

46  
29

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE QUIMICA

"FILTRACION ASCENDENTE DEL EFLUENTE SECUNDARIO  
DE LODOS ACTIVADOS COMPLETAMENTE MEZCLADO"

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

VIRGEN GUADALUPE HUERTA ROMERO

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1 9 8 9



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 esta 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.

# INDICE

	pág
A. Resumen	I
B. Notación	II
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2. RECOPIACION DE INFORMACION</b>	<b>2</b>
2.1 Historia	2
2.2 Recopilación de información	3
2.2.1 Experiencia Rusa	3
2.2.2 Experiencia Europea	5
2.2.3 Experiencia Británica	7
2.3 Consideraciones de diseño	11
2.4 Estudios similares	11
2.5 Análisis de la información	13
2.5.1 Unidades de medida	13
2.5.2 Filtración ascendente	13
2.5.3 Lavado.	13
2.5.4 Escuelas de filtración.	14
<b>3. DISEÑO DE LOS FILTROS</b>	<b>15</b>
3.1 Tanque de preparación del influente.	15
3.2 Columnas de filtración.	15
3.3 Puertos de muestreo.	16
3.4 Materiales de empaque.	16
3.4.1 Grava.	16
3.4.2 Arena	17
3.5 Selección del equipo de bombeo	19
3.5.1 Cálculo de las pérdidas de carga a través del empaque	19

	pág.
3.5.2 Pérdidas de carga a través de accesorios.	20
3.5.3 Pérdidas de carga a través de la tubería.	21
3.5.4 Pérdida de carga total.	22
3.5.5 Potencia de la bomba de alimentación.	22
3.6 Sistema de lavado	23
<b>4. CONSTRUCCION DE LOS FILTROS</b>	<b>24</b>
4.1 Localización del modelo físico.	24
4.2 Descripción del proceso	24
4.2.1 Descripción del proceso	25
4.3 Descripción del equipo.	25
4.3.1 Sistema de alimentación	25
4.3.2 Sistema de filtración.	26
4.3.3 Sistema de lavado	26
4.4 Pruebas hidrostáticas	32
<b>5. EXPERIMENTACION PARA DEFINIR DOSIS DE REACTIVOS</b>	<b>33</b>
5.1 Calidad del agua.	33
5.2 Pruebas de tratabilidad (Determinación de la dosis óptima de coagulante y del polielectrolito)	33
5.2.1 Bases teóricas	33
5.2.2 Metodología de los ensayos.	36
5.2.3 Resultados.	37
5.3 Relación turbiedad - contenido de sólidos en peso.	39
<b>6. EXPERIMENTACION EN LOS FILTROS</b>	<b>41</b>
6.1 Operación de los filtros.	41
6.1.1 Preparación del influente.	41

	Pág.
6.1.2 Operación de los filtros.	41
6.2 Parámetros para el seguimiento de la filtración.	42
6.3 Ensayos.	42
6.3.1 Objetivo y condiciones de operación.	42
6.3.2 Resultados.	43
6.4 Remoción de coliformes	44
6.5 Lavado	44
<b>7. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS</b>	<b>48</b>
7.1 Influencia de la turbiedad del influente sobre la duración de la corrida.	48
7.1.1 Influencia de la velocidad de filtración sobre la duración de la corrida.	50
7.1.2 Eficiencias de la filtración.	50
7.1.3 Altura necesaria de medio filtrante en función de la eficiencia de filtración.	53
7.1.4 Altura del lecho en función de la pérdida de carga.	53
7.1.5 Eficiencia.	58
7.2 Comparación con criterios existentes	58
7.2.1 Modelación.	58
7.3 Estudios similares	60
7.4 Lavado	60
7.5 Comparación con otros procesos.	61
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>64</b>
<b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>67</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 2.1 Resultados obtenidos por Naylor et al, 1967 y Truesdal et al, 1967. en experimentos de filtración ascendente	8
TABLA 2.2 Criterios de diseño y operación para filtros ascendentes	9
TABLA 2.3 Composición del lecho filtrante del sistema L'eau Claire	10
TABLA 2.4 Resumen de los resultados obtenidos en el estudio de DiBernardo y Texeira	12
TABLA 3.1 Soporte empleado en el estudio y especificaciones de los términos de referencia	17
TABLA 3.2 Características de los medios filtrantes empleados	18
TABLA 3.3 Pérdidas de carga a través del medio filtrante para cada tamaño efectivo de arena	20
TABLA 5.1 Condiciones experimentales empleadas para la determinación de la dosis óptima de coagulante y de polielectrolito.	36
TABLA 5.2 Rendimientos obtenidos en el sobrenadante filtrado con una dosis de 20 mg/l de sulfato de aluminio para las turbiedades superiores a 50 UTN y de 10 mg/l para las turbiedades inferiores a este valor.	38
TABLA 5.3 Promedio de los datos empleados para el ajuste lineal	40
TABLA 6.1 Experimentos realizados.	43
TABLA 6.2 Resumen de los resultados para: Arena de TE = 0.90 mm (SISTEMA A)	43
TABLA 6.3 Resumen de los resultados para: Arena de TE = 1.19 mm (SISTEMA B)	44
TABLA 6.4 Resultados de los análisis de coliformes	45
TABLA 6.5 Resultados del consumo de agua por los filtros para el lavado. Arena de TE de 0.9 mm	46
TABLA 6.6 Resultados del consumo de agua por los filtros para el lavado. Arena de TE de 1.19 mm.	47

	pág.
TABLA 7.1 Duración de la corrida en función de la turbiedad del influente, velocidad de filtración y tamaño de arena.	49
TABLA 7.2 Eficiencias de remoción de sólidos	50
TABLA 7.3 Altura de lecho necesaria para una eficiencia de remoción de sólidos de 95 %	53
TABLA 7.4 Factor para la ecuación de Hudson	59
TABLA 7.5 Composición de los filtros multicapas	61

## LISTA DE FIGURAS

FIG.2.1 Clarificador por Contacto. Filtro Ascendente	3
FIG 2.2 Filtro ascendente de rejilla	6
FIG 4.1 Falso fondo de los filtros ascendentes	27
FIG 4.2 Estructura soporte	28
FIG 4.3 Diagrama de flujo	29
FIG 4.4 Sistema de filtración	30
FIG 4.5 Puntos de muestreo y localización de los piezómetros	31
FIG 5.1 Fórmula base de los polielectrolitos no iónicos	34
FIG 5.2 Fórmula general de la poliacrilamida parcialmente hidrolizada por la sosa.	35
FIG 5.3 Polielectrolito catiónico	35
FIG 5.4 Relación entre la concentración con SS v la turbiedad	40
FIG 7.1 Influencia de la velocidad de filtración sobre la duracion de la corrida	51
FIG 7.2 Influencia de la velocidad de filtración sobre la duracion de la corrida	51
FIG 7.3 Eficiencia en función del espesor de lecho	52
FIG 7.4 Altura del lecho en función de la pérdida de carga	54
FIG 7.5 Altura del lecho en función de la pérdida de carga	55
FIG 7.6 Altura del lecho en función de la pérdida de carga	56
FIG 7.7 Altura del lecho en función de la pérdida de carga	57



## ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. MEDICION DE LA TURBIEDAD	69
A.1 Unidades UTJ	70
A.2 Métodos nefelométricos.	71
A.2.1 Calibración con formacina	71
A.2.2 Calibración con solución de Kieselguhr.	71
A.3 Correlación entre la turbiedad y el contenido de sólidos en peso.	72
A.4 Unidades estandarizadas para la turbiedad	72
ANEXO B. Análisis granulométrico.	73
ANEXO C. Gráficas de las pruebas de jarras	75
ANEXO D. Relación entre la turbiedad y el contenido de sólidos.	82
ANEXO E. Resultados.	
Arena 0.9 mm de TE	85
ANEXO F. Resultados.	
Arena 1.19 mm de TE	91
ANEXO G. Gráficas de los estudios.	
Arena 0.9 mm de TE	97
Arena 1.19 mm de TE	112
ANEXO H. Gráficas de eficiencia en función del espesor del medio filtrante.	126
ANEXO I. Gráficas de pérdida de carga en función del espesor de lecho.	137

## A. RESUMEN

Este trabajo consistió en evaluar la aplicación de la filtración ascendente a un efluente biológico secundario.

De acuerdo con la literatura, la filtración ascendente permite tener duraciones de corrida más largas que las obtenidas con la descendente debido a una mejor repartición de los sólidos en el lecho.

La experimentación se realizó en cuatro filtros piloto de 6 pulgadas de diámetro con una altura total de 3.2 m, instalados en la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria (PTCU), los cuales funcionaban en forma independiente, dos de ellos utilizando arena de T.E. de 0.9 mm (sistema A) y los otros arena de 1.2 mm (sistema B).

En la parte inferior se colocó una capa de 70 cm de grava limpia con cantos redondeados, en la superior 180 cm de arena.

Las condiciones de operación analizadas fueron de 20, 50, 100 y 150 UTN para la turbiedad y 6, 9 y 12 m/h para la velocidad de filtración. Lo anterior fue estudiado con arenas de diferente tamaño efectivo: 0.9 y 1.19 mm.

La dosis del coagulante empleada para las turbiedades de 100 y 150 UTN fue de 20 mg/l y 10 mg/l para las de 50 y 20 UTN y la de polielectrolito no iónico de 1 mg/l en todos los casos.

Se realizaron un total de 26 ensayos (trece para la arena de 0.9 y trece para la de 1.19 mm)

Se llegó a la conclusión de que la filtración ascendente es un proceso que a pesar de sus indudables ventajas (buena distribución de los sólidos en el medio) posee varias limitaciones, sobre todo en lo que concierne a su operación. El lavado de estos filtros es una tarea ardua que requiere de una gran cantidad de agua, y, si éste no se lleva a cabo perfectamente, los filtros se atascan con el tiempo ocasionando que el medio se fluidifique durante la fase de filtración.

## B. NOTACION

- B : factor que depende de la calidad del agua por filtrar  
C<sub>o</sub> : factor de forma de los granos de arena  
d<sub>1</sub> : tamaño correspondiente al 60 % de la curva granulométrica del medio colocado en la parte superior [L]  
d<sub>2</sub> : tamaño efectivo del medio inferior [L]  
d<sub>i</sub> : diámetro promedio de las mallas [L]  
f<sup>1</sup> : coeficiente de Kosenv  
g : aceleración de la gravedad [L T<sup>-2</sup>]  
h : pérdida de carga [L]  
ΔH : pérdida de carga debido al taponamiento del lecho [L]  
l : profundidad del frente de filtración [L]  
L : espesor de la capa [L]  
NMP : número más probable  
P<sub>o</sub> : porosidad del lecho  
s : desviación estandar  
q : tasa de filtración [L T<sup>-1</sup>]  
Q : gasto [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>]  
t : valor teórico  
TE : tamaño efectivo de la arena [L]  
UTJ : unidades de turbiedad Jackson  
UTN : unidades técnicas nefelométricas  
V<sub>f</sub> : velocidad de filtración [L T<sup>-1</sup>]  
x : por ciento en peso de arena retenida entre 2 mallas consecutivas.  
 $\bar{x}$  : valor promedio
- η : eficiencia  
ρ<sub>1</sub> : densidad del medio colocado en la parte superior [M L<sup>-3</sup>]  
ρ<sub>2</sub> : densidad del medio colocado en la parte inferior [M L<sup>-3</sup>]  
ρ : densidad del líquido [M L<sup>-3</sup>]  
ν : viscosidad cinemática [L<sup>2</sup> T<sup>-1</sup>]

### 1. INTRODUCCION

Diversos estudios se han orientado a comparar la filtración ascendente con la descendente. Es común atribuir a la primera mayores duraciones de corrida y un ahorro en reactivos cuando se realiza la filtración directa.

Entre las opciones que existen para potabilizar el agua se encuentra la filtración directa con flujo ascendente. Se trata de una tecnología que ha sido utilizada desde el siglo pasado en sistemas de tratamiento por diversos países europeos, y a partir de los años sesenta ha comenzado a interesar en los Estados Unidos.

En recientes investigaciones se mencionan las siguientes ventajas:

- facilidad de operación,
- menor consumo de reactivos,
- eliminación de pretratamientos (en aguas con baja turbiedad y poco contenido de color, Mintz ,1971)
- y sobretodo, mayor capacidad de retención de sólidos.

En especial, se señala que se tiene una mejor distribución de los sólidos al quedar los granos más gruesos en la parte inferior después del lavado donde entra el influente. Ello trae por consecuencia el aumento de la duración de la corrida y de la cantidad de agua producida.

Basados en las ventajas que presumiblemente tiene la filtración ascendente se decidió realizar la evaluación a nivel piloto de su comportamiento para establecer en qué medida favorece la producción de agua de buena calidad, así como las implicaciones que tiene de construcción, operación y mantenimiento.

Para ello se llevó a cabo el diseño, construcción y operación de cuatro filtros piloto tomando en cuenta los criterios señalados en la literatura.

## 2. RECOPIACION DE INFORMACION

### 2.1 Historia.

El primer caso conocido de filtración ascendente fue desarrollado por un físico italiano, Porzio, en 1685 (Haney y Stanley, 1974) el sistema era de biflujo, operando la parte superior en sentido descendente y la inferior en ascendente. Este sistema fue utilizado en Francia en 1754 por Amy y en Austria en 1790 por Von Wuthwehr.

En 1791 en Peacock un arquitecto británico obtuvo la primer patente para un filtro ascendente. El medio consistía de arena, grava y vidrio molido. Cada capa de medio tenía el doble del diámetro de la capa precedente. Por ello, se considera que Peacock fue el primero en reconocer la ventaja de filtrar a través de un medio que va de los granos gruesos a los finos. Como falso fondo empleó tablas de madera y el lavado lo efectuaba por la expansión del lecho. Su invento se empleó a bordo de tres barcos británicos en 1800. En el siglo siguiente existieron muchas patentes sobre filtros ascendentes. En 1889 Hyatt patentó uno que es similar a los actuales.

La primer planta de potabilización con filtros ascendentes se instaló en 1827 en Greenock, Escocia. Los filtros eran del tipo lento y podían funcionar tanto en sentido ascendente como descendente.

Los primeros filtros en Estados Unidos fueron construidos en Richmond, Va. en 1832. La alta turbiedad del influente sobrepasó la capacidad de los filtros por lo que fueron abandonados en 1835. Posteriormente hubo otras instalaciones que emplearon como medio grava, carbón, arena o una combinación.

En Pawtucket, E.U.A., se construyó un filtro ascendente para remover sólidos suspendidos gruesos. El medio iba desde un tamaño de 6 cm en la parte baja hasta 0.5 m en la parte superior. En 1889 se construyó uno más grande que contenía 46 cm de piedra, 31 cm de carbón y adobe y 46 cm de gravilla. Se menciona que este filtro tuvo una buena eficiencia en remoción de microorganismos y

sólidos suspendidos. La tasa media de operación era de 7.8 m/h. El lavado se llevaba a cabo por el drenado del filtro y limpieza del medio superficial con manguera. Este filtro operó hasta 1930. En general, casi todos los filtros con flujo ascendente tenían el defecto de que el lavado por fluidificación no resultaba efectivo ya que no promueve la fricción entre los granos, e incluso por fluidificación completa del medio no se logra remover completamente los sólidos de las capas más profundas.

