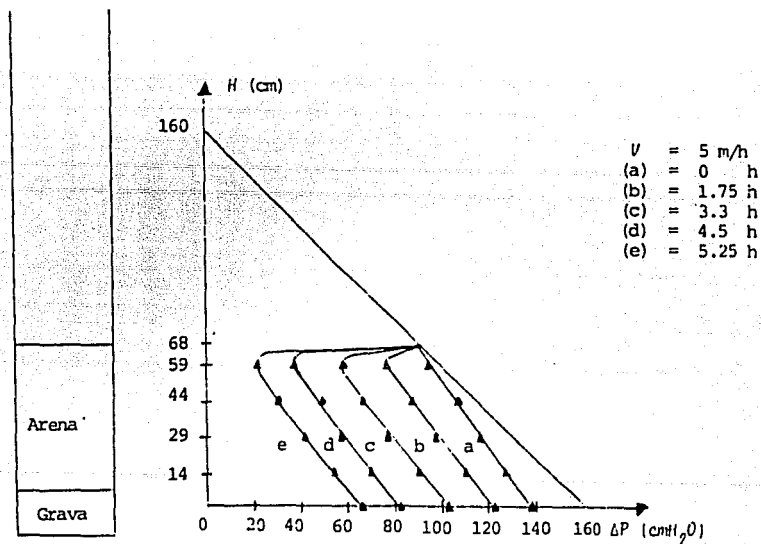


Fig 16. Evolución de la pérdida de carga  
Turbiedad = 7.3 UTN

Obsérvese que la primera línea, (a), es una recta debido a que el lecho se encuentra limpio y la caída de presión es proporcional a la profundidad del medio y función de la ve-

locidad de filtración utilizada. Al comparar las líneas de la fig 16 con las de las fig 17 y 18, se observa que tienen cada vez menor pendiente, debido a una mejor penetración de sólidos al aumentar la velocidad.

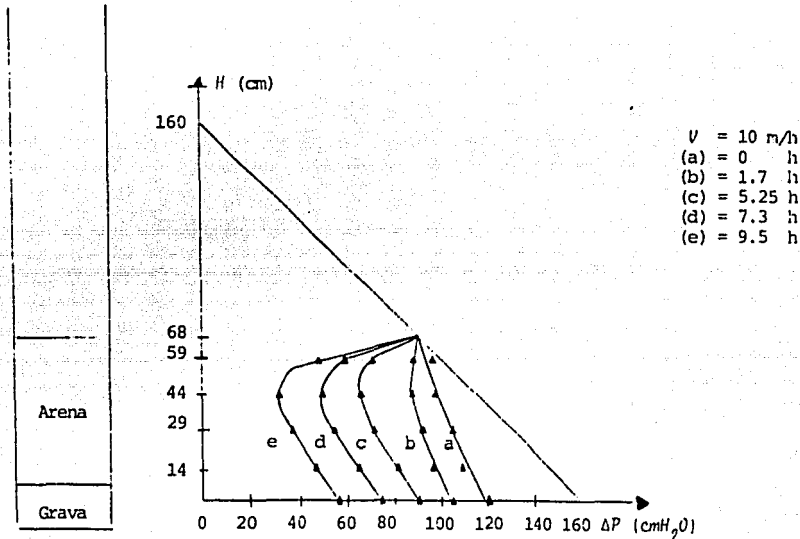


Fig 17. Evolución de la pérdida de carga  
Turbiedad = 6.0 UTN

Young, 1977, propone que a mayor velocidad el depósito del material ocurre a mayor profundidad del lecho. Por otro lado Camp 1964, considera que la mayor parte de los sólidos son retenidos en las capas superiores del empaque, aún si se utilizan velocidades de filtración elevadas. De acuerdo con las figuras anteriores y con el criterio de Degrémont 1973 y Weber 1979, se observa que la captura de la mayor can



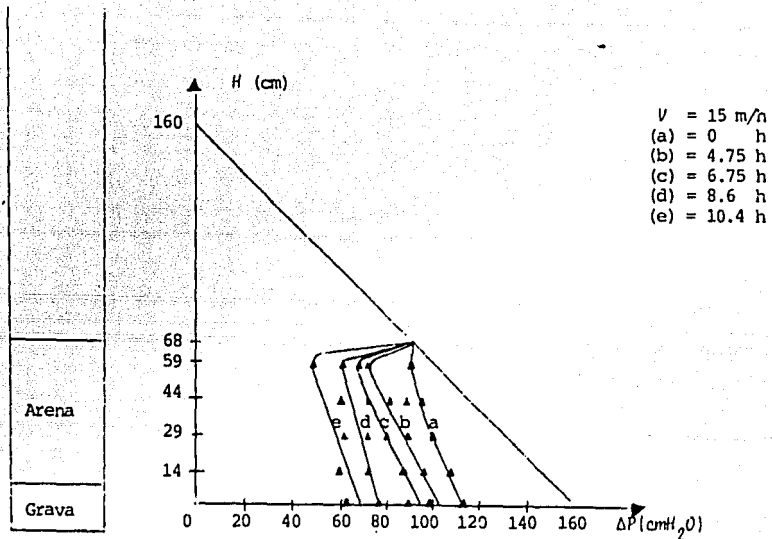


Figura 18. Evolución de la pérdida de carga.  
Turbiedad = 1.6 UTN

tividad de sólidos se lleva a cabo en las capas superiores del lecho (10 - 16 cm), fig 16. En algunas corridas (fig 17) la captura se realizó hasta 25 cm de profundidad.

Por otra parte, no se excluye el hecho de una posible estratificación por el lavado (ASCE et al, 1969) que provoque tener los granos más finos en la superficie y las más gruesos en el fondo, que hizo que los sólidos no penetrasen al fondo del lecho.

### 3.6 Lavado

La eliminación de los sólidos retenidos se produjo con una expansión del lecho del 15% de acuerdo a las condiciones experimentales del lavado fijadas (Metcalf & Eddy, 1977; Dahab-Young, 1977; ASCE et al, 1969).

Después de nueve lavados (nueve corridas) la pérdida de lecho fue de 4 cm que equivale a 26.5 kg (7% del espesor del lecho).

En la figura 19 se muestra el comportamiento de la curva de turbiedad contra tiempo de lavado.

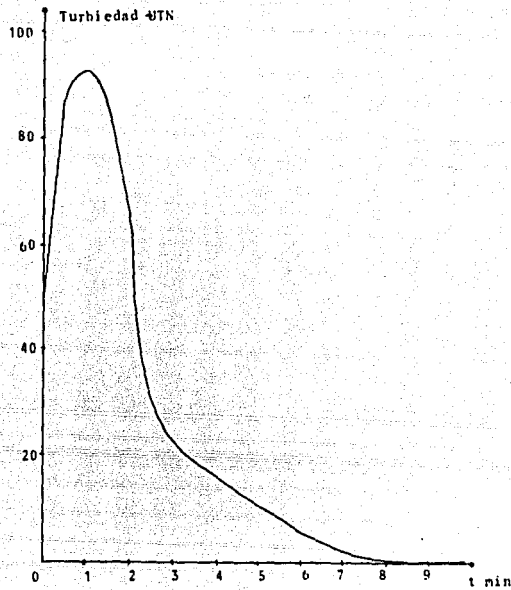


Fig 19. Curva de lavado

Como se observa la eliminación de sólidos llega a un máximo a partir del cual decrece hasta que el filtro esta limpio.

### 3.6.1 Eficiencia del lavado

La eficiencia del lavado referida a turbiedad se calcula por medio de la ecuación 5

$$\eta_L = \frac{M \cdot D}{M \cdot R} \quad (5)$$

donde;

$\eta_L$  : eficiencia del lavado

M·D: material desprendido

M·R: material retenido

El material desprendido se obtiene por medio de la ecuación

6

$$M \cdot D = \text{área bajo la curva de lavado} * \text{gasto lavado} \quad (6)$$

y el material retenido por medio de la ecuación 7

MR es el área bajo las curvas formadas por la turbiedad del influente y el efluente contra tiempo de cada corrida \* gasto promedio de filtración (7)

Como en cada caso el área de filtración es la misma; para obtener  $\eta_L$  se emplea:

$$\eta_L = \frac{\text{área bajo la curva de lavado} * \text{velocidad de lavado}}{\text{área entre las curvas de influente y efluente} * \text{velocidad promedio de filtración}} \quad (8)$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8.

En la Tabla 9 se reporta la cantidad de sólidos retenidos en la arena. El cálculo se efectuó con la ayuda de la ecuación 9

TABLA 8. EFICIENCIAS DE LAVADO

$V_L$ m/h	$V_F$ m/h	A·F UTN*min	A·L UTN*min	Turbiedad final UTN	$\eta_{UTN_L}$	S·F (mg/l) min	S·L (mg/l) min	$\eta_{SST_L}$
24	5.0	1607	249	0.70	0.74	8565	4000	* 1.00
24	5.0	1246	253	0.60	0.97	7974	1420	0.85
24	5.0	903	246	0.42	1.00*	12004	2750	* 1.00
24	7.5	922	259	0.74	0.90	7201	2370	* 1.00
24	7.5	1022	236	0.70	0.74	5838	2600	* 1.00
24	7.5	1194	401	1.00	1.00*	3984	2830	* 1.00
24	10.0	1018	258	0.47	0.61	7235	2860	0.95
24	10.0	1154	263	0.29	0.55	8714	3360	0.93
24	10.0	1418	566	1.00	0.96	3111	1800	* 1.00
24	12.5	1327	203	0.49	0.29	3837	1820	0.91
24	12.5	1156	248	0.40	0.41	8335	2140	0.49
24	12.5	1296	525	0.80	0.78	3703	1390	0.72
24	15.0	865	235	0.40	0.43	7825	--	--
24	15.0	937	261	0.46	0.46	6560	--	--
24	15.0	411	156	0.38	0.61	3797	--	--
A·F : área entre las curvas de influente-efluente			$\bar{x}$	0.59	0.70			0.91
A·L : área bajo la curva de lavado			$\sigma$	0.224	0.24			0.15