## 2.2 Recopilación de información

### 2.2.1 Experiencia rusa.

En Rusia, los filtros ascendentes comenzaron a tener auge en 1953. Minz diseñó varias plantas en Moscú, Leningrado, Cheliabinski, Gorkii, Kuibyshev, Kiev, Rostov-on-Don, Taganrog y Ufa.

La versión rusa de los filtros ascendentes se les conoce como clarificador por contacto y se emplea para potabilización de aguas con turbiedades superiores a 150 UTN.

En la clarificación por contacto se pretende combinar la coagulación y clarificación mediante la adición de reactivos antes de pasar por el filtro. Un múltiple lateral distribuye la alimentación. La colección se efectúa mediante canaletas. El lavado se realiza al pasar el agua en el mismo sentido pero a velocidad elevada. Un esquema de este proceso se presenta en la FIG.2.1.

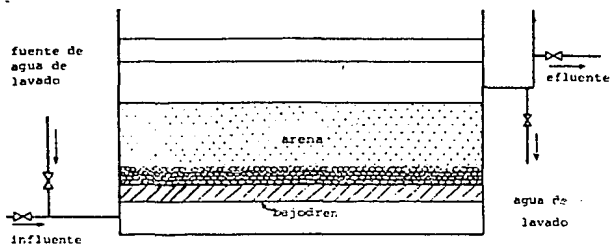


FIG.2.1 "Clarificador por Contacto" Filtro Ascendente

Las ventajas que se supone tiene este proceso sobre la floculación, sedimentación y filtración descendente por separado son:

- 1) Disminución del tamaño total de la planta y en ocasiones eliminación del pretratamiento.
- 2) Disminución en el consumo de reactivos ya que no se requiere la formación de flocúlos grandes y pesados para su sedimentación
- 3) Mejor utilización del lecho filtrante
- 4) Menor pérdida de carga en la filtración ascendente para filtros de igual espesor, ya que la mayor parte de los sólidos son eliminados en la zona de alta porosidad donde su acumulación provoca una menor rapidez en el aumento de la pérdida de carga.

Los primeros clarificadores por contacto tenían una profundidad entre 2.3 y 2.6 m. De acuerdo con investigaciones rusas la eficiencia obtenida es mayor o comparable con la de un proceso convencional de floculación, sedimentación y filtración descendente. La remoción del color es también similar, no así la eliminación de bacterias que es inferior. Una de las ventajas principales consiste en que disminuye en 30% el consumo de reactivos.

En 1955 se tenía como criterio de operación para los clarificadores por contacto velocidades entre 5 y 7 m/h con tasas de lavado de 31 m/h. Las duraciones de corrida son aproximadamente del doble de los filtros descendentes. Posteriormente, en Leningrado se demostró que se podían emplear tasas de 17 m/h, con espesores de lechos de 2.59 m.

Lenchevskas (citado por Haman y McKinney, 1967) encontró que los filtros ascendentes son menos sensibles a los cambios de temperatura y gasto que los procesos convencionales de floculación. Además, recomendó no exceder de velocidades de 6 m/h para evitar la expansión de la arena. Posteriormente, y también en Rusia, se encontró que la fluidificación se logra evitar al emplear tamaños de arena mayores 0.65 mm. Las velocidades recomendadas de lavado oscilan de 47 a 55 m/h durante 7 a 8 min. Minz recomienda la introducción de los reactivos justo antes del

filtro. El objetivo principal es la formación de micro-agregados que se retienen por intercepción. Especifica que la arena no debe ser mayor de 2 mm ni menor de 0.5 mm, siendo el diámetro medio de 0.9 a 1.1 mm. La capa de arena debe ser de 2 m y estar colocada sobre 35 a 40 cm de grava.

En 1957 se construyó una planta de  $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$  para tratar el agua del Volga en Kuibyshev. El agua pasaba por un desarenador, cribado y dosificación de coagulante con una mezcla rápida de 36 segundos. Después, el agua fluía por un clarificador por contacto y era almacenada para su distribución previa cloración. La turbiedad del Volga alcanza valores entre 120 y 150 mg/l en época de avenidas. Su color varía entre 30 y 60 unidades de la escala Pt-Co. Aunque se encontró que se empleaba mayor cantidad de agua para lavado su costo de operación resultó más bajo debido a la disminución de uno de los reactivos. A lo anterior se debe añadir un menor costo de instalación.

Mintz, 1971 recomienda los clarificadores por contacto para aguas con baja turbiedad y color. Según este autor su aplicación es apta para aguas con turbiedades hasta de 150 mg/l medida como materia en suspensión. El espesor del lecho empleado es de 2 a 2.5 m y las tasas del orden de 5 a 6 m/h.

## 2.2.2 Experiencia europea.

Los alemanes han efectuado modificaciones importantes al sistema de filtración ascendente que tienden a impedir la fluidificación del material más fino durante la filtración. El primer avance consiste en colocar la canaleta de colección del filtrado ligeramente por debajo de la superficie. Para facilitar el lavado introducen agua en sentido descendente de tiempo en tiempo. Así, el material muy pesado y retenido en la parte baja difícil de ser eliminado por fluidificación sale por el fondo. El lavado normal se efectúa con una combinación de agua y aire. Este proceso dió lugar a la filtración con doble sentido en donde el flujo descendente evita la expansión de la capa superior de la arena. Smit (1963) señala que existen aproximadamente 350 plantas con



filtración ascendente en Holanda y los países del Este. Por otra parte, este ingeniero introdujo en 1961 el esquema de la FIG.2.2. El principio de funcionamiento consiste en colocar una rejilla de placas paralelas por debajo de la superficie de la arena. Durante la filtración la arena choca contra las placas evitando su expansión. El espaciamiento entre placas debe ser tal que realice eficientemente esta operación pero no tanto como para dificultar el lavado. Generalmente, el espaciamiento es de 100 a 150 veces el tamaño de la arena más fina. El lavado se hace con agua y aire, o aire solo en la primera etapa seguido de agua.

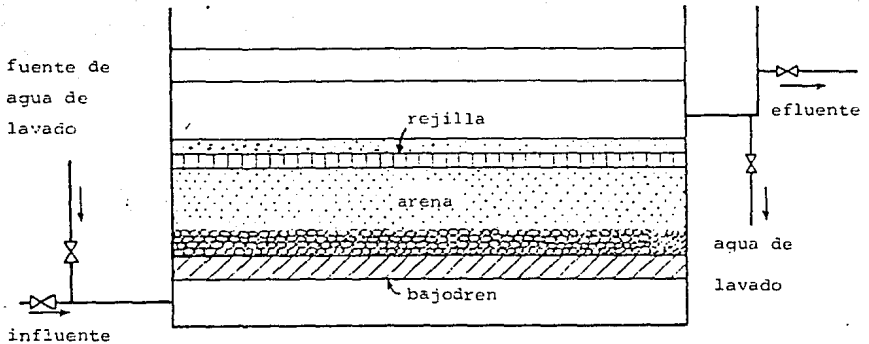


FIG.2.2 Filtro ascendente de rejilla

Recientemente se ha encontrado que estos filtros pueden operar con velocidades hasta de 12 a 24 m/h. Se ha sugerido (Water Filtration, 1966) que el agua cruda puede usarse para lavado ya que en estos filtros siempre se descarta el primer volumen filtrado. A pesar de que el volumen neto empleado para el lavado es siempre mayor que en un filtro descendente, su relación con el volumen filtrado es menor por su alta producción de filtrado. El espesor de lecho varía en función de la calidad deseada del filtrado entre 0.6 y 1.5 m.

Las instalaciones con filtros ascendentes de rejillas son numerosas. Existen en Europa, África y América. Sus usos incluyen el abastecimiento de agua, el tratamiento de efluentes terciarios, la filtración de efluentes de fabricación del papel y de otras industrias.

### 2.2.3 Experiencia británica.

Estudios de laboratorio realizados por Diaper e Ives, (1965), e Ives, (1967) demostraron que, bajo las mismas condiciones, se obtienen mejores rendimientos de la filtración ascendente que la descendente. En este estudio la arena estaba graduada de 0.6 mm en la parte superior hasta 1.2 mm en la inferior. El espesor total de la arena fue de 120 cm; los ensayos se realizaron entre 5 y 10 m/h con concentraciones de 100 a 500 mg/l de Decalita L-10. Los ensayos se efectuaron empleando un disco perforado sobre la arena para evitar su expansión. Se encontró que para pérdidas de carga iguales las duraciones de corrida son más largas. Ello se debe a la mejor distribución del material en el lecho. Sin embargo, la eficiencia de remoción de sólidos es inferior con la filtración ascendente.

Ensayos similares se realizaron con un filtro de tres capas de (abajo para arriba) 33 cm de granate de 0.7 a 0.85 mm, 36 cm de arena de 0.85 a 1 mm y 33 cm de antracita de 1.0 a 1.2 mm. La filtración descendente en este filtro produjo mejores resultados que la ascendente y descendente en filtros simples de arena, en lo que respecta a la tasa el aumento de las pérdidas de carga y a la

calidad del efluente.

Diaper e Ives (1965) encontraron que el lavado del filtro ascendente es problemático y requiere introducir aire a presión al inicio. El pasar agua en sentido descendente, antes del lavado ayuda en la operación. La filtración ascendente se ha empleado en Inglaterra para el tratamiento terciario de aguas residuales. Ensayos piloto efectuados en Catsfield en un filtro de 15 cm con medio de 0.85 a 0.95 mm eliminaron el 90% de los sólidos y el 66% de la DBO. La velocidad de filtración fué de 0.48 m/h. En Luton se operaron dos filtros para tratamiento terciario con el fin de comparar la filtración ascendente con la descendente. El filtro ascendente tenía un espesor de lecho de 1.52 m con arena entre 1 y 2 mm de diámetro. El filtro descendente, empacado con el mismo medio, tenía 0.91 m de espesor. Los resultados mostraron que la calidad del filtrado y la duración de las corridas es mejor en los filtros ascendentes, en ambos casos se encontró que se requería el uso de aire durante el lavado.

Navlor et al. 1967 y Truesdal et al. 1967 presentaron los resultados mostrados en la TABLA 2.1 para la planta de Luton. Inglaterra

TABLA 2.1 Resultados obtenidos en experimentos de filtración ascendente (Naylor et al. (1967) y Truesdal et al. (1967))

Influyente		Efluente Filtro ascendente				Efluente Filtro descendente			
DBO	SS	DBO	$\eta\%$	SS	$\eta\%$	DBO	$\eta\%$	SS	$\eta\%$
5.3	12.8	2.6	51	5.7	56	3.1	42	7.5	41
10.4	28.5	2.6	75	53	82	4.2	60	9.5	67
9.8	34.8	2.5	76	5.0	81	3.1	69	8.5	76

Los autores detectaron como problema potencial para la filtración ascendente el taponamiento de la entrada, en especial las rejillas y los falsos fondos.

TABLA 2.2 CRITERIOS DE DISEÑO Y OPERACION PARA FILTROS ASCENDENTES.

REFERENCIA	CRITERIOS DE DISEÑO				CRITERIOS DE OPERACION			CONDICION DE LAVADO	COMENTARIOS	
	ESPOSOR LECHO	TIPO MEDIO	ESPOSOR SOPORTE	DISPOSITIVOS AUXILIARES	TASA DE FILTRACION	CALIDAD INFLUENTE	DOSIS REACTIVOS			DURACION CORRIDA
	mm		cm		m/h	mg/l				
Mintz, 1953	2	TE de 0.9-1.1 mm	35-40		5.7	150		El doble de la filtración descendente	30m/h	Establece como limite máximo y mínimo 0.5 y 2.0 mm
Hill, 1962	0.38	TE de 0.25 a 0.32	10		8.6				30m/h	Señala que el agua empleada durante el lavado debe ser el 3 % del volumen filtrado
Smith, 1963	0.6 a 1.5			rejillas paralelas sobre la arena	12-24					El objeto de las rejillas es evitar la expansion de la arena
Hudson, 1963					5				35m/h	Define la turbiedad como el parametro mas util para monitorear la filtración. Recomiendan pasar agua en sentido descendente al inicio del lavado
Diaper e Ives, 1966	1.2	TE de 0.6-1.2 mm		Discos ranurados sobre la arena	10	100 a 500		El doble de la filtración descendente		
Jung y Savage, 1974		TE = 1.2			13		1mg/l			Utiliza polielectrolito catiónico
Habibia y O'melia, 1975										Señalan que las dosis optimas de coagulante se pueden determinar mediante pruebas de jarras
Miro y Delora, 1978	0.3 a 0.8	TE= 0.5	30-40		9				30m/h	
Degremont, 1979	1.5	TE=0.55			4-10		2 - 10		35 - 40m/h	Sulfato de aluminio como coagulante
Warner y Hudson, 1982							20			Sulfato de aluminio como coagulante
DiBernardo Fernandez, 1986 y DiBernardo Texeira, 1986	1.6		Máximo 80						20 a 30% de expansión	

### 2.3 Criterios de diseño.

En la TABLA 2.2 se presentan las consideraciones de diseño para filtros ascendentes señaladas por diversos autores. Cabe mencionar, que para este tipo de filtración también se aplican los criterios convencionales de diseño para filtros con excepción de los marcados en dicha tabla.

Como comentario de la TABLA 2.2 se señala que DiBernardo y Texeira, 1986 consideran que el espesor mínimo del lecho de un filtro ascendente debe ser de 1.6 m y que un espesor de la capa soporte superior a 0.8 m no proporciona ventajas adicionales.

### 2.4 Estudios similares

Haney y Steimle, 1974 realizaron un estudio sobre filtración ascendente de agua para abastecimiento proveniente del río Mississippi. El proceso que analizaron tiene el nombre comercial de L'eau Claire. La tasa de operación fue de 15 m/h y la turbiedad influente varió de 10 a 280 UTJ. Bajo estas condiciones obtuvieron duraciones de corrida de 3.5 a 34.5 h para una carga 4.9 mca. Como agente coagulante se empleó un polielectrolito catiónico en concentraciones de 0.5 a 7.5 mg/l. El rendimiento obtenido varió entre 41 y 92%. L'eau claire. En la TABLA 2.3 se presenta la composición del medio.

Además, Haney y Steimle señalan que la remoción de coliformes es del 99.6% en dicho proceso.

TABLA 2.3 COMPOSICION DEL LECHO FILTRANTE DEL SISTEMA L'EAU CLAIRE

Espesor cm	Material	Tamaño mm
15.24	grava	31.8-38.1
15.24	grava	9.5-15.9
91.44	arena	1.80*
91.44	arena	0.95

\* En el artículo no se especifica si se refiere al tamaño efectivo o al tamaño promedio.

Hill (citado por Hamann y Mackiney, 1967) dió a conocer resultados de experimentos realizados en Singapur. El proceso, tuvo un gasto de 2 l/s y consistió de coagulación, sedimentación y filtración ascendente. El medio estaba compuesto únicamente por gravilla: 10 cm con tamaño entre 1.9 a 2.5 cm y 38 cm de 2.5 a 3.2 mm. La tasa de filtración fue de 8.6 m/h y la duración promedio de la corrida de 50 h. La eficiencia obtenida resultó equivalente a la de los filtros descendentes. El lavado se efectuó con una mezcla de aire y agua, esta última a razón de 30 m/h. No indica ni la velocidad del aire ni la duración del lavado, únicamente reporta que el total de agua empleada es menor al 3 % del agua filtrada.

DiBernardo y Texeira (1986) efectuaron un estudio para analizar la influencia de las características de la cama soporte y de la arena en el proceso de filtración directa ascendente. Para las condiciones de operación que emplearon (TABLA 2.4) obtuvieron una concentración en el efluente de 0.1 a 0.2 UT. A partir de este estudio los brasileños concluyeron que el espesor óptimo de la cama de arena era de 160 cm.

TABLA 2.4 Resumen de los resultados obtenidos por DiBernardo y Texeira

Tasa de filtración	Turbiedad influente UT	Filtro	Turbiedad efluente UT	Pérdida de carga mca	Duración de la corrida h
160	11.2	f1	0.17	240	75
		f2	1.2	243	97
		f3	1.6	219	97
200	6.0	f1	0.15	243	50
		f2	0.15	240	53
		f3	0.28	239	64
200	11.0	f1	0.27	243	54
		f2	1.40	179	54
		f3	2.30	220	64
240	6.3	f1	0.14	246	33
		f2	0.13	238	37
		f3	0.21	240	46
240	8.3	f1	0.39	248	45
		f2	1.30	242	52
		f3	1.5	199	49
280	9.1	f1	0.22	240	26
		f2	1.77	239	37
280	7.7	f3	0.15	185	----
			0.38	173	----
			0.49	173	----

f1: 40 cm de soporte      f2: 80 cm de soporte      f3: 120 cm de soporte  
 200 cm de arena                      160 cm de arena                      120 cm de arena

Para finalizar la revisión bibliográfica, es importante remarcar que tanto Mintz como Camp concluyeron que siempre es necesario realizar una experimentación piloto para el diseño de filtros.

## 2.5 Análisis de la información

### 2.5.1 Unidades de medida

Resulta interesante el hecho de que a pesar de que la filtración es el proceso más antiguo de tratamiento de agua no exista una notación universal en cuanto a la forma de medirla. En EUA se emplea tanto las UTN (calibradas con formagina o solución de Kiesselghur) como las UTJ siendo las primeras las que actualmente se encuentran estandarizadas. En Rusia, se emplea como medida del contenido de sólidos medidos por el método gravimétrico en lugar del nefelométrico. Esta situación dificulta la extrapolación de los resultados obtenidos entre los diversos autores, en especial, los correspondientes a la escuela brasileña ya que se limitan a señalar que sus observaciones se efectuaron en UT.

### 2.5.2 Filtración ascendente

La literatura es muy clara en proclamar la superioridad de la filtración ascendente sobre la descendente en lo que se refiere a la distribución de sólidos, no así en cuanto al rendimiento y facilidad del lavado. Debe notarse que esta preferencia es muy marcada en los norteamericanos donde el lavado con sólo agua conduce a la estratificación de los lechos. Actualmente, la aplicación de un lavado combinado de agua con aire (que genera una mayor homogeneización del lecho) aunado al empleo de granulometrías mayores hacen que esta diferencia sea menor. Más aún, son varios los autores que señalan la dificultad del lavado en los filtros ascendentes.

### 2.5.3 Lavado.

Particularmente, se señala que el lavado solo con agua no es adecuado ya que no se logra remover los sólidos retenidos en las capas más profundas por falta de agitación. Además, de la literatura se desprende que la fluidificación del lecho que ocurre durante la filtración puede estar ocasionada por lavados deficientes que generan el aligeramiento del medio con el tiempo. A este respecto existen varios señalamientos sobre que es



necesario introducir aire a presión antes del lavado (Diaper e Ives, 1965).

#### 2.5.4 Escuelas de filtración.

Se constató que a pesar de que los rusos introdujeron la idea del clarificador por contacto, es la escuela europea la que tiende a predominar en la filtración, por lo que actualmente los rusos no predominan en el campo de las especificaciones mundiales, muy probablemente debido a la dificultad para disponer de la información proveniente de este país y al idioma.

### 3. DISEÑO DE LOS FILTROS

En el diseño de los filtros se consideró el deseo de simular un sistema de filtración ascendente con flujo constante que permitiera determinar la altura óptima del lecho filtrante y la retención de los sólidos por la grava. Todo lo anterior para un intervalo amplio de turbiedades (20 UTN a 150 UTN).

A continuación se presentan las bases de diseño para la instalación piloto. Se hace notar que dado el poco tiempo disponible y la gran cantidad de factores por analizar se procedió a la construcción de cuatro filtros con operación independiente.

#### 3.1 Tanque de preparación del influente.

Para obtener las turbiedades deseadas fue necesario contar con un sistema para la preparación del influente. Básicamente, éste es un tanque de mezclado donde se hace llegar una suspensión con turbiedad elevada y otra de baja turbiedad.

Cálculo del volumen mínimo

Número de unidades por alimentar : 4

Tasa máxima de filtración: 12 m/h

Superficie total de filtración:  $1.80 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \times 4$

Gasto total :  $0.88 \text{ m}^3 / \text{h}$

Tiempo mínimo de retención y mezclado : 1 h

Volumen mínimo : 880 l

#### 3.2 Columnas de filtración.

Se seleccionó un diámetro de 15.2 cm (6 in) de acuerdo con las recomendaciones de Adin *et al*, (1979 y de Metcalf & Eddy, 1977) para evitar el fenómeno de pared.

Para la altura se tomó en cuenta que:

- El espesor deseado de lecho era de 1.8 m (Di Bernardo y Texeira, 1986 señalan que éste debe tener entre 1.6 m y 2.0 m)
- El espesor del lecho de grava debía ser de 70 cm de acuerdo con los términos de referencia
- Se requieren 10 cm de falso fondo
- La salida del efluente debe estar colocada al menos 30 cm sobre el medio filtrante

Por lo que la altura mínima requerida es de:

$$1.8 + 0.7 + 0.1 + 0.3 = 2.9 \text{ m}$$

### 3.3 Puertos de muestreo.

Puesto que se deseaba conocer el comportamiento del filtro a diferentes profundidades del lecho se colocaron a lo largo de las columnas 8 perforaciones de 5/16 in. La primera, colocada en la parte inferior de los filtros, tiene por objeto servir como piezómetro de referencia, ya que se encuentra antes de la grava y del medio filtrante. Las seis perforaciones siguientes permiten medir la pérdida de carga a través de la grava (los dos primeros) y de la arena (los cinco restantes). Por último, la perforación de la parte superior, de 3/4 de pulgada de diámetro, tiene por finalidad permitir el desalojo del efluente.

### 3.4. Materiales de empaque.

#### 3.4.1 Grava.

En la parte inferior de los filtros se colocó una capa de grava limpia con cantos redondeados cuyas características se muestran en la TABLA 3.1

TABLA 3.1 Soporte empleado en el estudio.

ESPESOR (cm)	MEDIDAS (mm)
10	40.0 - 50.0
10	30.0 - 40.0
15	12.7 - 25.4
15	6.4 - 12.7
20	3.2 - 6.4
TOTAL: 70 cm	

## 3.4.2 Arena

Ante la dificultad de encontrar en el comercio un medio filtrante que cumpliera con las especificaciones deseadas se procedió a prepararlo en el laboratorio a partir de una arena comercial. Se escogió arena proveniente del banco localizado en Tarandacuaro, Gto. Se compraron 0.5 ton (aproximadamente  $1.4 \text{ m}^3$ ) de la arena más grande disponible (mallas 10-14).

La arena necesaria para cada tamaño es igual a:

$$\frac{(0.524)^2}{4} \pi \times 1.8\text{m} \times 2 = 0.066 \text{ m}^3 = 66 \text{ l}$$

Se hizo un primer análisis granulométrico sobre la materia prima de la arena el cual mostró que era necesario separar entre 30 y 60% del material más fino. Para tal propósito se utilizó un vibrador de mallas múltiples circular modelo semindustrial de 90 cm de diámetro. Las mallas de la serie USA empleadas fueron la No. 16 y la No.30 (aberturas de 1.19 y 0.59 mm, respectivamente). Básicamente, la porción útil fue la retenida en la malla No. 16, en tanto que en la malla No. 30 se retuvo el material más fino y que prácticamente fue desechado. El tiempo de tamizado para obtener las tallas específicas de 1.2 mm y 0.9 mm fue de 10 min. para la primera arena y de 5 min, para la segunda. El rendimiento obtenido en la preparación del material fue de 40% para la arena de 1.2 mm y 70% para la arena de 0.9 mm, invirtiendo para ello 48/h hombre de trabajo.

Una vez obtenido el material de empaque se procedió a realizar el análisis granulométrico para verificar las características de la arena preparada siguiendo las recomendaciones de Juárez y Badillo (1977) y Buitrón y Jiménez (1988). De acuerdo con la Norma ASTM C136-71 (1974) se estableció que el tiempo que debía permanecer la muestra en el Ro-Tap era de 7 min. El resultado de estos análisis así como los complementarios para tener una caracterización completa se muestran en la TABLA 3.2. Estos últimos análisis se efectuaron siguiendo las recomendaciones del CEPIS, 1981.

TABLA 3.2 Características de los medios filtrantes empleados

	Arena 1	Arena 2
TE, mm	1.19	0.90
CU	1.21	1.41
Porosidad, %	0.43	0.42
Densidad aparente	1.43	1.45
Peso específico, g/ml	2.5	2.5
Pérdida al ácido, %		
(HCl al 40 %)	0.2	0.2
Pérdida por ignición	0.3	0.3

En el Anexo B se muestran las curvas granulométricas obtenidas.

### 3.5 Selección del equipo de bombeo

#### 3.5.1 Cálculo de las pérdidas de carga a través del empaque.

Se calculó la pérdida de carga a través del medio basándose en la granulometría de la arena y la grava de acuerdo con la ecuación de Fair y Hatch:

$$h_o = v \frac{f^1}{g} q \frac{(1-P_o)^2}{P_o^3} \frac{36}{C_e^2} L \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{d_i^2} \quad (3.1)$$

donde.

- $h_o$  : pérdida de carga, m
- $v$  : viscosidad cinemática (a 20°C), 0.01 cm<sup>2</sup>/s
- $f^1$  : coeficiente de Kosenv igual a 5 para la mayor parte de las condiciones de filtración de agua (Fair, et. al., 1979).
- $g$  : 981 cm/s<sup>2</sup> = 7.323 x 10<sup>10</sup> m/d<sup>2</sup>
- $P_o$  : porosidad del lecho = 0.43 en arena 1 y 0.42 en arena 2
- $C_e$  : factor de forma, en este caso supuesta igual a 0.75 (Fair, et al, 1979).
- $L$  : espesor de la capa = 1.8 m
- $x_i$  : por ciento en peso de arena retenida entre 2 mallas consecutivas .
- $d_i$  : diámetro promedio de las mallas .
- $q$  : tasa de filtración, cuyo valor máximo es de 288 m<sup>3</sup>/m.d<sup>2</sup> (12 m/h).

Los resultados obtenidos para la máxima velocidad de operación se muestran en la TABLA 3.3 , donde se observa que las pérdidas de carga a través de la grava son despreciables.

TABLA 3.3 Pérdidas de carga a través del medio filtrante para cada tamaño efectivo de arena

	TE = 1.2 mm	TE = 0.9 mm
ΔA en la grava, cm	0.0037	0.0037
A en el medio filtrante, cm	45.34	58.06
Total, cm	45.3437	58.0637

### 3.5.2 Pérdidas de carga a través de accesorios.

P.V.C.

1)

Accesorio	cantidad	Diámetro(m)	L/D	Leq(m)
codo 90°	1	$1.3 \times 10^{-2}$	30	0.013
te	2	$1.3 \times 10^{-2}$	60	1.56
Cruz	2	$1.3 \times 10^{-2}$	60	1.56
Entrada	2	$1.3 \times 10^{-2}$	K= .78	0.36
				-----
			TOTAL	3.49 m

Longitud recta : 2.72 m

Longitud equivalente total : 6.21 m

2)

Accesorio	cantidad	Diámetro(m)	L/D	Leq(m)
codo 90°	4	$2.5 \times 10^{-2}$	30	3.0
te	1	$2.5 \times 10^{-2}$	60	1.5
Entrada	1	$2.5 \times 10^{-2}$	K= .78	0.60
				-----
			TOTAL	5.1 m

Longitud recta : 2.81 m

Longitud equivalente total : 7.91 m

Acero galvanizado

3)

Accesorio	cantidad	Diámetro(m)	L/D	Leq(m)
codo 90°	3	$2.5 \times 10^{-2}$	30	2.25
te	1	$2.5 \times 10^{-2}$	60	1.5
v. compuerta	1	$2.5 \times 10^{-2}$	50	1.25
				----
TOTAL				5.0 m

Longitud recta : 0.5 m

Longitud equivalente total : 5.5 m

4)

Accesorio	cantidad	Diámetro(m)	L/D	Leq(m)
codo 45°	1	$3.2 \times 10^{-2}$	16	0.52
tuerca unión	1	$3.2 \times 10^{-2}$	50	1.6
				----
TOTAL				2.11 m

Longitud recta : 1.16 m

Longitud equivalente total : 3.27 m

3.5.3 Pérdidas de carga a través de la tubería.

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

Area de dos filtros: 0.0364 m<sup>2</sup>

Gasto total: 0.12 l/s

$$D = 1.3 \times 10^{-2} \text{ m} \quad v = 0.904 \text{ m/s} \quad A = 1.3273 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3 \quad \mu_{20^\circ \text{C}} = 1 \times 10^{-3} \text{ Kg/m/seg}$$

Rugosidad relativa del P.V.C. (E/D=0.009)

$$\text{Rey (1)} = 1.17 \times 10^4 \quad \text{-----} \quad f = 0.028$$

$$\text{Rey (2)} = 2.26 \times 10^4 \quad \text{-----} \quad f = 0.0265$$

$$\text{Rey (3)} = 2.26 \times 10^4 \quad \text{-----} \quad f = 0.29$$

$$\text{Rey (4)} = 2.89 \times 10^4 \quad \text{-----} \quad f = 0.027$$



$$\Delta h = \frac{f v^2 L}{2 g_c d}$$

sustituyendo:

$$\Delta h = \frac{(0.028) (0.904 \text{ m/s}^2) (6.21 \text{ m})}{2 (9.81) (1.3 \times 10^{-2})} ;$$

$$\Delta h_1 = 0.56$$

$$\Delta h_3 = 0.27$$

$$\Delta h_2 = 0.35$$

$$\Delta h_4 = 0.115$$

$$\Delta h_1 = 1.29$$

### 3.5.4 Pérdida de carga total.

Pérdida de carga estática : 3.5 m

Pérdida de carga a través de la arena : 0.5 m

Pérdida de carga total : 1.29 + 3.5 + 0.5 = 5.29 m

### 3.5.5 Potencia de la bomba de alimentación.

La potencia que debe tener la bomba para alimentar es:

$$\text{bHP} = \frac{Q H S}{3960 \eta_m}$$

donde,

Q :gasto (Gpm)

0.12 l/s = 1.9 Gpm

H :carga (ft)

5.29 m = 17.35 ft

S :densidad relativa

1

$\eta_m$  :eficiencia mecánica

0.75

$$\text{bHP} = \frac{1.9 * 17.35 * 1}{3960 * 0.75} = 0.0111 \text{ HP}$$

### 3.6 Sistema de lavado .

Para el lavado se tomó en cuenta el deseo de emplear tanto agua como aire.