$V_L$  : velocidad de lavado

$V_F$  : velocidad de filtración

S·F:  $\frac{mg}{l}$  \*min durante la filtración

S·L:  $\frac{mg}{l}$  \*min durante el lavado

$\eta_{UTN_L}$  : Eficiencia de lavado referido a turbiedad

$\eta_{SST_L}$  : Eficiencia de lavado referido a sólidos suspendidos totales

\* Eficiencias mayores a 100%, para promedio se tomó como 100%

TABLA 9. CANTIDAD DE SOLIDOS RETENIDOS EN LA ARENA

Vol. arena $m^3$	V m/h	S.F $\frac{mg}{l} * \min$	$Q_3$ $\frac{m}{h}$	Z $\frac{g}{m^3 \text{arena}}$
0.15	5.0	8565	1.250	1192
0.15	5.0	7974	1.250	1110
0.15	5.0	12004	1.250	1670
0.15	7.5	7201	1.875	1503
0.15	7.5	5838	1.875	1219
0.15	7.5	3984	1.875	832
0.15	10.0	7235	2.500	2014
0.15	10.0	8714	2.500	2425
0.15	10.0	3112	2.500	866
0.15	12.5	3837	3.125	1342
0.15	12.5	8335	3.125	2900
0.15	12.5	3703	3.125	1288
0.15	15.0	7825	3.750	3267
0.15	15.0	6560	3.750	2735
0.15	15.0	3797	3.750	1585
				1836
				+ 862

Vol: volumen

V : velocidad de filtración

Z : material retenido por volumen de arena en  $m^3$

S.F:  $\frac{mg}{l} * \min$  durante la filtración

Q : gasto volumétrico de filtración

$$\frac{M \cdot R}{m^3 \text{ arena}} = \frac{\text{Área entre las curvas influente-efluente de SST} \cdot \text{Gasto volumétrico}}{\text{volumen de la arena}} \quad (9)$$

donde

SST: sólidos suspendidos totales

CAT: cantidad de agua tratada

En un metro cúbico de arena con porosidad de 0.43 existen 430 l de espacios vacíos. Si de acuerdo con Degrémont (1973) únicamente se puede ocupar el 25% con flóculos, para la arena empleada se cuenta con sólo 108 l/m<sup>3</sup>.

Por otra parte, si en un espesador se logran concentraciones de lodos del orden de 25 a 30 g/l esto significa que para un lodo bien compactado sin deformación se removerían

$$30 \frac{\text{g}}{\text{l}} \times 108 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} = 3240 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \text{ (flóculo coloidal).}$$

Por lo tanto, el valor promedio (Tabla 9), indica que es aún posible obtener un valor mayor. Sin embargo, para las corridas de mayor velocidad (12.5 y 15 m/h) hubo ocasiones en las que se alcanzaron valores cercanos debido a la colmatación más uniforme del filtro y al fin de la corrida por el empleo casi total del medio filtrante.

En cada corrida el volumen de agua utilizada para lavado fue de 1 m<sup>3</sup>.

### 3.7 Cantidad de agua tratada

En la Tabla 10 se muestra la cantidad de agua tratada en cada corrida.

TABLA 10. CANTIDAD DE AGUA TRATADA

$V_f$ m/h	Duración h	$m^3$ Tratados	UTN <sub>i</sub>
5.0	6.5	8.13	5.6
5.0	5.3	6.56	7.3
5.0	29.0	36.25	1.0
7.5	4.8	8.90	5.9
7.5	4.6	8.59	6.0
7.5	25.5	47.81	1.5
10.0	7.5	18.75	6.2
10.0	9.5	23.75	6.0
10.0	19.5	48.75	1.8
12.5	6.8	21.10	6.4
12.5	8.8	27.34	5.7
12.5	14.8	46.09	2.3
15.0	7.3	27.19	4.6
15.0	10.4	39.06	2.9
15.0	7.6	28.4	1.6

Se observa que utilizando una velocidad de filtración de 5 m/h se obtiene la mayor eficiencia (60%) y el mayor tiempo de corrida (29.5 h). Si se utiliza una velocidad de 10 m/h, de acuerdo al tiempo de corrida, se trata la mayor cantidad de agua ( $49 m^3$ ), con una eficiencia no muy baja (56%).

En la Tabla 11 se efectuó una extrapolación de los datos a una operación mensual suponiendo 1 hora para cada lavado.



TABLA 11. PRODUCCION DE AGUA TRATADA Y AGUA DE RETROLAVADO PARA UN MES DE OPERACION

$V_f$ m/h	Duración h	$\% \eta$	No. Corridas	Agua tratada $m^3$	Agua de lavado $m^3$	% de agua utilizada en lavado
5.0	29.5	62	23	833.75	23	2.8
7.5	25.5	59	27	1291.00	27	2.1
10.0	19.5	56	34	1657.50	34	2.1
12.5	14.5	54	45	2074.00	45	2.2
15.0	10.4	50	70	2734.00	70	2.6

El % de agua utilizada para lavado es mayor para una  $V_f = 5$  m/h aunque el cambio con respecto a los demás no es significativo. Se trata más agua a una  $V_f = 15$  m/h.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

##### 4.1 Conclusiones

- El tamaño de la arena se considera aún pequeño pues las capas superiores del lecho atraparon la mayor cantidad de sólidos, y la corrida de filtración terminó en lapsos cortos de tiempo. Asimismo la porosidad del medio disminuyó más rápido en la superficie que en la profundidad del lecho. Pero pudo observarse que a mayor velocidad de filtración mayor penetración de los sólidos dentro del medio filtrante.
- Es evidente que la concentración de sólidos en el efluente influye considerablemente sobre la duración de la corrida, así para turbiedades de 5 a 8 la duración varía entre 5 a 10 h y para turbiedades bajas (1 a 2

UTN) se tienen duraciones entre 15 y 30 h para velocidades inferiores a 12.5 m/h . Asimismo se encontró una relación muy clara entre la velocidad de filtración y la duración de la corrida, siendo estas superiores a 12 horas sólo para velocidades menores de 12.5. Este efecto es aún más notorio para turbiedades altas que para bajas. Este mismo efecto se observó para el rendimiento.

- Las gráficas de pérdida de carga a lo largo del medio y del rendimiento en función de la duración de la corrida muestran que la operación siempre se paró por la falta de carga y no por el deterioro en la calidad del efluente.

Si aumenta la concentración en el influente por filtrar, la duración de la corrida disminuye. Para turbiedades altas varía de 5 a 10 h , y para bajas de 10 a 30 h .

Cuando la velocidad de filtración aumenta la duración de la corrida disminuye linealmente, así lo hace también la eficiencia de remoción de sólidos, aunque esta última varió en sólo 10 unidades porcentuales dentro del intervalo de velocidades manejado.

UTN) se tienen duraciones entre 15 y 30 h para velocidades inferiores a 12.5 m/h . Asimismo se encontró una relación muy clara entre la velocidad de filtración y la duración de la corrida, siendo estas superiores a 12 horas sólo para velocidades menores de 12.5. Este efecto es aún más notorio para turbiedades altas que para bajas. Este mismo efecto se observó para el rendimiento.

- Las gráficas de pérdida de carga a lo largo del medio y del rendimiento en función de la duración de la corrida muestran que la operación siempre se paró por la falta de carga y no por el deterioro en la calidad del efluente.

Si aumenta la concentración en el influente por filtrar, la duración de la corrida disminuye. Para turbiedades altas varía de 5 a 10 h , y para bajas de 10 a 30 h .

Cuando la velocidad de filtración aumenta la duración de la corrida disminuye linealmente, así lo hace también la eficiencia de remoción de sólidos, aunque esta última varió en sólo 10 unidades porcentuales dentro del intervalo de velocidades manejado.

- A bajas o altas velocidades de filtración la turbiedad promedio del efluente se mantuvo constante (2 UTN) tanto para concentraciones altas de influente (30 mg/l) y 0.4 para bajas.

La pérdida de carga a lo largo de la corrida tiene un desarrollo exponencial, mientras que la eficiencia del filtro se mantiene, en promedio, constante y sólo al fin de la carrera la eficiencia decrece para altas velocidades de filtración.

El sistema de lavado provoca la estratificación del medio granular, lo que perturba la penetración de los sólidos. Pero para fines de limpieza resultó eficiente. Las pérdidas del lecho no fueron significativas, pues la expansión del 15%, lograda por el sistema arena-agua fue adecuada.

- Por último se señala que de acuerdo a todo el análisis presentado la velocidad óptima de filtración es de 15 m/h, esto debido a la mayor producción de agua.

#### 4.2 Recomendaciones

- Experimentar con tamaño efectivo de arena mayor.

- Evaluar y profundizar el estudio de técnicas de lavado de filtros de arena.
- Seguir experimentando sobre otras variables de filtración como: espesor del lecho, características de las partículas suspendidas (tamaño, densidad, forma, etc.); temperatura, pH del líquido filtrado.
- Aplicar los siguientes resultados obtenidos a plantas de tratamiento de aguas residuales: Controlar el nivel de agua (columna de agua) respecto al flujo del efluente para evitar aumentos o disminución de la velocidad de filtración y así evitar alteración en la eficiencia y/o en la duración de la corrida; por tanto verificar regularmente la velocidad de filtración cuidando no decrezca más de un 15%. Mejorar en general los sistemas de aforo.
- Revisar periódicamente el estado del equipo.
- Limpiar regularmente el sistema de medición de caída de presión.
- Evaluar la calidad del medio filtrante y cambiarlo o reponer cuando resulte necesario.
- Revisar que la grava de soporte no sufra mezclado, pues

de ello depende evitar pérdidas del medio por el desahúe.

## BIBLIOGRAFIA

1. Amirtharajah, A. (1985). The interface between filtration and backwashing. Wat. Res., 19-5, 581, mayo.
2. Arboleda, V.J. (1969). Manual de tratamiento de aguas potables. Programa de Educación de Ingeniería Sanitaria. Caracas Venezuela, Publicación 30, pp 353.
3. Arboleda, V.J. CEPIS/OMS (1973). Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua. pp 558.
4. Avila M.G. y Huerta D.J. (1986) (Tesis). Estudio de la filtración de los efluentes secundarios de la planta de tratamiento de aguas residuales de C.U.
5. AWWA, ASCE, CSSE (1969). Water Treatment Plant. Publicado por AWWA Inc. New York. N.Y.
6. Badger W.L., Julius T.B., (1964). Introducción a la ingeniería química. Mc Graw-Hill, pp. 573-592.
7. Baylis John R., Gullans O. y Hudson H.E. Jr. (1975). Control de calidad y tratamiento de aguas. Cap. 7. Filtración. AWWA, Madrid.



8. Camp. F. Thomas R. (1964). Theory of water filtration. ASCE, agosto.
9. Dahab M. and Young J. (1977). Unstratified-bed filtration of wastewater. ASCE, Febrero.
10. Deb A. (1969). Theory of sand filtration. ASCE, junio.
11. Dégrémont (1973). Manual técnico del agua.
12. Francois R.J. and Van Haute A.A. (1985). Backwashing and Conditioning of a deep filter. Wat. Res. 19-11, 1357 nov.
13. Foust Alan S., Wenzel Leonard A, Clump C.W., Maus L. y Bryce A. (1984). Principios de operaciones unitarias. Edit. Continental S.A. de C.V., Decimosexta impresión.
14. Fox David M. and Cleasby John L. (1966). Experimental evaluation of sand filtration. Theory. Octubre.
15. Hillebue Herman E., Manual de tratamiento de aguas. Depto de Sanidad del Estado de Nueva York. Edit. Limusa, Wiley S.A. pp 82-100.

16. Hsiung Kou-Ying (1974). Determining Specific Deposit, Backwashing Technique. ASCE, abril.
17. Lee Fred, Jones A., Newbry Brooks (1982). Alternative Approach to assessing water quality impact of waste water effluents. JWPCF, 54, 165, feb.
18. Mc Cabe-Smith (1963). Operaciones Unitarias de Ingeniería Química. Mc Graw-Hill.
19. Metcalf y Eddy (1977). Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Edit. Labor S.A. pp. 678-679.
20. Montgomery James M. (1985). Water treatment, principles and design. Inc. A. Wiley Interscience Publications, Cap. 8.
21. Ramalho R.S. (1977). Introduction to wastewater treatment process. Laval University Quebec, Canadá. Academic Press. pp. 70, 158, 237, 344.
22. Sawyer C.N. and Perry L. (1978). Chemistry for environmental engineering. 3<sup>rd</sup> Edition. Mc Graw-Hill, pp. 331-333.
23. Siemak R.C. (1984). Tertiary filtration: practical

design considerations, JWPCF 56,944, agosto.

24. Tchobanoglous G. and Eliassen R. (1970). Filtration of treated sewage effluent. JSD, ASCE, Vol. 96, No. SAZ.
25. Tchobanoglous G. (1970). Filtration Techniques in tertiary treatment. JWPCF, Vol. 42, No. 4.
26. Valiente B. (1973). Pfacticas de laboratorio de momentum y calor. Fac. de Química, UNAM. 5a reimpresión (1985). pp 152-170.
27. Weber Walter J. (1979). Control de calidad del agua, procesos fisicoquímicos. Edit. Reverté, S.A., pp. 145-200.

## A N E X O S

## **ANEXO 1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES**

Corrida No 1 Duración: 6.5 h Filtración: 5<sup>m</sup> h Qi: 0.35 l/s Fecha: 5-10-27

T.M.A.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control		
	UTN	ΔP em H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP em H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP em H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP em H <sub>2</sub> O	ms/l
1	5.25	0	34	5.33	0	-	0.3 1/2	6.20	0	-	0.27 1/2	7.10	0	-	
2	3.34	5.0	-	1.0 h	3.27	10.0	-	2.33 h	4.24	24.0	-	6.03 h	4.45	14.0	
3	2.52	1.5	31	14.0 h	2.11	13.0	-	16.33 h	3.20	35.0	-	18.05 h	3.54	80.0	
4	2.18	13.0	-	0.468	1.93	15.0	-	0.575	3.05	37.0	-	0.572	2.22	82.0	
5	2.17	12.0	-	-	1.91	17.0	-	-	2.95	34.5	-	-	3.05	75.0	
6	2.09	20.0	16	-	1.90	19.0	-	-	2.35	42.0	-	-	2.51	84.0	
7	1.74	0	-	0.3 1/2	5.90	0	-	0.3 1/2	8.04	0	-	0.27 1/2	5.40	0	
8	3.24	5.0	-	1.17 h	3.10	13.0	-	3.0 h	5.18	10.0	-	6.5 h	3.05	18.0	
9	1.25	9.0	-	14.11 h	2.11	16.0	-	17.0 h	3.60	15.4	-	14.5 h	3.70	86.5	
10	2.05	14.0	-	0.626	2.07	19.0	-	0.416	3.40	17.5	-	0.580	2.77	89.5	
11	2.00	19.0	-	-	1.84	22.0	-	-	3.10	30.0	-	-	2.50	90.5	
12	1.97	21.0	-	-	1.85	24.0	-	-	3.04	52.0	-	-	2.48	91.5	
13	5.33	0	-	0.3 1/2	5.47	0	-	0.24 1/2	8.04	0	-	-	-	-	
14	3.10	5.0	-	1.42 h	4.50	16.0	-	3.47 h	6.05	51.0	-	-	-	-	
15	2.30	10.0	-	13.74 h	2.75	21.0	-	12.67 h	3.75	51.0	-	-	-	-	
16	5.30	14.0	-	0.416	2.36	24.0	-	0.62	3.35	59.0	-	-	-	-	
17	4.03	13.0	-	-	2.10	27.0	-	-	3.43	61.0	-	-	-	-	
18	3.38	24.5	-	-	2.10	29.0	-	-	3.30	63.0	-	-	-	-	
19	5.80	0	34	0.3 1/2	6.05	0	-	0.27 1/2	7.58	0	34	-	-	-	
20	3.15	6.8	-	2.51 h	4.10	21.5	-	5.75 h	6.00	63.0	-	-	-	-	
21	2.32	11.3	30	15.5 h	2.70	26.0	-	18.15 h	4.06	66.5	31	-	-	-	
22	2.07	14.3	-	0.603	2.74	29.5	-	0.603	3.45	64.0	-	-	-	-	
23	1.91	17.3	-	-	2.45	31.5	-	0.088	3.35	91.0	-	-	-	-	
24	1.29	19.3	14	-	2.40	34.0	-	0.477	3.01	83.0	12	-	-	-	

Corrida No. 2 Duración: 5.25h Filtración: 5m/h Qi: 0.35 1/2 Fecha: 9-10-87

T.M.	Datos de control			SST	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.
	UTN	DP	cm H <sub>2</sub> O		UTN	DP	cm H <sub>2</sub> O		UTN	DP	cm H <sub>2</sub> O		UTN	DP	cm H <sub>2</sub> O	
1	Q=0.45 1/2	6.26	0	32	0.34 1/2	6.20	0	32	0.31 1/2	8.05	0	32	0.15 1/2	8.15	0	32
2	L=0h	4.39	5.0	-	1.0h	4.40	13.5	-	4.0h	4.90	51.5	-	5.25h	6.10	75.0	-
3	L=13.0h	3.00	9.5	8	14.0h	2.75	13.3	14	17.0h	4.25	60.0	15	18.25h	4.00	84.5	12
4	Q=0.588	2.66	14.0	-	0.619	2.50	22.5	-	0.516	3.90	62.5	-	0.512	3.90	86.5	-
5	Q=0.15	2.60	18.5	-	0.562	2.64	20.5	-	0.531	4.09	65.5	-	0.313	3.90	87.0	-
6	Q=0.875	2.58	11.0	4	0.15	2.36	29.5	8	0.813	3.90	63.5	6	0.632	3.78	91.0	10
1	Q=0.35 1/2	5.98	0	32	0.34 1/2	5.54	0	32	0.3 1/2	8.10	0	32				
2	L=0.25h	4.20	5.0	-	0.75h	4.99	21.0	-	4.5h	6.20	60.0	-				
3	L=13.25h	2.80	10.5	9	14.15h	2.85	26.5	11	17.5h	4.10	64.0	19				
4	Q=0.589	2.74	15.0	-	0.535	2.69	30.0	-	0.524	4.05	71.5	-				
5	Q=0.39	2.10	19.5	-	0.656	2.74	33.5	-	0.406	4.05	74.0	-				
6	Q=0.909	2.76	22.5	3	0.83	2.59	30.5	6	0.688	3.90	76.0	10				
1	Q=0.35 1/2	6.90	0	32	0.33 1/2	6.40	0	32	0.24 1/2	8.35	0	32				
2	Q=0.51	5.15	8.5	-	2.33h	5.10	26.5	-	4.75h	6.20	66.5	-				
3	L=13.5h	2.90	12.7	13	16.33h	3.45	33.5	13	17.75h	4.21	74.5	16				
4	Q=0.638	2.79	16.5	-	0.515	3.13	26.0	-	0.523	3.99	76.5	-				
5	Q=0.594	2.56	21.0	-	0.694	3.28	36.5	-	0.600	4.60	79.0	-				
6	Q=0.813	2.50	24.0	6	0.781	3.00	42.0	7	0.781	3.90	81.5	7				
1	Q=0.35 1/2	7.10	0	32	0.33 1/2	7.95	0	32	0.23 1/2	8.70	0	-				
2	L=0.75h	5.10	11.5	-	3.33h	5.75	34.7	-	5.0h	6.50	64.5	-				
3	L=13.75h	2.80	16.0	14	16.33h	3.80	42.2	10	18.0h	7.45	74.0	-				
4	Q=0.666	2.70	19.5	-	0.553	3.66	50.5	-	0.555	3.93	81.6	-				
5	Q=0.563	2.50	23.3	-	0.688	3.60	53.2	-	-	3.90	83.5	-				
6	Q=0.75	2.37	26.0	8	0.813	3.65	59.0	6	-	3.87	85.5	-				

Corrida No 3 Duración: 4.25 h Filtración: 7.5 m/h  $Q_i$ : 0.52 1/2 Fecha: 7.10-87