Cálculo de la cantidad de agua

Superficie del filtro:  $1.82 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

Velocidad de lavado:  $1.2 \text{ m/min} = 72 \text{ m/h}$

Gasto requerido por filtros:  $1.31 \text{ m}^3/\text{h} = 0.36 \text{ l/s}$

Gasto total para los cuatro filtros:  $1.46 \text{ l/s}$

Aunque se señala que los filtros no serán lavados al mismo tiempo.

Cálculo de la cantidad de aire

Superficie del filtro:  $1.82 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

Velocidad de lavado:  $0.4 \text{ m/min} = 24 \text{ m/h}$

Gasto total para 4 filtros:  $0.49 \text{ l/s}$

Tiempo de lavado :5 min

Cantidad total de aire requerida:  $147 \text{ l}$

Para la distribución de los fluidos de lavado se diseñó una placa de acrílico perforada colocada arriba de la llegada del agua de lavado y de alimentación y del aire.

## 4. CONSTRUCCION DE LOS FILTROS

La FIG 4.1 muestra un esquema de la instalación experimental empleada. El sistema consta de cuatro filtros que operan en forma independiente. Dos de ellos contienen la arena de TE de 0.9 (sistema A) y los otros la de 1.2 mm (sistema B). El objetivo de ello fue estudiar el efecto de emplear diferentes condiciones de operación con el mismo influente. A continuación se describe con mayor detalle el sistema.

### 4.1 Localización del modelo físico.

Los filtros se encuentran instalados en la planta de Tratamiento de Ciudad Universitaria para disponer, con relativa facilidad, de un agua con turbiedad variable (entre 20 y 150 UTN) y con un elevado contenido de coliformes.

Se decidió contar con un sistema de cuatro filtros, dado el elevado número de variables. Los filtros se agruparon por parejas en función de las granulometrías en estudio. Una vista de la estructura de acero empleada para sostener los filtros se muestra en la FIG 4.2.

### 4.2 Descripción del proceso

En la siguiente descripción se hace referencia al diagrama de flujo de la FIG 4.3. La alimentación se realiza combinando agua del tanque de aeración del sistema de lodos activados con la del sedimentador secundario en la proporción requerida para tener la turbiedad deseada. La mezcla se realiza en un tanque. Los efluentes se hacen llegar mediante un sifón (tubo de PVC de 1 1/2 in) y mediante un sistema de recirculación a la salida del tanque se logra la homogeneización del contenido de éste. La

alimentación a los filtros se realiza por dos bombas centrífugas de 0.5 HP que toman el agua del tanque del mezclado y la conducen mediante una tubería de PVC de 1 in de diámetro a cada uno de los sistemas. Finalmente, el agua llega a cada filtro mediante una tubería de 1/2 in.

La dosificación del coagulante se realiza en forma directa al tanque de mezclado y la del polielectrolito (Electrokem 2000) se hace sobre la línea de alimentación por medio de dos bombas (una de membrana y otra peristáltica); cada una alimentando dos filtros.

El agua circula en sentido ascendente a través de las columnas de filtración hasta salir por el orificio superior.

Con el objeto de efectuar la limpieza de los filtros se instaló tubería para alimentarlos con agua y aire de 1/2 in. Por facilidad, se emplea como agua de lavado la proveniente del sistema de abastecimiento de CU que tiene un gasto de 0.6 l/s y que es suficiente para lavar dos filtros al mismo tiempo. La determinación del gasto de lavado se realizó mediante aforos volumétricos.

El aire es suministrado por una compresora con una capacidad de 302 l y una presión de salida de 4 kg/cm<sup>2</sup>, cuyo flujo es controlado por rotámetros.

#### 4.3 Descripción del equipo.

##### 4.3.1 Sistema de alimentación

- a) Tanque de mezclado de fibra de vidrio de 1100 l de capacidad
- b) Dos bombas de alimentación de 1/2 HP, tipo centrífuga (una Fairbanks Morse, de 110 V y 50-60 Hz y otra EVANS con las mismas características).
- c) Una bomba Pennwalt para dosificación serie 94 con capacidad de 160 ml/min y que proporciona un gasto de 40 a 70 ml/min.
- d) Bomba peristáltica de fabricación nacional, velocidad variable y gastos variables.

#### 4.3.2 Sistema de filtración.

a) Columnas de filtración. Las columnas están construidas en la siguiente forma:

-70 cm de tubo de PVC hidráulico (6 in de diámetro) en el cual se aloja la grava (FIG 4.4)

- tubo de acrílico de 3 mm de espesor, 6 in de diámetro y 1.80 m de largo para la arena.

- 70 cm de PVC hidráulico.

Lo anterior suma una altura total de 3.2 m.

La salida del efluente se encuentra colocada a, aproximadamente, 55 cm sobre el nivel de la arena.

b) Estructura soporte. Las columnas se encuentran instaladas sobre una estructura de acero de 3/16 in que permite además sostener una placa de triplay de 3.10 x 0.50 m donde se encuentran los manómetros.

c) Puertos de muestreo. Todas las perforaciones efectuadas a lo largo de las columnas están conectadas a llaves de tres pasos para permitir la colección de muestras y la determinación de las caídas de presión (FIG 4.5)

d) Manómetros de mercurio. Debido a que se llega a tener pérdidas de carga hasta de 7 mca se optó por emplear manómetros diferenciales de mercurio. Se cuenta con dos instalados sobre las placas de triplay ; cada uno se puede conectar a dos filtros.

e) Sistema de distribución. La parte inferior de cada columna (10 cm) sirve como falso fondo y a ella llegan las tuberías de alimentación de agua (influyente y lavado) y de aire (lavado). Para repartir tanto el agua como el aire se cuenta con una placa de acrílico de 1.0 cm de espesor y con 13 perforaciones de 1/4 in.

#### 4.3.3 Sistema de lavado.

c) Compresora de 1 HP marca Murguía-Kellog, con tanque de almacenamiento de 302 l de capacidad y presión de salida regulada a 4 kg/cm<sup>2</sup>.

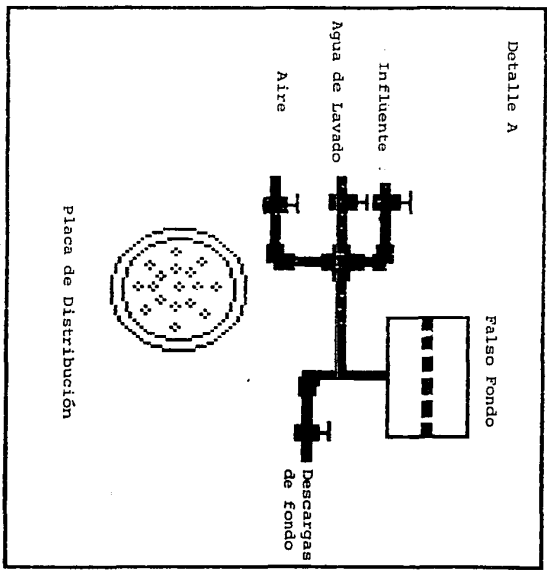
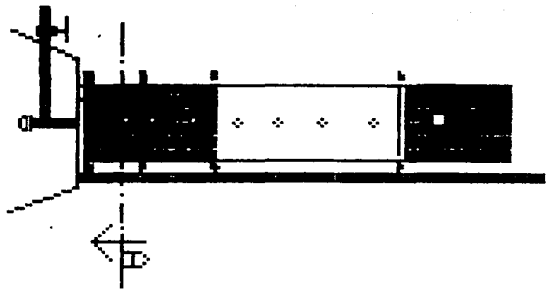


FIG. 4.1 FALSO FONDO DE LOS FILTROS ASCENDENTES

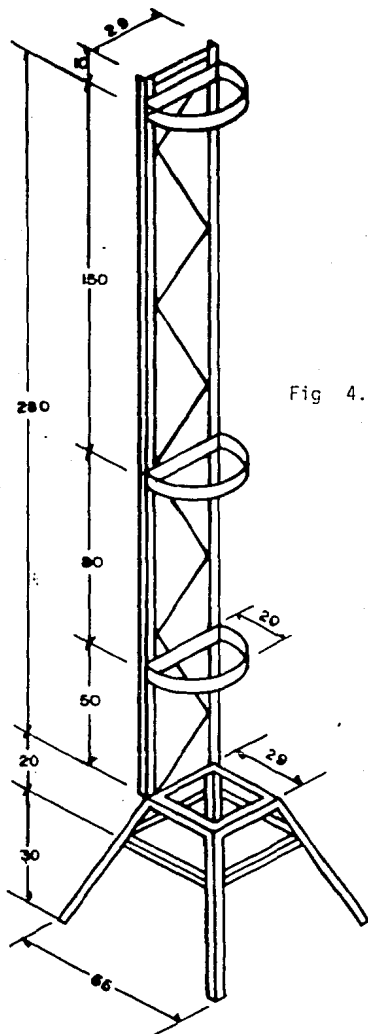


Fig 4.2. Estructura soporte

Acotado en cm.

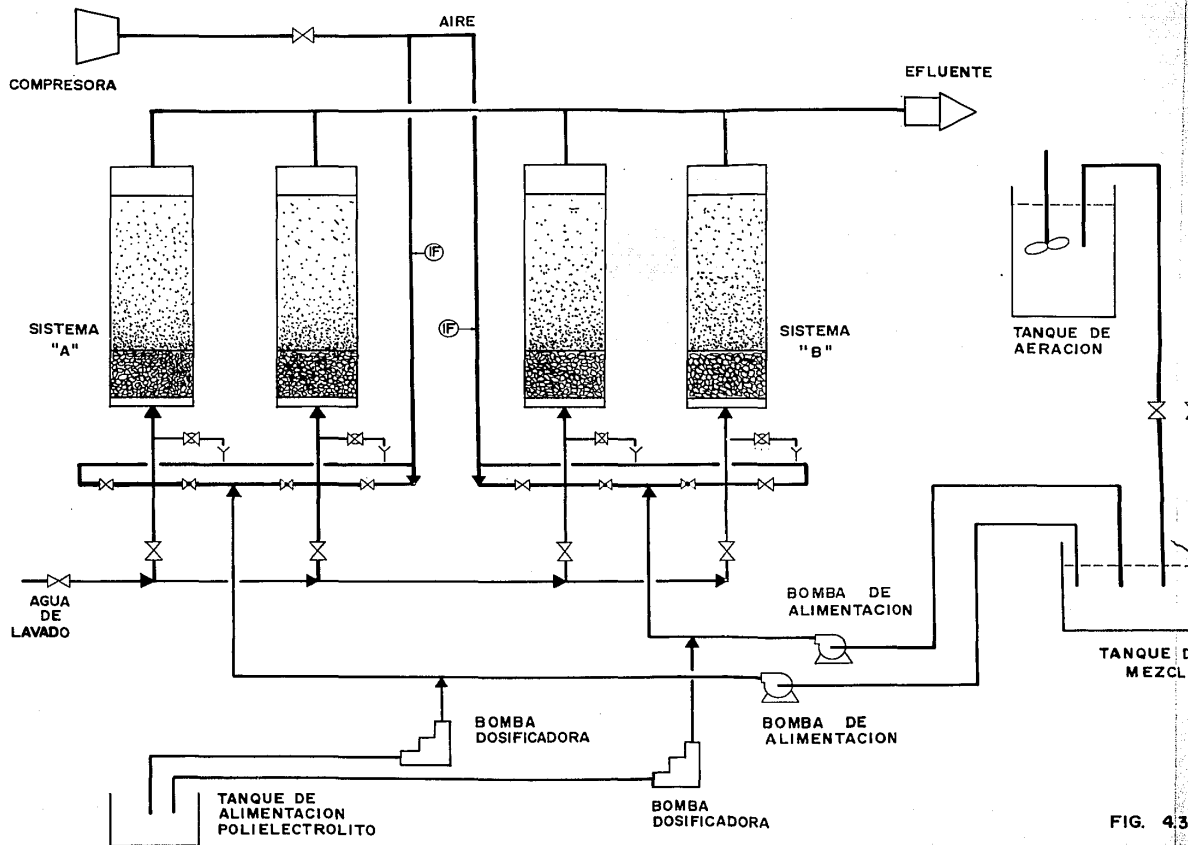


FIG. 43



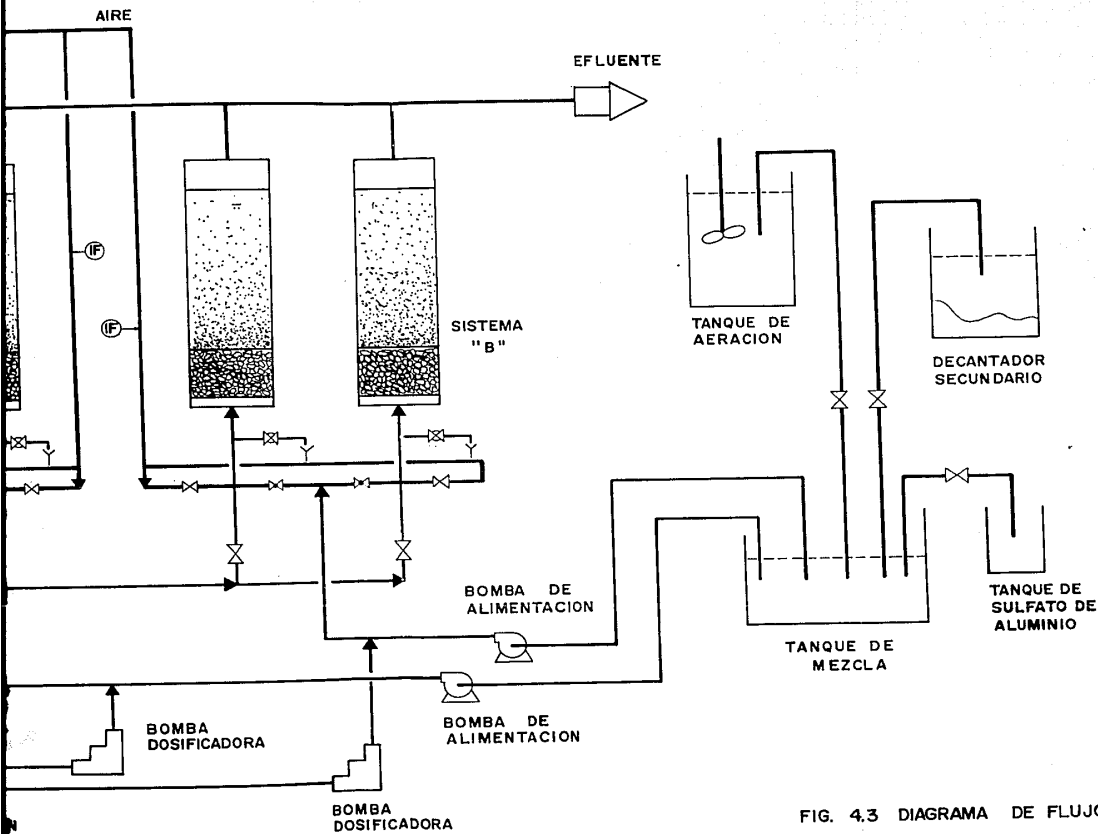
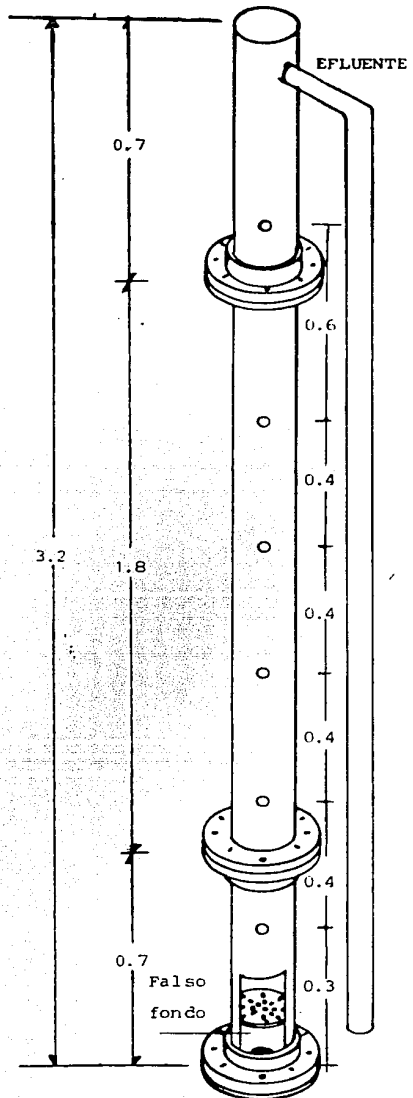