P.A.I.O.T	Datos de control				Datos de control				Datos de control				Datos de control			
	UTN	ΔP	S.S.T.		UTN	ΔP	S.S.T.		UTN	ΔP	S.S.T.		UTN	ΔP	S.S.T.	
	cm H <sub>2</sub> O	cm H <sub>2</sub> O	ms/l		cm H <sub>2</sub> O	cm H <sub>2</sub> O	ms/l		cm H <sub>2</sub> O	cm H <sub>2</sub> O	ms/l		cm H <sub>2</sub> O	cm H <sub>2</sub> O	ms/l	
1	Q=0.52 1/2	6.25	0	32	0.5 1/4	6.30	0	32	0.45 1/2	5.45	0	32				
2	t=0 h	4.70	4.0	-	2.25 h	5.45	74.0	-	4.0 h	4.70	53.0	-				
3	t=14.00 h	3.77	10.5	9	16.75 h	3.50	33.0	6	18.0 h	3.40	66.5	24				
4	t=0.594	3.75	16.0	-	0.442	3.25	37.2	-	0.448	3.05	21.0	-				
5	t=0.119	3.28	20.5	-	0.813	3.24	41.0	-	0.25	3.00	74.5	-				
6	t=0.214	3.16	24.5	5	0.813	3.20	44.5	6	0.694	2.95	8.0	13				
7	Q=0.52 1/2	5.85	0	32	0.44 1/2	11.9	0	32	0.75 1/2	5.10	0	32				
8	t=1.17 h	5.45	8.5	-	1.0 h	7.9	34.0	-	4.35 h	4.35	54.0	-				
9	t=15.17 h	3.04	16.0	6	17.0 h	3.65	74.0	10	18.35 h	3.10	74.0	25				
10	t=0.203	3.04	21.0	-	0.135	3.14	48.0	-	0.773	3.05	78.5	-				
11	t=0.815	2.87	26.0	-	0.682	3.16	52.0	-	0.219	2.95	82.0	-				
12	t=0.932	2.88	28.5	7	0.750	3.15	55.0	8	0.500	2.84	84.5	16				
13	t=0.51 1/2	6.10	0	32	0.77 1/2	7.66	0	32	0.75 1/2	5.20	0	32				
14	t=1.2 h	4.52	16.0	-	3.25 h	6.05	70.0	-	4.25 h	4.40	66.0	-				
15	t=15.22 h	3.35	22.5	1	17.25 h	3.75	51.0	14	18.25 h	3.05	82.0	14				
16	t=0.759	3.25	23.5	-	0.597	3.15	56.0	-	0.681	2.95	95.5	-				
17	t=0.964	3.27	31.5	-	0.25	3.00	59.0	-	0.562	2.80	99.0	-				
18	t=0.964	3.30	34.5	1	-	3.05	62.5	-	0.812	2.90	92.0	6				
19	Q=0.5 1/2	6.16	0	32	0.45 1/2	6.20	0	32								
20	t=2.5 h	4.70	22.0	-	3.68 h	5.73	49.0	-								
21	t=16.5 h	3.55	31.0	9	13.52 h	3.75	60.0	14								
22	t=0.440	3.25	35.0	-	0.460	3.25	64.5	-								
23	t=0.749	3.21	39.5	-	0.562	3.30	69.0	-								
24	t=0.918	3.14	42.0	2	0.372	3.35	71.0	20								



Corrida No 4 Duración: 4.58 h Filtración: 7.5 m/h  $Q_i$ : 0.52 l/s Fecha: 3-10-31

T O M A	Datos de control			SST	Datos de control			SST	Datos de control			SST	Datos de control			SST
	UTN	AP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	AP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	AP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	AP cm H <sub>2</sub> O	ms/l	
1	Q=0.52 l/s	6.20	0	27	0.52 l/s	6.23	0	27	0.44 l/s	6.10	0	27				
2	t=0 h	7.17	9.0	-	2.75 h	7.65	24.0	-	4.0 h	5.20	67.0	-				
3	t=14.0 h	3.55	14.0	16	16.75 h	3.65	34.5	16	18.0 h	3.30	32.0	2				
4	M <sub>1</sub> =0.466	3.99	19.0	-	0.422	3.55	22.0	-	0.515	3.15	25.5	-				
5	M <sub>2</sub> =0.402	3.35	24.5	-	0.407	3.24	26.5	-	0.426	3.06	24.5	-				
6	M <sub>3</sub> =-	3.31	28.0	-	-	3.29	28.0	-	0.452	2.46	32.0	4				
1	Q=0.52 l/s	6.05	0	27	0.48 l/s	18.40	0	27	0.47 l/s	5.70	0	27				
2	t=1.0 h	7.50	14.0	-	2.0 h	7.70	22.0	-	4.35 h	7.51	13.0	-				
3	t=15.0 h	3.75	19.0	7	17.0 h	3.95	27.0	10	19.35 h	3.15	14.0	26				
4	M <sub>1</sub> =0.502	3.35	24.0	-	0.473	3.40	50.0	-	0.491	3.05	32.0	-				
5	M <sub>2</sub> =0.341	3.13	29.0	-	0.430	3.58	32.0	-	0.437	2.85	26.0	-				
6	M <sub>3</sub> =0.322	3.01	33.0	6	0.341	3.40	57.0	7	0.555	2.90	31.5	12				
1	Q=0.51 l/s	6.10	0	27	0.45 l/s	4.70	0	27	0.43 l/s	5.40	0	27				
2	t=1.2 h	4.45	21.5	-	3.25 h	5.70	53.0	-	4.52 h	4.70	27.0	-				
3	t=16.82 h	3.66	26.5	4	17.25 h	3.37	58.0	9	18.58 h	3.24	23.0	25				
4	M <sub>1</sub> =0.443	3.35	31.0	-	0.436	3.20	61.0	-	0.423	2.98	26.0	-				
5	M <sub>2</sub> =0.352	3.22	33.5	-	0.467	3.13	63.5	-	0.474	2.85	29.5	-				
6	M <sub>3</sub> =0.426	3.10	38.0	2	0.455	3.05	64.5	13	0.407	2.85	22.0	16				
1	Q=0.54 l/s	6.22	0	27	0.49 l/s	7.12	0	27								
2	t=2.5 h	7.27	30.0	-	3.58 h	7.70	60.0	-								
3	M=16.5 h	3.77	31.0	2	17.58 h	4.46	65.0	11								
4	M <sub>1</sub> =0.444	3.27	34.5	-	0.570	3.30	68.0	-								
5	M <sub>2</sub> =0.426	3.25	43.0	-	0.545	3.15	72.0	-								
6	M <sub>3</sub> =-	3.27	46.0	-	0.667	3.06	75.0	9								

Corrida No 5 Duración: 7.5 h Filtración: 10.0 m/h Qi: 0.10 l/s Fecha: 3 de 87

T O M A	Datos de control				Datos de control				Datos de control				Datos de control			
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l	
1	Q = 0.1 l/s	4.35	0	28	Q = 0.1 l/s	7.30	0	28	Q = 0.1 l/s	7.80	0	28	Q = 0.1 l/s	8.30	0	28
2	t = 0 h	3.54	5.0	-	4.92 h	6.05	27.0	-	6.03 h	6.45	43.5	-	1.17 h	6.60	62.0	-
3	H = 12.0 h	3.15	12.0	9	16.92 h	4.70	38.0	21	18.03 h	5.25	55.5	19	19.17 h	5.99	75.0	17
4	Q = 0.2 l/s	3.05	19.0	-	0.75 h	4.35	43.0	-	0.717	4.35	60.5	-	0.497	4.60	81.0	-
5	Q = 0.1 l/s	3.05	25.0	-	0.15	4.34	48.0	-	0.321	4.60	65.0	-	0.343	4.65	82.0	-
6	Q = 0.1 l/s	3.15	30.0	8	0.729	3.99	53.0	16	0.357	4.55	70.0	18	0.464	4.50	90.0	15
7	Q = 0.1 l/s	5.15	0	28	Q = 0.1 l/s	7.15	0	28	Q = 0.1 l/s	8.10	0	28	Q = 0.1 l/s	7.15	0	28
8	t = 3.25 h	4.38	11.0	-	5.09 h	6.05	28.0	-	6.33 h	6.60	47.0	-	7.5 h	5.99	66.0	-
9	H = 15.25 h	3.15	19.5	19	17.09 h	4.35	40.0	19	18.23 h	5.72	59.5	22	19.4 h	4.90	81.0	19
10	Q = 0.3 l/s	3.52	25.0	-	0.711	4.55	45.0	-	0.715	5.02	65.0	-	0.422	4.50	86.0	-
11	Q = 0.3 l/s	3.10	30.0	-	0.301	4.39	50.5	-	0.214	4.94	70.0	-	0.341	4.39	92.5	-
12	Q = 0.4 l/s	3.25	35.0	10	0.724	4.27	55.0	16	0.250	4.75	75.0	21	0.647	4.2	95.0	17
13	Q = 0.4 l/s	6.35	0	28	Q = 0.4 l/s	6.58	0	28	Q = 0.4 l/s	8.55	0	28				
14	t = 3.25 h	5.01	16.0	-	5.42 h	7.76	34.0	-	6.59 h	6.40	52.5	-				
15	H = 15.25 h	4.01	25.0	19	17.72 h	4.98	45.5	19	18.58 h	5.60	65.0	21				
16	Q = 0.4 l/s	3.10	30.0	-	0.298	4.65	51.0	-	0.418	5.05	70.0	-				
17	Q = 0.3 l/s	3.10	35.0	-	0.321	4.70	55.0	-	0.250	4.90	75.0	-				
18	Q = 0.1 l/s	3.65	40.0	8	0.404	4.62	60.0	11	0.464	4.63	80.0	15				
19	Q = 0.6 l/s	6.49	0	28	Q = 0.2 l/s	7.90	0	28	Q = 0.1 l/s	8.55	0	28				
20	t = 4.35 h	5.30	20.5	-	5.75 h	6.34	38.0	-	6.33 h	6.60	56.5	-				
21	H = 16.35 h	4.25	30.0	17	17.15 h	5.27	49.5	22	18.23 h	5.35	70.0	23				
22	Q = 0.4 l/s	5.19	36.0	-	0.453	4.64	65.0	-	0.493	4.99	75.0	-				
23	Q = 0.1 l/s	3.49	41.0	-	0.214	4.62	60.0	-	0.114	4.77	80.0	-				
24	Q = 0.5 l/s	3.16	46.0	13	0.75	4.32	65.0	7	0.671	4.69	85.0	12				

Corrida No. 6 Duración: 9.5 h Filtración: 10 m/h Qi: 0.7 l/s Fecha: 3/3-10 27

T.O.M.A.	Datos de control			UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l	Datos de control			UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l	Datos de control			UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l
	control	UTN	ΔP				S.S.T.	control	UTN				ΔP	S.S.T.	control			
1	Q=0.2 1/2	7.80	0	28	0.64 1/2	5.35	0	28	0.6 1/2	7.25	0	28	0.52 1/2	7.28	0	28		
2	t= 0h	6.01	4.0	-	7.75h	7.92	23.0	-	7.33h	7.04	37.0	-	4.5h	3.22	48.0	-		
3	t= 21.0h	5.00	16.5	20	1.75h	3.91	42.0	12	4.33h	3.30	63.0	16	6.5h	3.20	80.5	21		
4	t= 0.708	4.51	24.5	-	0.385	3.75	51.5	-	0.35	3.00	72.8	-	0.32	2.50	91.5	-		
5	t= 0.286	4.40	32.5	-	0.511	3.27	58.0	-	0.423	2.66	78.0	-	0.25	2.62	91.0	-		
6	t= 0.75	4.23	39.0	7	0.443	3.24	63.0	10	0.536	2.76	83.0	13	0.424	2.65	101.2	2		
7	Q=0.2 1/2	6.50	0	28	0.6 1/2	5.16	0	28	0.6 1/2	4.70	0	28						
8	t= 1.7h	5.48	5.5	-	5.25h	4.00	27.0	-	8.25h	4.35	71.5	-						
9	t= 2.17h	4.35	20.5	15	2.16h	3.68	47.5	10	5.25h	3.13	71.0	14						
10	t= 0.371	3.79	33.0	-	0.368	3.32	57.0	-	0.316	2.57	80.5	-						
11	t= 0.405	3.92	42.5	-	0.443	3.25	63.0	-	0.50	2.92	86.0	-						
12	t= 0.407	3.92	43.0	11	0.571	3.26	68.0	12	0.607	2.76	90.5	11						
13	t= 0.7 1/2	5.65	0	28	0.6 1/2	7.74	0	28	0.58 1/2	4.40	0	28						
14	t= 1.67h	5.05	9.5	-	5.92h	4.70	30.5	-	3.63h	3.20	43.5	-						
15	t= 2.67h	4.09	23.5	23	2.42h	3.35	53.0	16	5.32h	3.15	73.5	26						
16	t= 0.373	3.66	36.5	-	0.37	2.59	62.0	-	0.50	2.85	83.0	-						
17	t= 0.174	3.40	37.0	-	0.429	3.00	68.0	-	0.102	2.72	89.5	-						
18	t= 0.571	3.57	53.0	12	0.186	3.02	73.0	6	0.443	2.64	93.0	10						
19	Q= 0.66 1/2	5.70	0	28	0.6 1/2	4.70	0	28	0.56 1/2	4.34	0	28						
20	t= 4.77h	4.95	19.5	-	6.58h	4.15	33.5	-	4.08h	3.30	46.0	-						
21	t= 1.17h	3.96	37.0	19	3.58h	3.64	58.0	10	6.08h	3.70	85.0	27						
22	t= 0.344	3.91	46.5	-	0.385	3.12	67.2	-	0.40	2.85	88.0	-						
23	t= 0.321	3.94	52.5	-	0.443	2.44	73.5	-	0.034	2.60	93.0	-						
24	t= 0.50	3.45	59.0	14	0.464	2.10	78.0	15	0.071	2.54	97.5	16						

Corrida No 7 Duración: 6.75 h Filtración: 12.5 m<sup>3</sup>/h Qi: 0.87 1/2 Fecha: 12-10-87

T.M.A.	Datos de control				Datos de control				Datos de control				Datos de control			
	UTN	ΔP	S.S.T.	mg/l	UTN	ΔP	S.S.T.	mg/l	UTN	ΔP	S.S.T.	mg/l	UTN	ΔP	S.S.T.	mg/l
1	Q=0.37 1/2	4.80	0	22	Q=0.44 1/2	7.30	0	22	Q=0.33 1/2	6.10	0	22	Q=0.23 1/2	5.70	0	22
2	t=0 h	3.30	2.0	-	3.08 h	6.31	14.0	-	4.92 h	5.25	25.0	-	6.33 h	5.04	39.0	-
3	t=11.5 h	2.60	10.0	12	14.58 h	4.93	28.0	18	16.42 h	4.70	37.5	16	17.33 h	3.70	64.0	13
4	Q=0.51	2.30	17.0	-	0.473	4.24	36.0	-	0.51	3.30	56.5	-	0.54	3.15	75.5	-
5	Q=0.495	2.51	23.5	-	0.182	3.65	42.0	-	0.273	3.35	62.5	-	0.409	2.40	57.0	-
6	Q=0.545	2.35	27.0	10	0.363	3.89	47.0	14	0.436	3.28	63.0	8	0.50	2.62	56.0	11
7	Q=0.87 1/2	8.01	0	22	0.87 1/2	5.94	0	22	0.82 1/2	7.25	0	22	0.71 1/2	5.90	0	22
8	t=1.33 h	6.34	4.5	-	3.67 h	5.40	13.0	-	5.33 h	6.80	28.0	-	6.29 h	5.21	31.5	-
9	t=12.83 h	4.83	13.5	18	15.17 h	3.60	33.0	15	16.83 h	4.01	53.0	18	18.29 h	3.30	69.5	10
10	Q=0.44	4.70	21.0	-	0.494	3.15	44.5	-	0.56	3.04	62.0	-	0.525	3.05	90.0	-
11	Q=0.482	4.55	27.0	-	0.318	3.03	47.0	-	0.182	3.54	68.0	-	0.445	2.86	87.0	-
12	Q=0.136	4.48	32.0	19	0.536	3.03	52.0	10	0.409	3.14	72.0	13	0.511	2.80	47.0	9
13	Q=0.145	4.50	0	22	0.344 1/2	6.03	0	22	0.195 1/2	5.90	0	22				
14	t=2.02 h	8.03	9.0	-	4.17 h	5.15	21.0	-	5.6 h	5.45	30.5	-				
15	t=13.92 h	5.68	20.0	19	15.61 h	3.71	30.0	15	17.1 h	4.17	57.0	15				
16	Q=0.265	5.48	28.0	-	0.519	3.65	49.0	-	0.475	3.70	66.0	-				
17	Q=0.136	4.40	34.0	-	0.318	3.03	55.0	-	0.315	3.60	72.5	-				
18	Q=0.217	5.40	37.0	17	0.127	2.90	57.0	6	0.364	3.10	77.0	14				
19	Q=0.37 1/2	8.34	0	22	0.83 1/2	6.10	0	22	0.77 1/2	6.15	0	22				
20	t=2.68 h	7.77	11.0	-	4.5 h	5.70	22.0	-	5.92 h	5.70	33.0	-				
21	t=14.02 h	5.03	24.0	20	16.0 h	3.62	42.5	14	17.72 h	4.20	61.0	17				
22	Q=0.485	4.73	31.5	-	0.516	3.40	51.5	-	0.515	3.18	70.0	-				
23	Q=0.091	4.83	38.0	-	0.364	3.22	57.5	-	0.227	3.10	77.0	-				
24	Q=0.636	4.34	42.0	8	0.50	2.95	62.0	11	0.576	2.98	82.0	10				

Corrida No. 8

Duración: 8.35 h

Filtración: 12.5 m<sup>3</sup>/h

Q: 0.97 1/2

Fecha: 14-10-81

R. MOT.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l	
1	Q: 0.97 1/2	2.40	0	21	0.93 1/2	5.12	0	21	0.77 1/2	6.50	0	21	0.77 1/2	7.19	0	21
2	1.20 h	2.72	5.0	-	6.17 h	7.62	18.0	-	1.58 h	6.55	36.5	-	3.58 h	6.26	75.0	-
3	4.9.33 h	2.50	14.0	3	11.25 h	7.03	36.0	14	16.42 h	4.70	51.5	16	11.42 h	5.19	66.5	15
4	7.20.47	2.29	22.5	-	0.512	2.50	44.0	-	0.562	3.84	61.0	-	0.554	4.06	76.0	-
5	11.0.851	1.94	32.0	-	0.333	2.56	51.5	-	0.233	3.54	47.0	-	0.296	3.65	83.0	-
6	14.0.857	1.88	34.5	3	0.205	2.14	56.0	8	0.476	2.98	72.0	11	0.191	3.40	89.0	12
7	Q: 0.81 1/2	4.20	0	21	0.31 1/2	6.44	0	21	0.76 1/2	1.11	0	21	0.76 1/2	2.13	0	21
8	1.4.15 h	4.08	16.0	-	6.5 h	4.95	21.5	-	7.25 h	6.95	34.5	-	3.75 h	6.23	43.0	-
9	13.35 h	2.40	24.0	7	15.35 h	3.54	34.0	14	17.17 h	4.65	55.0	14	19.09 h	5.70	80.5	4
10	10.417	2.44	32.5	-	0.545	3.01	42.0	-	0.516	4.27	64.0	-	0.51	4.70	90.5	-
11	10.661	2.05	33.5	-	0.333	2.50	54.0	-	0.323	3.65	71.0	-	0.571	3.53	95.0	-
12	0.81 1/2	2.55	44.0	4	0.81	2.50	60.0	4	0.511	3.74	76.0	9	0.667	3.52	105.0	7
13	0.91 1/2	4.32	0	21	0.79 1/2	6.10	0	21	0.73 1/2	7.70	0	21				
14	5.35 h	6.60	14.0	-	6.42 h	5.12	25.0	-	8.12 h	6.70	32.0	-				
15	14.46 h	3.20	23.0	17	16.25 h	4.66	43.5	13	17.45 h	4.23	60.0	12				
16	10.535	2.75	36.0	-	0.514	4.05	52.5	-	0.522	4.09	68.5	-				
17	10.141	2.23	43.0	-	0.331	3.10	60.0	-	0.477	3.53	74.5	-				
18	10.0.461	2.01	48.0	7	0.181	2.60	64.0	13	0.217	3.60	80.0	12				
19	Q: 0.84 1/2	6.48	0	21	0.136 1/2	6.60	0	21	0.71 1/2	7.26	0	21				
20	5.25 h	4.79	15.5	-	7.25 h	8.00	27.0	-	8.58 h	6.51	41.0	-				
21	15.11 h	3.65	31.5	14	16.03 h	4.23	42.0	5	17.21 h	4.76	63.0	10				
22	10.0.549	3.00	41.0	-	0.552	3.70	56.0	-	0.511	3.45	72.0	-				
23	10.0.333	2.54	47.0	-	0.162	3.78	62.5	-	0.524	3.44	89.5	-				
24	0.619	2.20	52.0	8	0.424	3.09	68.0	12	0.524	3.55	84.0	10				