FIG. 4.3 DIAGRAMA DE FLUJO



- Tubo de PVC  
Ø 15.24 cm.
- Bridas para PVC
- Brida para Acrílico
- Tubo de Acrílico  
Ø 15.24 cm.
- Brida para Acrílico
- Brida para PVC
- Tubo de PVC
- PLACA DIFUSORA
- Brida para PVC
- Topo de Acrílico

INFLUENTE

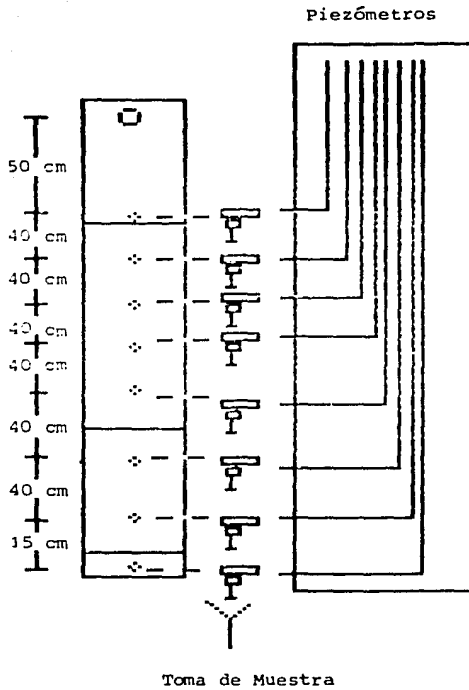


FIG 4.5. PUNTOS DE MUESTREO Y LOCALIZACION DE PIEZOMETROS

d) Dos rotámetros de aire, marca "Dwyer Instruments" de escala 0 - 20 SCFA (0 - 0.57 m<sup>3</sup>/h) con graduaciones cada 1 pie<sup>3</sup>/h (0.03 m<sup>3</sup>/h), para medir y controlar el flujo durante el lavado con aire.

#### 4.4 Pruebas hidrostáticas

Una vez terminada la instalación se procedió a verificar que no hubiese fugas. Para ello se llenaron los filtros con agua y se hizo operar tanto el sistema de alimentación como el de lavado. Se identificaron y marcaron aquellos puntos por donde salía agua: se vació el sistema y, una vez seco, se aplicó silicón, cinta de teflón o pegamento para acrílico, según el caso. Este proceso se repitió hasta constatar que no existiera fuga alguna.

## 6. EXPERIMENTACION PARA DEFINIR DOSIS DE REACTIVOS

### 5.1 Calidad del agua.

Como se mencionó la calidad del agua empleada para la alimentación de los filtros provino del tanque de aeración del sistema de lodos activados de la planta de Tratamiento de Aguas de C.U.. La concentración promedio en sólidos de esta agua es de 3000 mg/l y su turbiedad oscilaba entre 200 y 300 UTN. A partir de ella se prepararon soluciones con 20, 50, 100 y 150 UTN para realizar tanto la determinación de la dosis óptima del coagulante como los ensayos de filtración.

### 5.2 Pruebas de tratabilidad (Determinación de la dosis óptima de coagulante y del polielectrolito)

#### 5.2.1 Bases teóricas

El empleo sistemático de sales minerales de cationes polivalentes como coagulantes data de los últimos años del siglo pasado. En esa época, se establecieron las leyes que muestran que la acción coagulante es función de la valencia del ión que posee una carga opuesta a la de las partículas. La coagulación se efectúa mejor cuanto mayor es esta valencia (teoría de Schulze-Hardy). Esta teoría explica, en parte, por qué las sales de hierro y de aluminio trivalentes han sido, y continúan siendo, las más utilizadas en todos los tratamientos de coagulación de agua. Sin embargo, estos coagulantes, debido a la hidrólisis que experimentan, presentan el inconveniente de modificar las características físico-químicas del líquido (en especial, pH y conductividad). En dosis fuertes, producen un exceso de lodos que, generalmente, constituyen un problema.

Los coagulantes que se emplean con mayor frecuencia son las sales de hierro y de aluminio y, por razones económicas principalmente, el sulfato de aluminio y el cloruro férrico.

La acción coagulante de estas sales es el resultado de la

hidrólisis que sigue a su disolución, sin llevar inmediatamente a la formación del hidróxido. Los compuestos intermedios del aluminio, (complejos hidróxidoaluminosos) no sólo aportan las cargas necesarias para la neutralización de los coloides, sino que, según ciertos autores, pueden polimerizarse, y por tanto, crear puentes entre los coloides favoreciendo el proceso de floculación.

Como ayudantes para la floculación comúnmente se emplean polímeros orgánicos. Los polímeros orgánicos son macromoléculas de cadena larga, de origen natural o conseguidos por asociación de monómeros sintéticos, algunos de los cuales poseen cargas eléctricas o grupos ionizables. La eficiencia de los polímeros naturales es relativamente pequeña; en cambio, mediante el empleo de polímeros sintéticos se han conseguido resultados notables.

Según el carácter iónico de su grupo activo, los polímeros sintéticos, normalmente denominados polielectrolitos, comprenden: los no iónicos, los aniónicos y los catiónicos.

5.2.1.1 Polímeros no iónicos. Son casi exclusivamente poliacrilamidas de peso molecular comprendido entre 1 y 30 millones. La fórmula general de estos compuestos se muestra en la FIG 5.1.

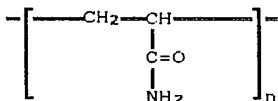


FIG 5.1 Fórmula base de los polielectrolitos no iónicos

5.2.1.2 Polielectrolitos aniónicos.- Tienen un peso molecular de varios millones y se caracterizan por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción y de otros que están ionizados negativamente (grupos carboxílicos o sulfúricos), cuyo papel consiste en provocar la extensión del polímero. El más conocido es la poliacrilamida parcialmente hidrolizada por la sosa cuya fórmula se presenta en la FIG 5.2.

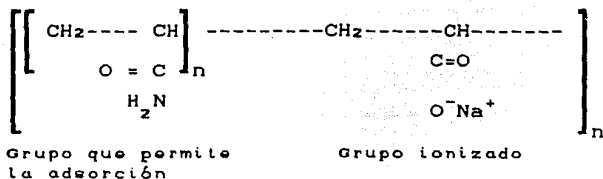


FIG 5.2 Fórmula general de la poliacrilamida parcialmente hidrolizada por la sosa.

5.2.1.3 Polielectrolitos catiónicos. Tienen en sus cadenas una carga eléctrica positiva debida a la presencia de grupos amino, imino o amonio cuaternario. En la FIG 5.3 se presentan un ejemplo.

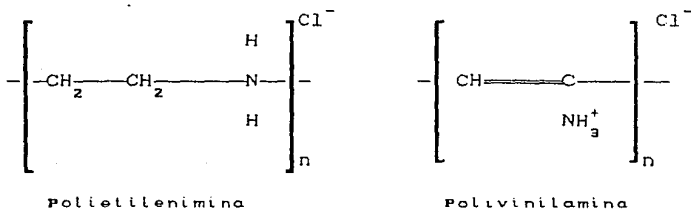


FIG 5.3 Polielectrolito catiónico

La sal metálica actúa sobre los coloides del agua por medio del catión, que neutraliza las cargas negativas antes de precipitar. Al polielectrolito catiónico se le llama así porque lleva cargas positivas que neutralizan directamente los coloides negativos. Los polielectrolitos catiónicos se emplean generalmente junto con una sal metálica, en cuyo caso permiten una importante reducción de la dosis de dicha sal que habría sido preciso utilizar. Incluso puede llegarse a suprimir completamente la sal metálica con la ventaja de reducir considerablemente el volumen de lodos producido.

5.2.1.4 Sulfato de aluminio. El sulfato de aluminio está constituido por la sal de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH varía entre 2 y 3.8 según la

relación molar sulfato/alúmina. Esta acidez se debe tener en cuenta al proceder a su almacenamiento, preparación y distribución. Para las sales de aluminio, el mínimo de iones  $Al^{3+}$  permanece en solución a un pH comprendido entre 6 y 7.4; fuera de este intervalo y según la mineralización de la muestra, existe el riesgo de solubilizar al floculante.

El sulfato de aluminio se usa para clarificación en una concentración que oscila entre 10 y 150  $g/m^3$  según la calidad del agua cruda. en tratamiento de aguas residuales la dosis es mucho más elevada y oscila ente 100 y 300  $g/m^3$ .

Su aplicación es en forma sólida o en solución. La forma sólida se presenta en placas compactas, en forma granulada de diversos tamaños, o en polvo, cuya fórmula teórica es  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ . Este producto se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada como  $Al_2O_3$ , es decir, un 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de 1000  $kg/m^3$ . Igualmente, la solución se define por el contenido en alúmina y ésta concentración se sitúa entre 8 y 8.5% es decir del 48 al 49% en equivalente polvo, o también 630 a 650 g de  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  por litro de solución acuosa.

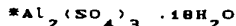
5.2.2 Metodología de los ensayos. Se realizaron un total de 40 pruebas de jarras para obtener la dosis óptima de coagulante y el polielectrolito adecuado.

En la TABLA 5.1 se muestran las condiciones estudiadas y en el ANEXO C se presenta un resumen de las gráficas desarrolladas.

TABLA 5.1 Condiciones experimentales empleadas para la determinación de la dosis óptima de coagulante y de polielectrolito

NUMERO DE DOSIS PROBADAS	TURBIDEADES UTN	COAGULANTE*		POLIELECTROLITO			
		Cmax	Cmin	NO IONICO		CATIONICO	
				Cmax	Cmin	Cmax	Cmin
5	150	80	0	35	0	12	0
5	100	80	0	30	0	4	0.4
5	50	90	0	25	0	4	2.4
5	20	90	0	25	0	4	2.4

Concentracion en mg/l.





La metodología empleada fue la tradicional para las pruebas de jarras sólo que la turbiedad final se midió tanto para el sobrenadante como para el sobrenadante filtrado en papel Whatman No. 40.

### 5.2.3 Resultados.

#### 5.2.3.1 Dosis de coagulante.

##### *Turbiedad de 150 UTN*

De acuerdo con la gráfica C.1 del anexo C parecería que el incremento en la dosis de coagulante no tienen ningún efecto sobre la calidad del sobrenadante filtrado; no así para el sobrenadante sin filtrar ya que se nota una tendencia a disminuir la turbiedad residual al aumentar la adición de coagulante. Sin embargo, las turbiedades finales son en todos los casos muy bajas y van de 1.9 a 0.4 UTN.

##### *Turbiedad de 100 UTN*

El comportamiento, presentado en la FIG C.2 del anexo C es muy similar al caso anterior.

##### *Turbiedad de 50 UTN*

Para esta turbiedad inicial se tuvo una mayor dispersión en los datos (FIG C.3) y debe notarse que las turbiedades finales son ligeramente mayores a las de los casos anteriores.

##### *Turbiedad de 20 UTN*

Para estos experimentos se encontró que el mínimo de la turbiedad final (0.4 UTN) se obtiene una dosis de 50 mg/l tanto para la muestra sin filtrar como para la filtrada. La turbiedad máxima obtenida fue de 1.3 para 20 mg/l y de 0.45 sin la adición de sulfato de aluminio.

En todos los casos se debe tener en cuenta que el rendimiento obtenido es muy bueno incluso sin la adición de coagulante, ello se debe a la naturaleza de los sólidos suspendidos empleados, que provienen de un agua parcialmente tratada. A partir de los resultados y basándose en las recomendaciones de la SARH se seleccionaron la dosis de 20 mg/l para las turbiedades influente

mayores de 50 UTN y de 10 mg/l para las turbiedades menores a este valor. Lo anterior permite tener los rendimientos presentados en la TABLA 5.2. Asimismo, en la Tabla se presentan los máximos rendimientos obtenidos al emplear la dosis óptima pero sólo en aquellos casos en los cuales se pudo definir con precisión.

TABLA 5.2 Rendimientos obtenidos en el sobrenadante filtrado con una dosis de 20 mg/l de sulfato de aluminio para las turbiedades superiores a 50 UTN y de 10 mg/l para las turbiedades inferiores a este valor.

UTN inicial	UTN final	Rendimiento %	Dosis óptima mg/l	Rendimiento %	máximo
150	0.7	99.5	----	----	
100	0.9	99.1	----	----	
50	0.9	98.2	50	99.4	
20	1.2	94.0	50	98.0	

### 5.2.3.2 Polielectrolito.

#### *Polielectrolito catiónico*

El comportamiento de las muestras a las diferentes turbiedades (150, 100, 50 y 20 UTN) fue diferente en cada caso. Para la turbiedad de 150 UTN se encontró un óptimo bien definido, tanto para el sobrenadante sin filtrar como el filtrado que se sitúa alrededor de 5 mg/l y que logra disminuir la turbiedad de 0.7 (sin añadir polielectrolito) a 0.4 (FIG C.6 y C.7). Para la turbiedad de 100 UTN no se tuvo un comportamiento bien definido y al parecer el aumento en la dosis no tiene ningún efecto. Sin embargo, su adición disminuye la turbiedad residual de 0.9 a 0.55 UTN.

Para las turbiedades de 50 y 20 UTN el comportamiento es similar y se tiene que los mejores efectos se presentan para una dosis cercana a 2.4 en el primer caso y entre 2.4 y 3.2 para el segundo. La turbiedad residual disminuye respectivamente a 0.45 y 0.35 UTN (FIG C.9 y C.10).

#### *Polielectrolito aniónico*

Debido a que la carga eléctrica de este ayudante de filtración es negativa no se emplea para el tratamiento de agua (potabilización o descontaminación) y por ello no se consideró en este estudio.

#### *Polielectrolito no iónico*

Nuevamente el comportamiento en cada caso es diferente. Para la turbiedad de 150 UTN el aumento en la dosis de polielectrolito no tiene ningún efecto y la turbiedad residual en la muestra filtrada se mantiene en un valor de 0.35 UTN. Para la turbiedades de 100 y 50 UTN se encuentra un óptimo localizado entre 15 y 20 mg/l. En el primer caso la diferencia entre el máximo valor encontrado para la dosis más baja es de 0.37 contra 0.25, y en el segundo, se pasa de una turbiedad final de 0.7 a la de 0.2, diferencias que se juzgan poco significativas como para justificar la triplicación de la dosis. Para el último caso, turbiedad de 20 UTN, el incremento en la dosis de polielectrolito prácticamente no tuvo ningún efecto.

Finalmente, se seleccionó el polielectrolito no iónico debido a que presentó una mayor estabilidad y reproductibilidad en los resultados. El nombre comercial del reactivo es Polielectrokem 2000, F 162 Marca Alkem.

### 5.3 Relación Turbiedad - Contenido de sólidos en peso.

Con el fin de determinar la relación entre las turbiedades seleccionadas para la operación y el contenido de sólidos en peso se realizó una serie de ensayos (202) que se presentan en el ANEXO D. La TABLA 5.3 resume el promedio de los datos que se emplearon para calcular la ecuación lineal que los representa y en la FIG 5.4 se muestra la gráfica correspondiente.

TABLA 5.3 Promedio de los datos empleados para el ajuste lineal

No.	UTN	SS mg/l
1	1.2	3.5
2	5.0	29.4
3	10.0	41.3
4	15.0	52.9
5	20.0	60.7
6	25.0	73.9
7	30.0	106.7
8	40.0	131.3
9	50.0	144.0
10	100.0	232.1
11	150.0	354.3

La ecuación obtenida es

$$SS = 2.24 \text{ UTN} + 20.97 \quad (6.1)$$

$$r = 0.99.$$

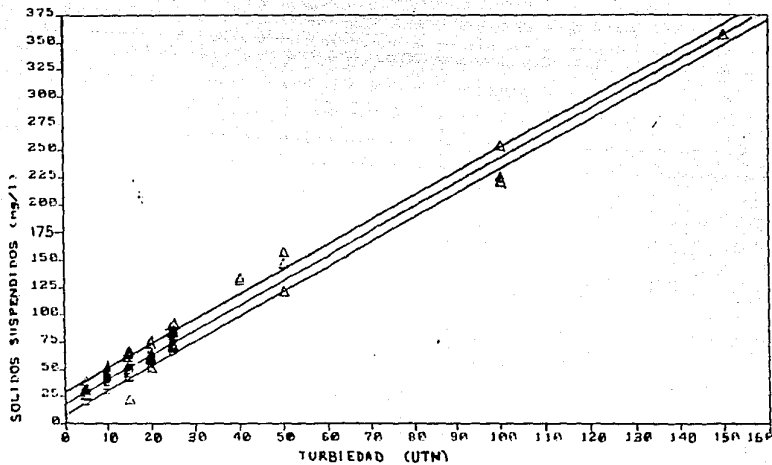


Fig 5.4. Relación entre la concentración con SS y la turbiedad

## 6. EXPERIMENTACION EN LOS FILTROS

### 6.1 Operación de los filtros.

#### 6.1.1 Preparación del influente.

En primer lugar se procede a la preparación de los reactivos que intervienen: el sulfato de aluminio y el polielectrolito electrokem 2000. Las soluciones empleadas tienen una concentración de 35 o 17.5 mg/l y de 4 ml/l, respectivamente. Posteriormente, se determina la turbiedad de licor mezclado del tanque de aeración del sistema de lodos activados y la del sedimentador secundario. Se calcula en que proporción deben ser mezclados para obtener la turbiedad con la cual se desea operar, considerando que la acción de mezclado de las bombas aumenta en 10 a 20 UTN la turbiedad teórica debido a la desagregación de los flóculos. Mediante la tubería de recirculación se homogeneiza el influente, manteniendo antes de cada corrida un tiempo mínimo de mezclado completo de 15 min.

#### 6.1.2 Operación de los filtros.

Al inicio del ciclo de filtración se verifica que las válvulas del agua de lavado y del aire estén cerradas. Se pone a funcionar la bomba dosificadora y se abre la válvula de entrada al filtro. Se cierra paulatinamente la válvula de recirculación hasta obtener la tasa de filtración deseada, medida ésta a la salida del filtro. Con la finalidad de agilizar esta operación, previamente se efectuó un estudio para establecer la apertura de la válvula de la línea de alimentación en función del gasto deseado. Por lo que la obtención del gasto para la corrida correspondiente nunca tomó más de 3 minutos en realizarse.

Una vez ajustado el gasto deseado se define el inicio de la corrida (tiempo cero). Se efectúa, entonces, un muestreo de la turbiedad a lo largo del filtro y se toman los datos de caída de presión. Se continua el ensayo tomando las muestras.

Al término del ensayo se cierra la válvula influente y se abre la de descarga de fondo. El aire se introduce a una presión de 4 kg/cm<sup>2</sup> por la parte inferior. Este aire tiene dos propósitos: limpiar y romper la resistencia del lecho para ayudar a su lavado. Debido al espesor del lecho y a su ensuciamiento en la parte inferior el lavado siempre fue una operación muy difícil. Al final del lavado se verificaba que se hubiese regresado la pérdida de carga inicial (filtro limpio) para comprobar si la limpieza del filtro había sido correctamente efectuada.

## 6.2 Parámetros para el seguimiento de la filtración.

Los parámetros seleccionados para el seguimiento de la corrida de filtración fueron la turbiedad y la caída de presión. Adicionalmente, se midieron el pH y el contenido de coliformes en el influente y el efluente.

## 6.3 Ensayos.

### 6.3.1 Condiciones de operación.

En la TABLA 6.1 se presenta las condiciones estudiadas. Se señala que en todas se operó con la adición de sulfato de aluminio (10 o 20 mg/l) y de polielectrolito (1 mg/l) y que se realizaron tanto para la arena de 0.9 como la de 1.19 mm.

TABLA 6.1 EXPERIMENTOS REALIZADOS

No. de ensayo	Tasa de filtración		Turbiedad UTN
	m/h	m/min	
1	6	0.10	150
2	6	0.10	100
3	6	0.10	50*
4	6	0.10	20
5	9	0.15	150
6	9	0.15	100
7	9	0.15	50
8	9	0.15	20
9	12	0.20	150
10	12	0.20	100
11	12	0.20	50*
12	12	0.20	20

\* dos veces

## 6.3.2 Resultados.

En las TABLAS 6.2 y 6.3 se presenta un resumen de los resultados y la totalidad se encuentra en el ANEXO E. Se realizaron 24 ensayos (doce para la arena de 0.9 y doce para la de 1.19 mm), sin considerar aquellos que fueron efectuados por duplicado.

TABLA 6.2 Resumen de los resultados.

\*Arena de TE = 0.90 mm (SISTEMA A)

Ensayo No.	Vr		UTN		Rendimiento filtración, %			Duración h
	m/h	m/min	influyente		s	x		
			t	x		s	x	
1	6	0.10	20	19.0	2	93.5	0.8	8.4
2	9	0.15	20	23.0	6	92.2	2.6	7.6
3*	12	0.20	20	21.6	4	92.9	1.5	4.5
4	6	0.10	50	51.8	8	97.3	0.8	4.0
5	9	0.15	50	46.2	11	97.8	0.4	3.6
6	12	0.20	50	68.4	7	98.2	0.4	3.5
7	6	0.10	100	102.0	33	98.7	0.6	1.5
8	9	0.15	100	96.7	38	98.0	1.0	1.5
9	12	0.20	100	105.0	24	98.5	1.3	2.0
10	6	0.10	150	147.5	21	92.8	12.0	2.1
11	9	0.15	150	148.0	15	98.6	0.5	2.5
12	12	0.20	150	120.0	0	96.7	1.5	1.3

\*promedio

TABLA 6.3 Resumen de los resultados.  
 Arena de TE = 1.19 mm (SISTEMA B)

Ensayo No.	Vf		UTN			Rendimiento filtración, %		Duración h
	m/h	m/min	influyente			$\bar{x}$	s	
			t	x	s			
1	6	0.10	20	19.3	3	93.2	1.7	10.1
2	9	0.15	20	20.4	5	92.8	1.5	8.3
3*	12	0.20	20	21.5	6	95.9	1.7	6.3
4	6	0.10	50	53.8	10	97.2	0.8	6.0
5	9	0.15	50	51.4	6	96.8	1.1	6.2
6	12	0.20	50	50.2	41	97.6	0.4	3.2
7	6	0.10	100	103.0	32	98.0	0.0	1.5
8	9	0.15	100	96.0	14	98.5	0.7	2.1
9	12	0.20	100	100.0	29	97.8	1.0	2.3
10	6	0.10	150	147.0	25	97.7	0.6	3.1
11	9	0.15	150	153.0	13	97.7	0.6	2.2
12	12	0.20	150	133.0	11	97.0	1.0	1.0

\* promedio

En el anexo G se encuentran las gráficas correspondientes a los dos tamaños de arena.

#### 6.4 Remoción de coliformes

En la tabla 6.4 se presentan los resultados sobre la eliminación de coliformes en los filtros. Dada la corta duración de las corridas se realizaron como máximo cuatro análisis por ensayo.

#### 6.5 Lavado

En varias ocasiones se intentó seguir las metodologías de lavado recomendadas por la literatura pero esto no fue posible y hubo que diseñar una metodología específica.

El filtro se comportaba como una masa compacta que tendía a subir en bloque, teniendo el riesgo constante de la pérdida de medio por el efluente. Durante el estudio se emplearon diversas técnicas para romper la masa de medio filtrante. La que aportó mejores resultados fue la introducción de un tubo por la parte superior para agitar el medio. Una vez que se lograba disgregar la arena se introducía agua a razón de 40 m/h y aire a 25 m/h durante 10 min. Estas velocidades corresponden al máximo posible para no sacar el medio por el efluente.

En las TABLAS 6.5 y 6.6 se presentan los resultados referentes al consumo de agua por los filtros para el lavado.



TABLA 6.4 RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE COLIFORMES.

FECHA	CORRIDA	T.E.ARENA		VELOCIDAD	TURBIEDAD	MMP/100 ml	INF.	EFL.	%REM	OBS.
		0.9	1.2	m/h	UTM	x10-6				
28/x	x			12	90	4.9	x	-	-	-
28/x	x			12	3	0.33		x	93.3	-
3/xi	x	x		6	48	0.79	x	-	-	-
3/xi	x			6	1.8	0.21		x	73.4	-
3/xi		x		9	2.0	0.33		x	58.2	-
3/xi			x	6	2.0	0.33		x	58.2	-
7/xi	x			9	50	0.33	x	-	-	-
7/xi	x			9	1.2	0.08		x	75.8	-
8/xi	x			6	48	1.10	x	-	-	-
8/xi	x			6	1.6	0.20		x	81.8	-

TABLA 6.5 Resultados del consumo de agua por los filtros para el lavado. Arena de TE de 0.9 mm.

No.	UTN:	Vf m/h	duración h	Agua producida m <sup>3</sup>	% agua de lavado	% total
1	150	6	2.08	0.227	52.9	52.9
2	150	9	2.50	0.410	29.3	29.3
3	150	12	1.25	0.273	44.0	44.0
4	100	6	1.50	0.164	73.4	73.4
5	100	9	1.42	0.233	51.6	51.6
6	100	12	1.15	0.273	44.0	44.0
7	50	6	4.00	0.436	27.5	27.5
8	50	9	3.60	0.590	20.4	20.4
9	50	12	3.16	0.690	17.4	17.4
10	20	6	8.42	0.918	13.1	13.1
11	20	9	7.63	1.250	9.6	9.6
12	20	12	4.47	0.976	12.3	12.3
13	20	12	4.46	0.974	12.3	12.3

TABLA 6.6 Resultados del consumo de agua por los filtros para el lavado. Arena de TE de 1.19 mm.

No.	UTN <sub>i</sub>	V <sub>f</sub> m/h	duración h	Agua producida m <sup>3</sup>	% agua de lavado	% total
1	150	6	3.08	0.336	35.7	35.7
2	150	9	2.10	0.344	34.9	34.9
3	150	12	1.00	0.218	54.9	54.9
4	100	6	1.50	0.164	73.4	73.4
5	100	9	2.10	0.344	34.9	34.0
6	100	12	1.60	0.349	34.3	34.3
7	50	6	6.00	0.654	18.3	18.3
8	50	9	6.17	1.011	11.9	11.9
9	50	12	3.50	0.764	15.7	15.7
10	20	6	10.08	1.099	10.9	10.9
11	20	9	8.33	1.354	8.8	8.8
12	20	12	6.37	1.391	8.6	8.6
13	20	12	6.13	1.339	9.0	9.0

## 7. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

7.1 Influencia de la turbiedad del influente sobre la duración de la corrida.

En la TABLA 7.1 se muestran los resultados sobre la duración de corrida en función de la turbiedad del influente. Como era de esperarse, las duraciones mayores se obtuvieron para turbiedades del influente de 20 UTN mientras que, las de menor duración fueron para turbiedades de 150 UTN, tanto para la arena de 0.9 como para la de 1.19 mm de tamaño efectivo. La condición que permitió una duración de corrida mayor (10.08 h) fue la de arena de 1.19 mm, 20 UTN y 6 m/h, para estas mismas condiciones pero con la arena de 0.9 mm se obtiene una duración de 8.42 h. Al aumentar 750% la turbiedad del influente (de 20 a 150 UTN), la duración de la corrida disminuye en 304 % para la arena de 0.9 mm y en 227 % para la de 1.19 mm (a 6 m/h de tasa de filtración), por ello se puede afirmar que el efecto es más notorio para la arena de menor tamaño.

De la misma TABLA 7.1 se infiere que, generalmente, se obtuvieron corridas de más larga duración con la arena de 1.19 mm, bajo las mismas condiciones de operación.

Debe señalarse que en algunos casos la diferencia entre la arena menor y la mayor fue negativa; pero, aunque el valor relativo de esta diferencia es grande, el valor absoluto es pequeño. Por ejemplo, para la turbiedad del influente de 100 UTN y 6 m/h existe una diferencia de 23.3%, pero que en realidad equivale a sólo 0.35 h (aproximadamente 20 min), que para fines prácticos no es significativo. Lo anterior sugiere que, en cuanto a duración de la corrida se refiere, la arena de tamaño efectivo de 1.19 mm es económicamente más rentable que la de 0.9 mm, sin importar la turbiedad bajo la cual se trabaje.

TABLA 7.1 Duración de la corrida en función de la turbiedad del influente, velocidad de filtración y tamaño de arena.

Turbiedad de influyente, UTN	DURACION DE LA CORRIDA, h											
	20			50			100			150		
Tamaño efectivo de arena, mm	0.9	1.19	% dif entre las arenas	0.9	1.19	% dif entre las arenas	0.9	1.19	%dif entre las arenas	0.9	1.19	%dif entre las arenas
Vf. m/h												
6	8.42	10.08	19.7	4.00	6.00	50.0	1.50	1.15	-23.3	2.08	3.08	48.1
9	7.63	8.33	9.2	3.60	6.17	71.4	1.42	2.1	47.9	2.5	2.16	-13.6
12	4.47	6.25	39.8	3.16	3.50	10.8	1.25	1.6	28.0	1.25	1.00	-20.0
% de diferencia entre la veloci- dad de 6 y 12 m/h	46.9	38.0		21.0	41.7		16.7	-39.1		39.9	67.5	

### 7.1.1 Influencia de la velocidad de filtración sobre la duración de la corrida.

En la TABLA 7.1 y las FIG 7.1 y 7.2 se observa la influencia de la velocidad de filtración sobre la duración de la corrida. A medida que aumenta la tasa de filtración, la duración disminuye. De tal modo que, para la arena de 0.9 mm e influente de 20 UTN, al duplicar la velocidad, la duración de la corrida disminuye en 46.9% (de 8.42 a 4.47 h) mientras que para 150 UTN ésta disminuye en 39.9%.