Corrida No 9

Duración: 7.25 h

Filtración: 15 m/h

Qi: 1.04 l/s

Fecha: 12-10-77

T O M A	Datos de control				Datos de control				Datos de control				Datos de control			
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	SST	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l	S.S.T.	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l	S.S.T.	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. mg/l	S.S.T.
1	2.04 1/2	2.77	0	24	1.0 1/2	4.67	0	29	0.98 1/2	6.03	0	24	0.92 1/2	6.20	0	29
2	3.0 h	2.10	4.0	-	4.23 h	5.60	16.0	-	6.08 h	4.01	27.0	-	7.08 h	5.60	38.0	-
3	4.0 5 h	1.80	16.0	10	15.22 h	3.05	35.0	12	16.58 h	3.25	51.5	12	17.58 h	4.51	67.0	21
4	5.0 7 2/4	1.54	26.0	-	0.60	2.30	46.0	-	0.555	2.95	62.5	-	0.481	3.65	78.5	-
5	6.0 6 5/5	1.55	36.0	-	0.526	1.95	54.0	-	0.536	2.35	70.0	-	0.276	3.20	85.5	-
6	7.0 6 5/6	1.41	44.0	12	0.64	1.73	60.0	9	0.621	2.65	76.0	11	0.485	3.53	91.0	15
7	8.0 6 1/2	3.49	0	24	1.0 1/2	4.05	0	24	0.98 1/2	6.15	0	24	0.93 1/2	6.71	0	24
8	9.0 3 3/5 h	3.34	9.0	-	5.08 h	5.35	18.0	-	6.53 h	5.58	24.5	-	7.25 h	5.70	70.0	-
9	10.0 2 3/4	2.30	23.0	15	15.58 h	2.40	34.0	15	16.83 h	4.90	54.5	9	17.75 h	4.23	70.5	21
10	11.0 5 8	1.98	35.5	-	0.54	2.35	44.5	-	0.465	3.45	66.0	-	0.472	3.90	82.0	-
11	12.0 4 8/5	1.88	44.0	-	0.785	2.05	52.0	-	0.64	2.48	74.0	-	0.276	3.65	90.5	-
12	13.0 4 2/1	1.84	52.0	11	0.655	1.95	64.0	10	0.193	3.30	80.0	6	0.552	3.50	97.0	13
13	14.0 3 1/2	3.77	0	24	0.98 1/2	4.81	0	24	0.97 1/2	6.02	0	24				
14	15.0 h	3.70	12.0	-	5.54	4.05	70.5	-	6.58 h	5.30	82.0	-				
15	16.0 5 h	2.75	28.0	15	16.0 h	3.71	73.0	19	17.08 h	7.00	92.5	10				
16	17.0 4 8/1	1.85	37.5	-	0.54	2.80	82.0	-	0.518	3.21	70.0	-				
17	18.0 4 9/5	1.74	46.0	-	0.545	2.30	61.5	-	0.655	2.97	78.0	-				
18	19.0 4 6/1	1.80	52.0	11	0.724	2.77	63.0	8	0.655	2.50	84.0	10				
19	20.0 1 1/2	3.45	0	24	0.98 1/2	5.60	0	24	0.95 1/2	6.17	0	24				
20	21.0 4 1/2 h	3.30	15.0	-	5.78 h	4.76	23.0	-	6.33 h	5.37	34.5	-				
21	22.0 4 0 1/2	2.60	31.5	14	16.28 h	3.60	46.5	17	17.33 h	4.09	63.0	18				
22	23.0 4 0 5/5	2.10	72.0	-	0.557	2.43	51.5	-	0.527	3.44	74.0	-				
23	24.0 4 0 5/7	2.01	50.0	-	0.714	2.61	66.0	-	0.349	3.70	93.0	-				
24	25.0 4 0 6/1	1.82	56.0	11	0.517	2.48	72.0	14	0.586	3.20	88.0	12				

Corrida No 10

Duración: 10.42 h

Filtración: 150 m<sup>3</sup>/h

Ci: 1.04 l/s

Fecha: 15/11/10 31

T O M A	Datos de control			Datos de control			Datos de control			Datos de control						
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l				
1	Q=1.04 l/s	3.35	0	20	1.04 l/s	3.01	0	20	0.98 l/s	2.89	0	20	0.95 l/s	2.31	0	20
2	1.04 h	3.02	8.0	-	3.15 h	2.66	27.0	-	3.53 h	2.90	37.0	-	10.09 h	2.35	79.0	-
3	1.04.15 h	2.63	20.0	13	15.5 h	2.65	29.0	17	18.33 h	3.11	41.0	18	19.23 h	2.70	51.0	16
4	1.04.42	2.25	29.5	-	0.772	2.02	42.0	-	0.765	2.65	58.0	-	0.513	2.12	63.0	-
5	1.04.0.75	2.59	37.5	-	0.15	1.85	52.0	-	0.10	1.81	72.0	-	0.20	1.56	82.5	-
6	1.04.0.90	1.87	45.0	10	0.60	1.69	62.0	8	0.65	1.59	81.0	7	0.35	1.32	93.0	13
7	Q=1.04 l/s	3.05	0	20	1.04 l/s	2.70	0	20	0.96 l/s	2.15	0	20	0.93 l/s	2.00	0	20
8	1.04.18 h	2.90	18.0	-	6.25 h	2.61	28.0	-	9.09 h	3.06	44.0	-	10.42 h	2.20	50.5	-
9	1.04.23 h	2.52	24.0	16	16.04	2.43	30.5	25	18.93 h	2.65	45.0	14	20.17 h	2.11	53.0	11
10	1.04.30.2	2.19	31.5	-	0.709	2.15	45.0	-	0.48	2.05	61.5	-	0.708	1.77	70.0	-
11	1.04.40	1.91	41.5	-	-	1.78	53.5	-	0.30	1.72	76.0	-	0.25	1.76	85.0	-
12	1.04.50	1.22	50.5	10	0.90	1.61	65.0	2	0.60	1.43	85.0	8	0.50	1.59	95.0	10
13	1.04 l/s	2.40	0	20	1.04 l/s	2.20	0	20	0.96 l/s	2.57	0	20				
14	1.04.33 h	3.36	23.0	-	6.15 h	2.75	30.0	-	9.08 h	2.70	43.0	-				
15	1.04.38 h	3.03	26.0	17	16.5 h	2.75	33.0	11	19.33 h	2.31	42.0	14				
16	1.04.47.7	2.50	35.0	-	0.743	2.34	50.5	-	0.489	1.96	64.0	-				
17	1.04.0.15	2.21	45.0	-	0.75	1.88	58.5	-	0.30	1.65	79.0	-				
18	1.04.0.10	2.30	55.0	10	0.30	1.56	69.0	7	0.50	1.39	89.0	9				
19	Q=1.04 l/s	2.46	0	20	1.04 l/s	2.32	0	20	0.96 l/s	2.50	0	20				
20	1.04.15 h	2.66	26.0	-	1.49 h	2.80	32.0	-	4.93 h	2.31	46.0	-				
21	1.04.15 h	2.43	27.5	18	17.33 h	2.72	31.0	16	19.68 h	2.31	49.0	16				
22	1.04.0.49	2.05	40.0	-	0.433	2.18	51.0	-	0.44	2.18	66.0	-				
23	1.04.0.10	1.95	48.0	-	0.20	1.91	64.0	-	0.20	1.70	90.5	-				
24	1.04.0.40	1.60	54.0	12	0.50	1.60	73.0	10	0.35	1.40	91.0	13				

Corrida No. 11

Duración: 7.58 h

Filtración: 15.0 m/h

Qi: 1.04 l/s

Fecha: 5-11-87

T O M A	Datos de control			SST	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m/s		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m/s		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m/s		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m/s	
1	Q=1.04 l/s	1.55	0	11	1.04 l/s	1.86	0	11	0.98 l/s	1.55	0	11	0.92 l/s	1.50	0	11
2	t=0 h	1.31	9.0	-	4.95 h	1.00	73.5	-	5.95 h	1.00	44.0	-	1.08 h	1.09	51.0	-
3	1.14.0 h	1.14	26.0	9	15.95 h	0.90	42.0	8	14.95 h	0.93	54.0	5	21.08 h	0.96	67.5	7
4	1.10.331	1.11	28.0	-	0.554	0.85	49.0	-	0.584	0.86	61.5	-	0.5	0.88	74.0	-
5	1.10.182	1.05	33.0	-	0.773	0.85	56.5	-	0.575	0.83	68.0	-	0.364	0.83	80.5	-
6	1.10.136	0.96	43.0	4	0.909	0.83	66.0	1	0.727	0.80	73.0	3	0.318	0.75	84.5	2
7	1.10.416	1.90	0	11	1.04 l/s	1.55	0	11	0.96 l/s	1.50	0	11	0.92 l/s	1.50	0	11
8	1.10.354	1.82	23.0	-	5.12 h	1.12	36.0	-	6.25 h	1.16	38.0	-	1.33 h	1.11	60.5	-
9	1.17.15 h	0.94	33.0	5	14.12 h	1.01	40.5	5	10.25 h	0.90	58.0	5	21.33 h	0.81	70.5	3
10	1.10.555	0.99	39.5	-	0.458	0.88	52.0	-	0.473	0.84	64.0	-	0.556	0.8	77.0	-
11	1.10.395	0.90	46.5	-	0.545	0.87	58.5	-	0.516	0.80	71.0	-	0.727	0.75	83.0	-
12	1.10.818	0.85	51.0	2	0.636	0.87	63.0	4	0.727	0.74	75.0	3	0.509	0.71	87.0	1
13	1.10.2 l/s	1.83	0	11	1.04 l/s	1.56	0	11	0.94 l/s	1.46	0	11	0.92 l/s	1.50	0	11
14	1.17.1 h	1.21	26.5	-	5.63 h	1.10	41.0	-	6.63 h	1.06	51.0	-	7.58 h	1.00	64.0	-
15	1.19.17 h	0.98	35.5	9	14.63 h	0.93	50.5	3	10.55 h	0.85	61.0	4	21.53 h	0.81	74.0	6
16	1.10.544	0.90	42.5	-	0.468	0.87	58.0	-	0.466	0.82	67.0	-	0.577	0.70	80.0	-
17	1.10.182	0.93	49.0	-	0.727	0.84	63.0	-	0.636	0.74	74.0	-	0.475	0.70	80.0	-
18	1.10.727	0.87	54.0	3	0.727	0.85	68.5	3	0.545	0.78	78.0	5	0.755	0.68	90.5	6
19	1.10.2 l/s	1.87	0	11	1.04 l/s	1.49	0	11	0.92 l/s	1.30	0	11				
20	1.10.45 h	1.24	24.5	-	5.3 h	1.06	48.5	-	6.2 h	1.08	54.5	-				
21	1.10.15 h	0.99	34.0	8	14.95 h	0.92	53.0	3	10.82 h	0.83	65.0	8				
22	1.10.154	0.86	46.0	-	0.465	0.88	54.5	-	0.547	0.81	70.5	-				
23	1.10.223	0.90	51.5	-	0.727	0.82	66.0	-	0.273	0.76	77.0	-				
24	1.10.324	0.86	57.0	7	0.727	0.81	70.5	3	0.545	0.77	81.0	5				



Corrida No 12

Duración: 29.0 h

Filtración: 5.0 m<sup>3</sup>/hQ<sub>i</sub>: 0.35 l/s

Fecha: 16/17-11-91

T O M A	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m <sup>3</sup> /h		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m <sup>3</sup> /h		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m <sup>3</sup> /h		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	m <sup>3</sup> /h	
1	Q: 0.35 l/s	1.06	0	10	0.35 l/s	1.03	0	10	0.35 l/s	1.02	0	10	0.30 l/s	1.05	0	10
2	h: 0 h	0.96	2.0	-	12.42 h	0.54	35.5	-	16.25 h	0.51	46.0	-	22.83 h	0.54	64.0	-
3	h: 11.33 h	0.86	5.0	6	23.15 h	0.52	32.0	3	2.53 h	0.45	48.5	2	10.09 h	0.54	70.5	2
4	h: 0.33 h	0.37	8.5	-	0.52 h	0.53	32.0	-	0.548	0.45	30.5	-	0.619	0.43	12.0	-
5	h: 0.40	0.31	12.0	-	0.70	0.54	36.0	-	0.30	0.43	52.0	-	0.90	0.41	13.5	-
6	h: 0.60	0.37	14.5	4	0.70	0.49	31.0	3	0.70	0.41	53.0	3	0.80	0.40	14.5	2
1	Q: 0.35 l/s	0.98	0	10	0.35 l/s	1.04	0	10	0.31 l/s	1.05	0	10	0.30 l/s	1.00	0	10
2	h: 1.33 h	0.72	12.5	-	13.52 h	0.53	35.5	-	17.5 h	0.54	52.0	-	25.67 h	0.54	77.5	-
3	h: 18.67 h	0.60	15.5	4	24.92 h	0.47	31.0	3	4.83 h	0.44	53.5	3	13.0 h	0.45	46.0	4
4	h: 0.33 h	0.65	17.5	-	0.567	0.46	39.0	-	0.612	0.43	55.0	-	0.613	0.44	47.5	-
5	h: 0.60	0.62	19.5	-	0.70	0.45	41.0	-	0.70	0.43	54.5	-	0.60	0.42	49.0	-
6	h: 0.90	0.65	21.0	1	0.60	0.45	42.0	4	0.30	0.40	58.5	1	0.60	0.41	30.0	4
1	Q: 0.35 l/s	1.05	0	10	0.33 l/s	1.05	0	10	0.30 l/s	1.04	0	10	0.30 l/s	1.00	0	10
2	h: 9.08 h	0.67	19.0	-	14.25 h	0.52	33.0	-	19.25 h	0.51	58.0	-	28.08 h	0.55	81.5	-
3	h: 20.92 h	0.57	20.0	4	1.58 h	0.44	40.0	8	6.53 h	0.45	54.8	4	18.72 h	0.46	83.0	2
4	h: 0.49	0.62	21.0	-	0.602	0.42	42.0	-	0.606	0.42	61.5	-	0.605	0.45	34.5	-
5	h: 0.60	0.62	24.0	-	0.20	0.41	43.5	-	0.40	0.41	63.0	-	0.30	0.42	30.0	-
6	h: 0.60	0.61	25.5	-	0.70	0.41	44.5	3	0.60	0.41	64.0	4	0.50	0.42	31.0	2
1	Q: 0.35 l/s	1.03	0	10	0.33 l/s	1.04	0	10	0.30 l/s	1.02	0	10	0.30 l/s	1.07	0	10
2	h: 11.0 h	0.65	24.5	-	14.92 h	0.53	40.0	-	21.0 h	0.52	63.5	-	29.0 h	0.57	86.0	-
3	h: 22.33 h	0.55	26.5	-	2.25 h	0.46	42.5	-	8.33 h	0.43	65.5	-	16.33 h	0.47	33.0	-
4	h: 0.495	0.54	28.5	-	0.615	0.45	45.0	-	0.618	0.41	67.0	-	0.514	0.46	39.5	-
5	h: 0.60	0.54	30.5	-	-	0.44	46.5	-	-	0.40	68.5	-	-	0.46	40.0	-
6	h: 0.60	0.52	31.5	4	0.30	0.40	47.5	2	0.70	0.39	69.5	3	0.50	0.45	42.0	5

Corrida No. 13

Duración: 25.5 h

V filtración: 7.5 m/h

Q<sub>i</sub>: 0.52 l/s

Fecha: 23/24-11-97

T O M A	Datos de control			Datos de control			Datos de control			Datos de control			Datos de control			
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	SST mg/l	
1	Q=0.52 l/s	1.40	0	5	0.30 l/s	0.30	0	5	0.30 l/s	1.40	0	5	0.45 l/s	1.30	0	5
2	t=0 h	1.20	5.5	-	11.52 h	0.35	30.0	-	15.23 h	0.36	50.0	-	20.67 h	0.48	10.0	-
3	t=12.0 h	1.20	9.0	-	23.52 h	0.38	33.0	4	3.32 h	0.64	33.5	1	8.27 h	0.47	13.5	2
4	t=14.0 h	1.40	13.0	-	0.15	0.36	36.5	-	0.45	0.42	56.5	-	0.60	0.53	15.5	-
5	t=16.0 h	1.20	17.0	-	0.20	0.30	34.5	-	0.30	0.34	58.5	-	0.40	0.56	17.5	-
6	t=18.0 h	1.10	21.5	3	0.40	0.48	41.0	3	-	0.54	61.0	-	-	0.52	80.5	-
7	Q=0.52 l/s	1.80	0	5	0.30 l/s	1.20	0	5	0.42 l/s	1.20	0	5	0.35 l/s	1.50	0	5
8	t=1.33 h	1.00	14.0	-	12.32 h	0.72	35.0	-	16.92 h	0.90	53.0	-	23.52 h	0.90	14.5	-
9	t=19.33 h	0.88	17.0	-	23.15 h	0.68	38.5	4	4.52 h	0.56	58.0	-	11.53 h	0.45	13.5	2
10	t=0.24 h	0.86	20.5	-	0.323	0.66	41.5	-	0.353	0.56	61.0	-	0.56	0.46	81.0	-
11	t=0.84 h	0.84	24.0	-	0.20	0.44	34.5	-	-	0.62	64.0	-	0.60	0.61	83.0	-
12	t=0.20 h	0.82	26.0	4	0.40	0.62	46.0	2	-	0.56	66.0	-	0.66	85.5	-	
13	Q=0.52 l/s	1.80	0	5	0.50 l/s	1.60	0	5	0.46 l/s	1.20	0	5	0.45 l/s	1.80	0	5
14	t=9.0 h	1.00	20.5	-	13.33 h	0.30	34.5	-	18.33 h	0.70	60.0	-	25.5 h	1.20	80.5	-
15	t=11.0 h	1.00	24.0	4	1.33 h	0.72	43.0	3	6.13 h	0.68	63.5	-	13.5 h	0.48	74.0	4
16	t=0.95 h	0.31	27.0	-	0.613	0.64	53.5	-	0.592	0.60	66.5	-	0.60	86.5	-	
17	t=0.20 h	0.30	36.0	-	0.40	0.64	43.5	-	-	0.60	64.5	-	0.20	0.36	34.5	-
18	t=0.00 h	0.70	32.0	-	0.30	0.62	51.0	1	0.40	0.55	11.0	3	-	0.72	91.0	-
19	Q=0.51 l/s	1.40	6	5	0.50 l/s	1.60	0	5	0.46 l/s	1.20	0	5	-	-	-	-
20	t=10.0 h	0.88	25.0	-	14.33 h	0.78	45.0	-	19.53 h	0.66	66.0	-	-	-	-	-
21	t=12.0 h	0.36	28.0	1	2.33 h	0.60	43.0	4	7.63 h	0.56	64.5	-	-	-	-	-
22	t=0.00 h	0.84	31.0	-	0.65	1.40	51.0	-	0.567	0.55	72.5	-	-	-	-	-
23	t=0.30 h	0.38	34.0	-	0.20	0.60	54.0	-	-	0.55	75.0	-	-	-	-	-
24	t=0.70 h	0.76	36.0	3	-	0.56	56.0	1	0.80	0.52	76.5	1	-	-	-	-

Corrida No 14

Duración: 19.5 h

Velocidad de filtración: 10 m/h

Q: 0.7 l/s

Fecha: 20/20-11-97

T O M A	Datos de control				Datos de control				Datos de control				Datos de control			
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	S.S.T. ms/l	
1	Q=0.7 l/s	1.70	0	7	Q=0.7 l/s	2.00	0	7	Q=0.7 l/s	1.40	0	7	Q=0.7 l/s	1.80	0	7
2	t=0 h	1.60	9.0	-	12.5 h	1.70	42.0	-	16.7 h	1.10	96.0	-	18.25 h	1.10	76.5	-
3	H=10.5 h	1.40	12.0	6	23.0 h	1.00	76.0	6	26.7 h	0.64	60.0	3	3.25 h	0.64	91.0	5
4	Flujo=0.235	1.30	19.0	-	0.70	0.92	51.0	-	0.60	0.62	46.0	-	0.72	0.58	84.5	-
5	Flujo=0.143	1.30	27.0	-	0.143	0.74	53.0	-	0.571	0.602	70.0	-	0.281	0.52	93.5	-
6	Flujo=0.857	1.30	30.0	1	0.857	0.60	53.0	1	0.424	0.56	74.0	4	0.571	0.50	91.0	3
1	Q=0.7 l/s	2.00	0	7	Q=0.7 l/s	1.90	0	7	Q=0.7 l/s	1.90	0	7	Q=0.7 l/s	1.90	0	7
2	t=8.0 h	1.40	24.0	-	13.2 h	1.20	43.0	-	16.5 h	0.72	63.0	-	19.5 h	1.40	75.0	-
3	H=18.5 h	1.70	35.0	-	23.6 h	1.00	52.0	1	3.0 h	0.66	72.0	-	6.0 h	0.54	84.5	4
4	Flujo=0.68	1.70	38.0	-	0.586	0.80	55.0	-	0.520	0.64	74.0	-	0.73	0.52	88.5	-
5	Flujo=	1.00	43.0	-	0.351	0.76	60.0	-	-	0.53	77.0	-	0.424	0.50	92.5	-
6	Flujo=	0.80	45.0	-	0.317	0.72	62.0	2	0.857	0.58	74.0	1	0.857	0.48	45.0	1
1	Q=0.65 l/s	2.60	0	7	Q=0.65 l/s	1.40	0	7	Q=0.65 l/s	1.80	0	7	Q=0.65 l/s	1.80	0	7
2	t=10.17 h	1.40	31.0	-	13.67 h	1.20	46.0	-	17.5 h	1.00	71.0	-				
3	H=20.67 h	1.70	33.0	6	24.17 h	1.00	53.0	-	4.0 h	0.66	75.0	3				
4	Flujo=0.615	1.00	40.0	-	0.50	0.96	58.0	-	0.678	0.62	77.0	-				
5	Flujo=0.143	1.00	45.0	-	-	0.72	63.0	-	0.511	0.60	80.0	-				
6	Flujo=0.143	1.00	49.0	6	0.714	0.70	66.0	2	0.714	0.58	84.0	2				
1	Q=0.65 l/s	1.80	0	7	Q=0.65 l/s	1.50	0	7	Q=0.65 l/s	2.30	0	7	Q=0.65 l/s	1.80	0	7
2	t=11.93 h	1.40	35.0	-	14.93 h	1.30	51.0	-	18.5 h	1.70	70.0	-				
3	H=22.53 h	1.00	42.0	1	1.93 h	0.66	58.0	3	3.0 h	0.68	79.0	4				
4	Flujo=0.584	0.96	44.0	-	0.60	0.64	64.0	-	0.78	0.70	83.0	-				
5	Flujo=0.851	0.76	52.0	-	0.571	0.62	66.0	-	0.424	0.64	87.0	-				
6	Flujo=	0.14	57.5	-	-	0.60	69.5	-	0.857	0.62	89.0	1				