De una forma global, independientemente del tamaño de arena y de la turbidez del influente se establece que al aumentar al doble la velocidad de filtración la duración de la corrida disminuye en 38%.

### 7.1.2 Eficiencias de la filtración.

En la TABLA 7.2 se resumen las eficiencias de filtración promedio para las corridas. No existe diferencia significativa entre los dos tamaños de arena, las turbiedades del influente o la velocidad de filtración sobre la eficiencia de remoción de sólidos, cuyo promedio global fue de 96.8%. Esto indica que se puede seleccionar cualquier condición de operación y tamaño de arena (dentro de los intervalos estudiados) y esperar una buena eficiencia de remoción de sólidos, para el espesor de lecho empleado (1.8 m).

TABLA 7.2 Eficiencias de remoción de sólidos.

Turbiedad de influente, UTN	20		50		100		150	
	0.9	1.19	0.9	1.19	0.9	1.19	0.9	1.19
TE de arena, mm								
Vf. m/h			% de remoción					
6	93.5	93.2	97.2	97.2	98.6	98.2	98.8	97.6
9	92.2	92.8	97.6	96.8	98.4	98.5	98.5	97.8
12	92.9	95.9	97.5	98.2	98.5	98.8	96.4	96.9

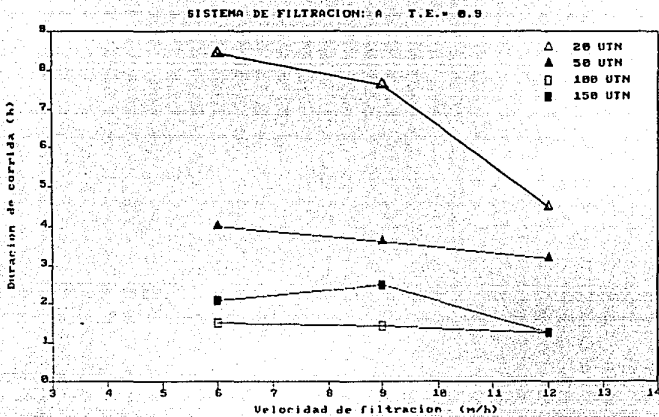


FIG. 7.1 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE FILTRACION SOBRE LA DURACION DE LA CORRIDA.

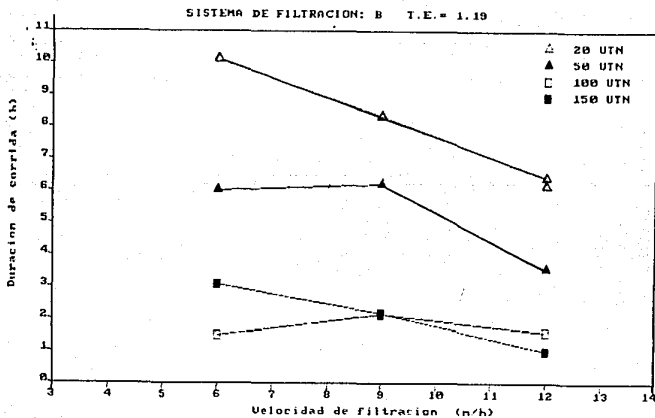


FIG. 7.2 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE FILTRACION SOBRE LA DURACION DE LA CORRIDA.

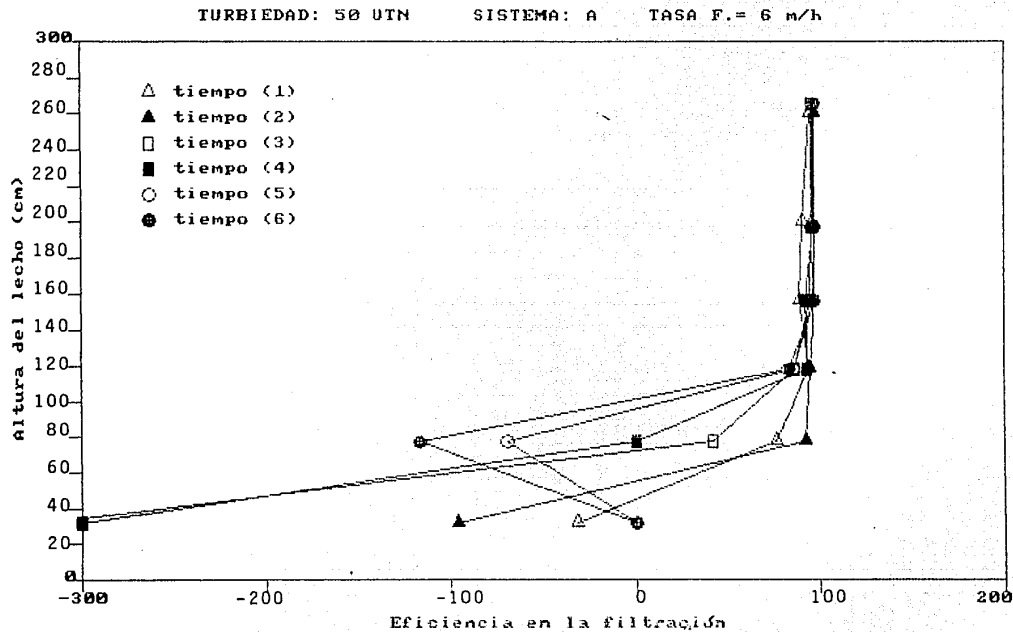


FIG. 7.3 EFICIENCIA EN FUNCION DEL ESPESOR DE LECHO



### 7.1.3 Altura necesaria de medio filtrante en función de la eficiencia de filtración.

En la TABLA 7.3 se presentan los resultados de la altura necesaria de medio filtrante para alcanzar una eficiencia de remoción de sólidos del 95%. Esta altura se calculó mediante gráficas similares a la de la FIG 7.3, y cuya totalidad se encuentran en el ANEXO H. En general, la altura necesaria es mayor al aumentar la velocidad de filtración y la turbiedad del influente. El espesor mínimo necesario de lecho (arena y grava) fue de 120 cm y el máximo de 260 cm., requiriéndose en la mayoría de los casos un espesor menor para la arena de 0.9 mm (152 cm en promedio) que para la de 1.19 mm (178 cm en promedio).

Un hecho importante fue que, en la mayoría de los casos a los 70 cm de altura, lugar en donde se encuentra la interfase entre la grava y la arena, se obtuvieron concentraciones de sólidos mucho mayores que la del influente.

TABLA 7.3 Altura de lecho necesaria para una eficiencia de remoción de sólidos de 95%.

Turbiedad de influyente, UTN	Altura de lecho, cm					
	50		100		150	
TE de arena, mm $V_f$ , m/h	0.9	1.19	0.9	1.19	0.9	1.19
6	140	150	130	140	120	260
9	160	140	120	150	140	240
12	180	205	160	120	215	200

### 7.1.4 Altura del lecho en función de la pérdida de carga.

Como se puede observar en las FIG 7.4 a 7.7, la altura a la cual ocurre la mayor pérdida de carga (y por lo tanto mayor retención de sólidos) es a 120 cm para todos los casos estudiados, sin

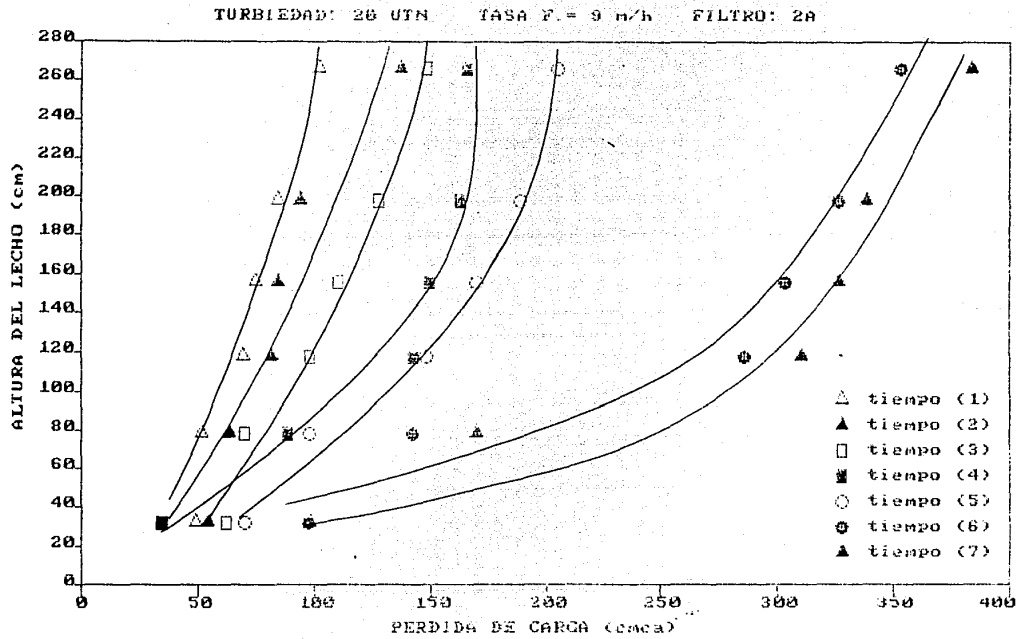


FIG. 7.4 ALTURA DEL LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA.

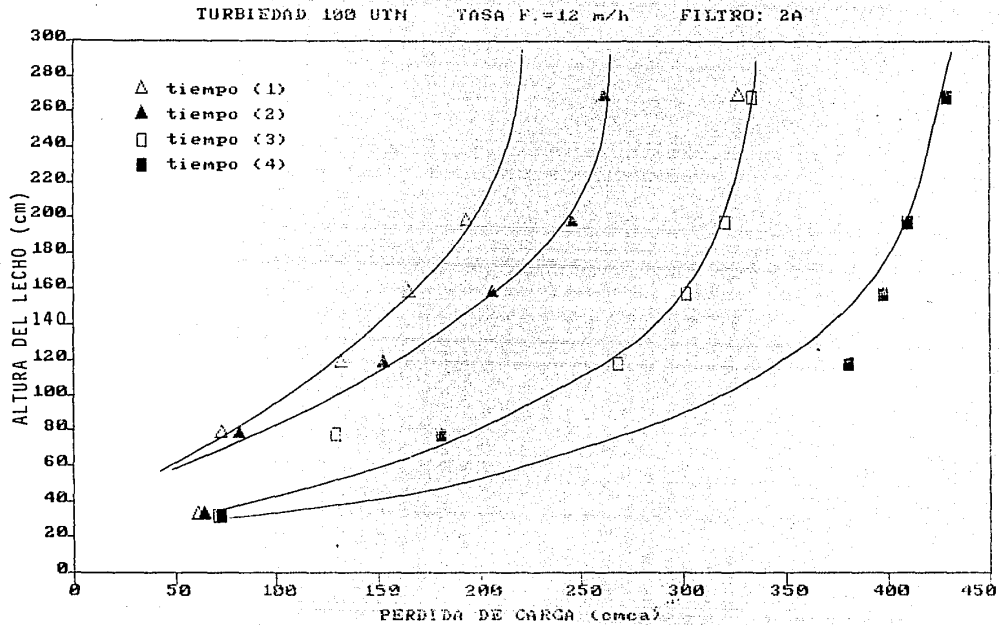


FIG. 7.5 ALTURA DEL LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA

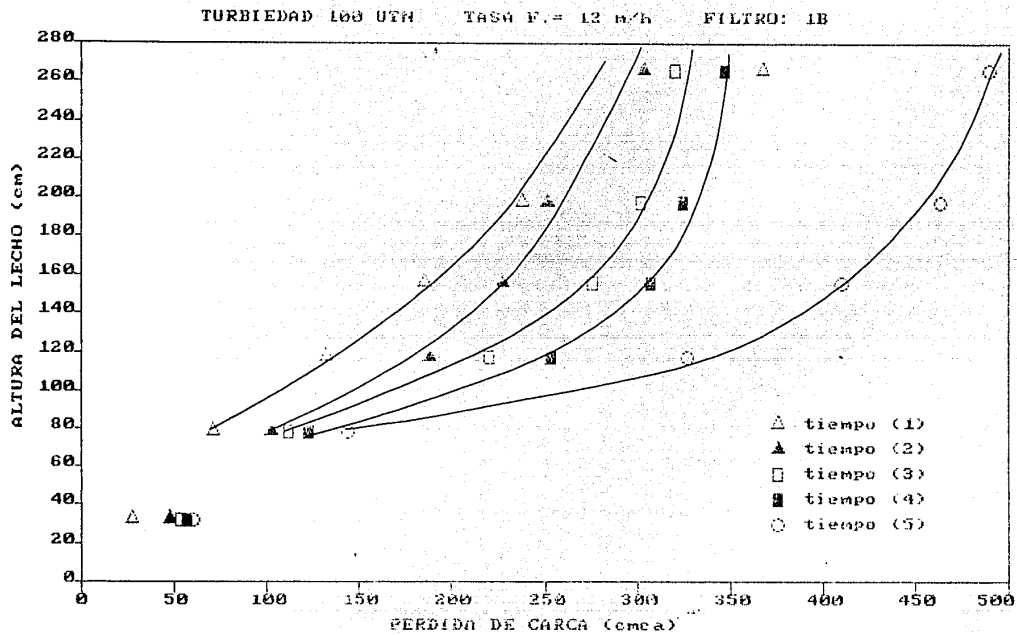


FIG. 7.6 ALTURA DEL LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA.

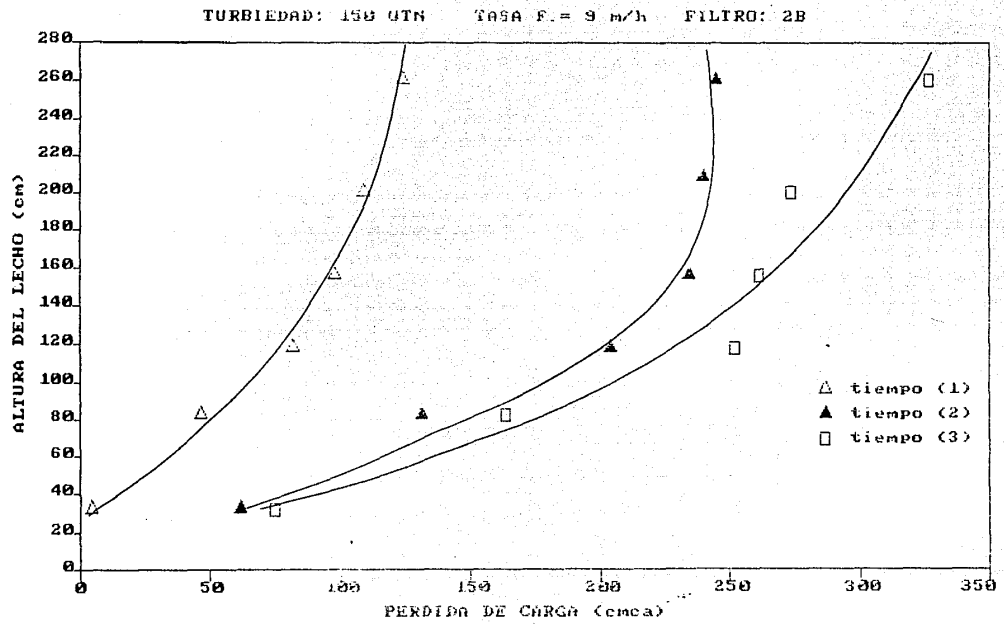


FIG. 7.7 ALTURA DE LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA.