Corrida No 15

Duración: 14.75 h

Filtración: 12.5 m/h

C<sub>i</sub>: 0.37 g/gFecha: 30-11-91  
01-12-91

T O M A	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			S.S.T.	Datos de control			
	UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l		UTN	ΔP cm H <sub>2</sub> O	ms/l	
1	Q=0.27 1/2	2.50	0	6	Q=0.27 1/2	3.20	0	6	Q=0.27 1/2	2.60	0	6	Q=0.27 1/2	2.40	0	6
2	t=0 h	2.10	5.0	-	t=0 h	3.00	26.5	-	t=0 h	2.30	40.5	-	t=0 h	2.20	53.0	-
3	H=13.0 h	1.80	14.0	4	H=13.0 h	1.40	31.0	5	H=13.0 h	1.30	54.0	5	H=13.0 h	1.10	71.0	-
4	Q=0.36	1.70	23.0	-	Q=0.36	1.40	43.0	-	Q=0.36	1.20	60.0	-	Q=0.36	0.95	76.0	-
5	Q=0.33	1.60	31.0	-	Q=0.33	1.30	42.0	-	Q=0.33	1.20	65.0	-	Q=0.33	0.90	85.0	-
6	Q=0.33	1.60	38.0	4	Q=0.33	1.20	54.0	2	Q=0.33	1.00	64.0	-	Q=0.33	0.71	82.0	4
1	Q=0.37 1/2	2.30	0	6	Q=0.37 1/2	3.20	0	6	Q=0.37 1/2	2.40	0	6	Q=0.37 1/2	2.10	0	6
2	t=1.5 h	2.10	6.0	-	t=1.5 h	2.70	24.0	-	t=1.5 h	2.00	47.5	-	t=1.5 h	2.10	54.0	-
3	H=14.5 h	1.90	13.5	5	H=14.5 h	1.60	41.0	5	H=14.5 h	1.20	51.0	4	H=14.5 h	1.00	73.0	1
4	Q=0.33	1.70	20.0	-	Q=0.33	1.40	46.5	-	Q=0.33	1.20	62.0	-	Q=0.33	0.90	74.5	-
5	Q=0.47	1.60	26.0	-	Q=0.47	1.20	51.5	-	Q=0.33	1.10	61.0	-	Q=0.33	0.80	84.0	-
6	Q=0.47	1.58	31.0	-	Q=0.47	1.20	55.0	-	Q=0.47	1.00	71.0	2	Q=0.47	0.71	81.0	-
7	Q=0.47	1.40	0	-	Q=0.47	2.70	0	6	Q=0.47	2.50	0	6	Q=0.47	2.20	0	6
8	t=6.0 h	3.30	19.5	-	t=6.0 h	2.20	32.5	-	t=6.0 h	2.00	45.0	-	t=6.0 h	2.10	60.0	-
9	H=19.0 h	1.80	28.0	-	H=19.0 h	1.60	44.5	5	H=19.0 h	1.10	61.0	1	H=19.0 h	0.96	71.5	-
10	Q=0.67	1.60	34.0	-	Q=0.67	1.30	50.5	-	Q=0.67	1.10	67.0	-	Q=0.67	0.69	83.0	-
11	Q=0.67	1.30	39.0	-	Q=0.67	1.40	55.0	-	Q=0.67	1.00	71.5	-	Q=0.67	0.69	83.0	-
12	Q=0.67	1.30	43.0	-	Q=0.67	1.20	59.0	-	Q=0.67	0.90	70.0	-	Q=0.67	0.68	90.0	3
13	Q=0.33 1/2	1.50	0	6	Q=0.33 1/2	2.40	0	6	Q=0.33 1/2	2.20	0	6	Q=0.33 1/2	2.10	0	6
14	t=6.5 h	3.00	22.5	-	t=6.5 h	2.40	36.0	-	t=6.5 h	2.10	50.0	-	t=6.5 h	2.00	62.0	-
15	H=19.5 h	1.60	31.5	5	H=19.5 h	1.70	43.5	5	H=19.5 h	1.10	65.0	2	H=19.5 h	1.00	81.0	-
16	Q=0.71	1.40	37.5	-	Q=0.71	1.20	54.5	-	Q=0.71	0.90	71.5	-	Q=0.71	0.72	86.5	-
17	Q=0.71	1.30	43.0	-	Q=0.71	1.20	59.0	-	Q=0.71	0.90	70.5	-	Q=0.71	0.70	90.5	-
18	Q=0.83	1.30	47.0	1	Q=0.83	1.10	63.0	3	Q=0.83	0.90	74.0	1	Q=0.83	0.65	94.0	3

## ANEXO 2. RESULTADOS DEL LAVADO

Comida No	Fecha	M <sub>inicio</sub> m/h	M <sub>fin</sub> m/h	D <sub>inicio</sub> m.m	D <sub>fin</sub> m.m	Registros de datos										L <sub>P<sub>inc</sub></sub> ca/lit	L <sub>P<sub>sup</sub></sub> ml/lit		
						t <sub>1</sub> lit	1	2	3	4	5	6	7	8	9			10	
1	6-10-87	50	24	5	5	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	24	25	
						16.0	86.0	42.0	24.0	13.7	15.0	5.30	1.30	0.44	0.50	0.10			
2	7-10-87	50	24	5	5	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	24	23	
						20.5	12.5	66.5	43.4	26.9	19.6	5.4	4.3	0.4	0.1	0.6			
3	8-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0	24	24
						13.5	11.5	84.5	76.5	49.3	41.7	34.8	12.1	2.80	0.21	0.14			
4	9-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	23	
						16.5	14.8	82.4	62.8	42.5	33.5	24.6	14.2	2.65	0.36	0.10			
5	8-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	24.5	
						15.8	14.5	82.3	15.0	63.2	40.1	21.3	14.2	3.6	0.62	0.17			
6	9-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	24	
						15.9	86.0	86.1	82.0	62.5	32.0	14.1	13.1	2.6	0.43	0.24			
7	13-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	24	
						26.7	26.4	81.3	42.8	28.4	23.6	14.6	11.3	3.61	0.64	0.14			
8	15-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	23	
						44.9	82.4	82.4	83.5	63.3	24.4	16.5	11.4	5.8	0.56	0.10			
9	16-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	24.5	
						40.1	70.3	81.5	66.1	57.6	24.0	22.8	6.06	5.3	1.01	0.10			
10	16-10-87	50	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	24.5	
						14.8	25.0	24.6	30.7	64.8	35.3	17.4	12.0	3.3	0.57	0.16			
11	6-11-87	31	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	24.5	
						25.2	27.1	54.4	38.5	34.6	15.5	4.3	10.5	1.32	0.10	0.33			
12	16-11-87	31	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	24.5	
						81.0	40.0	76.0	42.0	36.0	27.0	22.0	18.0	16.0	1.0	0.12			
13	24-11-87	31	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	25	
						105.0	156.0	184.0	82.0	78.0	32.0	32.0	26.0	3.5	2.0	1.0			
14	25-11-87	31	24	5	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	24	23.5	
						140.0	260.0	140.0	140.0	120.0	30.0	44.0	32.0	12.0	7.0	1.0			
15	01-12-87	31	24	7	5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	24	24.5	
						140.0	200.0	176.0	140.0	100.0	30.0	44.0	13.0	2.1	1.1	0.3			

### **ANEXO 3. DESCRIPCION DETALLADA DEL PROTOCOLO EXPERIMENTAL**

## DESCRIPCION DETALLADA DE LA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

- 1) Preparar antes del inicio de la corrida experimental, los recipientes plásticos necesarios para la colección de las muestras. Estos deberán ser de aproximadamente 200 ml y en un total de 84 a 90 unidades.
- 2) Verificar el equipo así como el correcto funcionamiento de B-1 (ver pp 37).
- 3) Hacer funcionar B-1 y mediante la manipulación de V-1, V-3 y V-R. Fijar la velocidad de filtración deseada en la descarga, mediante aforos.
- 4) Hecho lo anterior, es indispensable asegurar que la columna de agua sea la correspondiente (1 m.c.a.) manipulando las válvulas mencionadas en el punto 3.



- 5) Anotar la caída de presión inicial. Tomar muestras del influente, efluente y puntos intermedios en el lecho.
- 6) De acuerdo con la ecuación 3 (pp 46), tomar las muestras en función del decremento del  $\Delta P$ .
- 7) Llegado el fin de la corrida de filtración ( $\Delta P = 90-100$  cm de  $H_2O$ ) se toma las muestras y datos de campo finales. Se para el proceso mediante el cierre de B-1.
- 8) Se prepara el filtro para el retrolavado cerrando V-3 y abriendo V-4 y V-5.
- 9) Se colectan las muestras de acuerdo con la técnica mencionada en la pp 53.

A las muestras se someten al siguiente análisis:

- 1) Medición de turbiedad<sup>+</sup>: (Ver pag 53). Parte de la muestra se coloca en la celda del turbidímetro la cual, se introduce en el espacio respectivo para que el instrumento realice la medida. La lectura se obtiene en forma numérica gracias al sistema electrónico del aparato.

+Turbiedad: El término turbiedad se aplica a aguas que contienen materia suspendida y que interfiere con el paso

de la luz a través de las mismas. El estándar empleado para su medición es:

$$1 \text{ mg SiO}_2/\text{lt} = 1 \text{ unidad de turbiedad}$$

Las soluciones estándar originales de sílica fueron empleadas para calibrar el turbidímetro Jackson, por lo que sus unidades son Jackson, equivalentes a las nefelométricas (UTN que utilizan polímero para estandarizar) (Sawyer y Mc Carty, 1978).

- 2) Determinación de sólidos suspendidos totales (S.S.T.): De la muestra que aún tenemos en el recipiente plástico, se extraen 100 ml. Se filtran al vacío en papel filtro de fibra de vidrio, previamente puestos a peso constante. Se coloca la muestra, 2-3 h a 103°C.. La determinación se realiza por diferencia de peso del papel filtro, (limpio y con muestra), relacionado al volumen filtrado, después de enfriado.

Los resultados globales se reportan en los anexos 1 y 2.