49

TABLA 7.1 Duración de la corrida en función de la turbiedad del influente, velocidad de filtración y tamaño de arena.

Turbiedad de influyente, UTN	DURACION DE LA CORRIDA, h											
	20			50			100			150		
Tamaño efectivo de arena, mm	0.9	1.19	% dif entre las arenas	0.9	1.19	% dif entre las arenas	0.9	1.19	%dif entre las arenas	0.9	1.19	%dif entre las arenas
Vf. m/h												
6	8.42	10.08	19.7	4.00	6.00	50.0	1.50	1.15	-23.3	2.08	3.08	48.1
9	7.63	8.33	9.2	3.60	6.17	71.4	1.42	2.1	47.9	2.5	2.16	-13.6
12	4.47	6.25	39.8	3.16	3.50	10.8	1.25	1.6	28.0	1.25	1.00	-20.0
% de diferencia entre la veloci- dad de 6 y 12 m/h	46.9	38.0		21.0	41.7		16.7	-39.1		39.9	67.5	

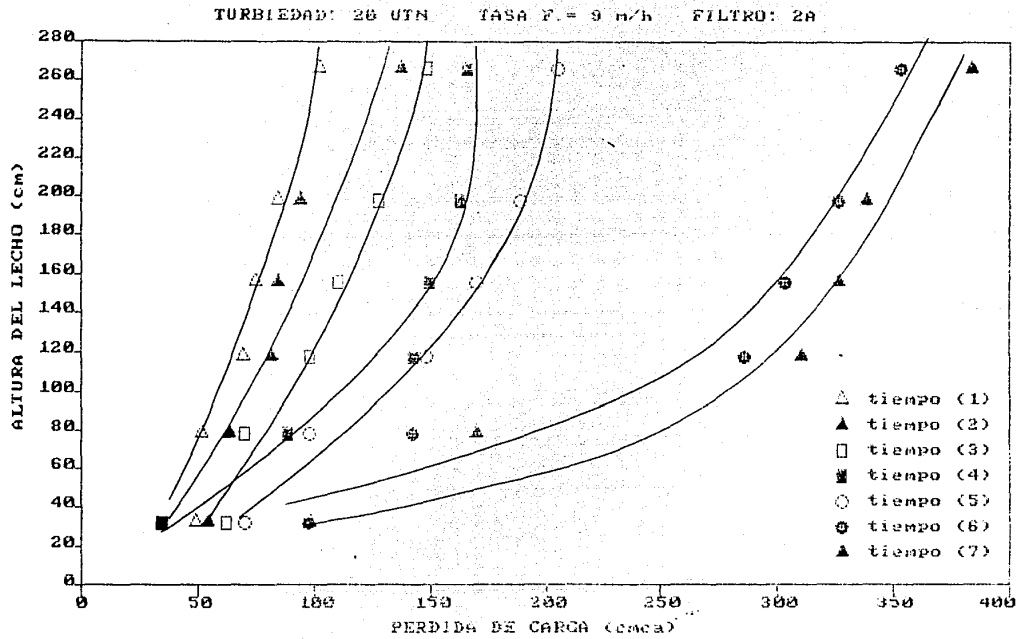


FIG. 7.4 ALTURA DEL LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA.

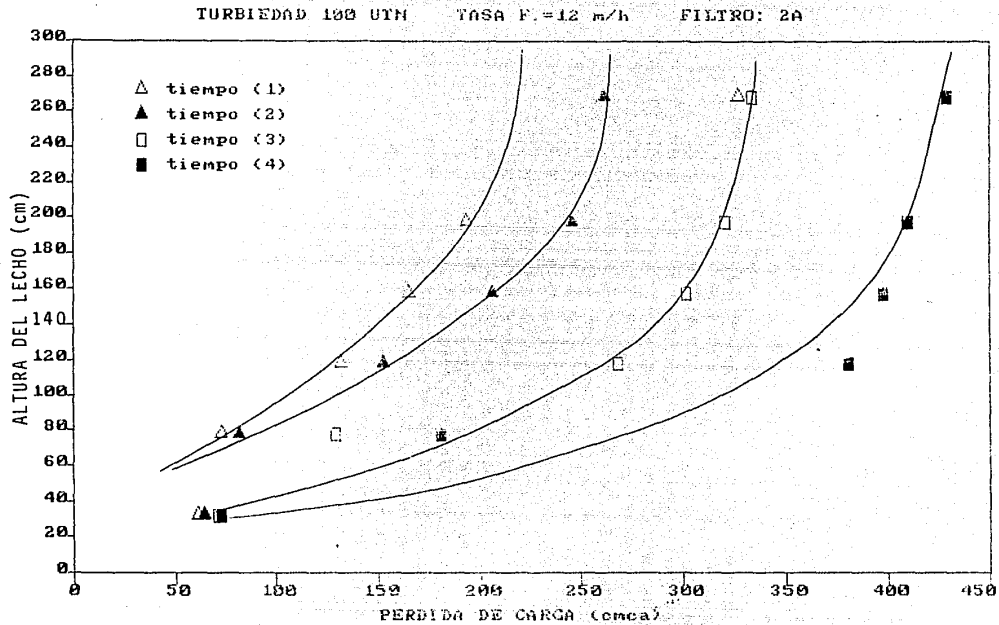


FIG. 7.5 ALTURA DEL LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA



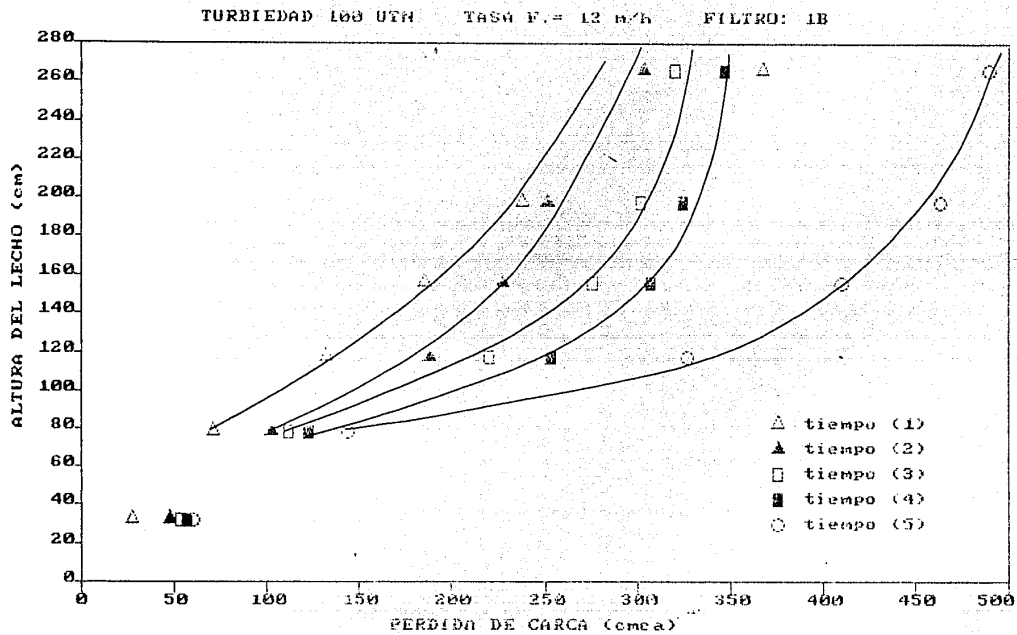


FIG. 7.6 ALTURA DEL LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA.

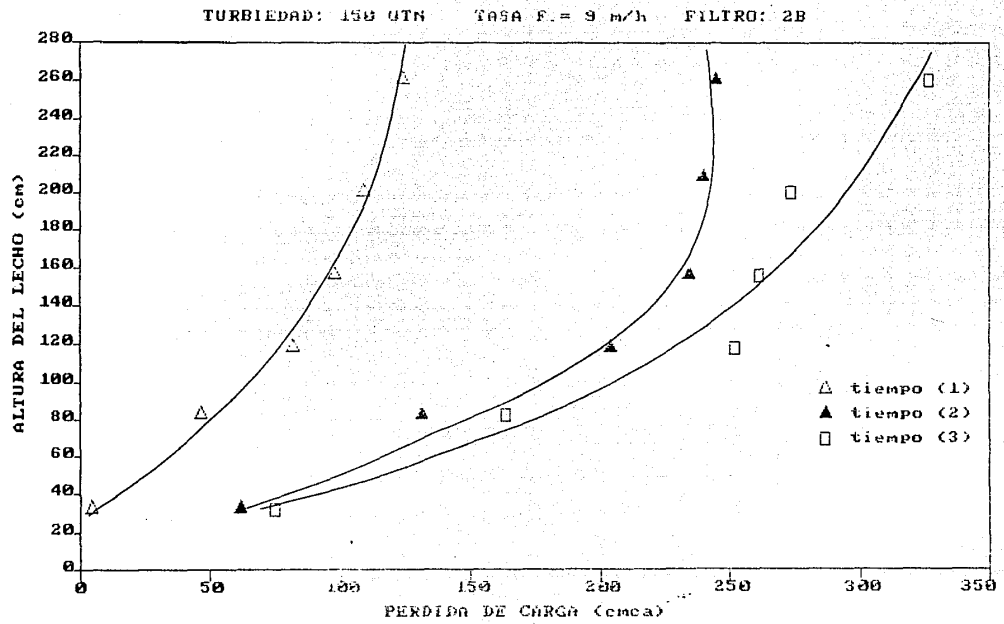


FIG. 7.7 ALTURA DE LECHO EN FUNCION DE LA PERDIDA DE CARGA.

importar turbiedad, velocidad de filtración o tamaño de arena. Esto concuerda con lo señalado en la sección 7.1.3, donde la altura necesaria resultó entre 120 y 260 cm. De esta forma, el espesor mínimo de lecho para que los filtros tengan una operación satisfactoria es de 120 cm (70 cm de grava y 50 cm de arena), pudiendo aumentarse hasta 180 cm para mejorar la calidad del efluente. El resto del lecho de arena del sistema sirvió únicamente como factor de seguridad (ANEXO I).

#### 7.1.5 Eficiencia.

En primer lugar, debido a las altas turbiedades del influente la duración de las corridas es corta (máximo 6.2 h). En cuanto a las características del medio se encontró que con la arena de mayor tamaño (1.19 mm), las duraciones de corrida en general son mayores manteniendo un rendimiento promedio comparable con el de la arena menor ( $97.5 \pm 1.6$  contra  $97.4 \pm 1.2$ ).

### 7.2 Comparación con criterios existentes

#### 7.2.1 Modelación.

En la actualidad no existe ningún modelo matemático que permita predecir cuando saldrán los sólidos por el efluente o cuando se alcanzará la pérdida de carga de operación por lo que se requiere recurrir a estudios piloto (Dawda, 1978). Más aún, no existe ningún modelo específico para la filtración ascendente por lo que se aplican los desarrollados para la filtración descendente (Iwasaki, Ives, Diaper, etc). Muchos investigadores han presentado relaciones matemáticas para describir el fenómeno de filtración, pero su aplicación requiere la obtención de un gran número de variables y de coeficientes experimentales.

El modelo de Hudson, aunque experimental, es más o menos exacto y sirve sobre todo para mostrar las variables que intervienen en el

proceso y para clasificar un tipo de agua. La ecuación en la cual se basa es la siguiente:

$$l = \frac{Q TE^3 (\Delta H)}{B} \quad (7.1)$$

donde,

$l$  : profundidad del frente de filtración, m

$Q$  : gasto en  $m^3/m^2 \cdot min$

$\Delta H$ : pérdida de carga debido al taponamiento del lecho, m

$TE$ : tamaño efectivo de los granos, mm

$B$  : factor que depende de la calidad del agua por filtrar y que se presenta en la TABLA 7.4

TABLA 7.4 Factor para la ecuación de Hudson

Calidad del agua decantada	B
Pobre	0.25
Mediocre	0.50
Buena	1.00
Excelente	2.00

Entre las ecuaciones que predicen la duración de corrida se tiene la siguiente

$$t = D (\Delta H)_{max}^{\frac{3}{5}} \frac{TE^{\frac{3}{2}}}{Q} \quad (7.2)$$

- donde,

$t$ : duración de corrida, h

$D$ : coeficiente que depende de la calidad del agua

Para potabilización, en el caso de emplear un agua de buena calidad la duración de la corrida sería entre 36 a 48 h, para una agua pobre el intervalo es de 8 a 12 h. Para agua residual se han señalado duraciones del orden de 8 a 30 h (Dahab, 1977).

### 7.3 Estudios similares

Existen pocos estudios sobre filtración ascendente, turbiedad variable (15 a 185 UTN, 50 a 380 mg/l) y medios de diferente tamaño.

Para la duración Haney y Steimle obtuvieron corridas de 3.5 a 34.5 h con una tasa de 15 m/h y turbiedades de 10 a 280 JTU en una planta potabilizadora, condiciones similares a las encontradas. En cuanto el lavado en Rusia con el agua del Volga y turbiedades de 120 a 150 mg/l y tasas de 6 m/h el consumo de agua por este proceso fue tan elevado que la rentabilidad del proceso se vió comprometida. En este estudio el consumo de agua promedio fue de 8.6 hasta 73.4 %, para los cuatro filtros. Se tuvo de 9.6 a 73.4 % para el TE de 0.9 con un promedio de 34.3 % y de 8.6 a 73.4 % para el TE de 1.19 con un promedio de 26.9 %. Lo anterior excede en mucho al valor recomendado en la literatura de 3 %.

### 7.4 Lavado

A partir de la experiencia adquirida en este estudio y al analizar la literatura, se llegó a la conclusión que la fluidificación observada en los filtros ascendentes puede estar relacionada con lavados deficientes. Por ello, fue mejor realizar el estudio con un efluente terciario ya que de este modo se puede constatar más rápido los problemas de lavado.

Como se señaló en la recopilación de información varios autores señalan que los problemas de lavado con efluentes biológicos son comparables con los presentados en plantas potabilizadores que tienen cierto tiempo de operación. Esto último no se puede detectar en un estudio piloto porque generalmente son de corta duración.

### 7.5 Comparación con otros procesos

Las ventajas que se tienen en los filtros ascendentes sólo son igualadas por filtros descendentes multicapas, o bien, por filtros con medio uniforme (CU=1).

Los filtros multicapas se usan preferentemente por la escuela americana y son eficientes pero costosos. Al lavarlos se puede tener problemas de intermezclado de los medios. Los filtros por gravedad de medio múltiple se componen de una capa superior de granulometría grande colocada sobre diferentes capas de tamaño cada vez más pequeño. Para no modificar este arreglo durante el lavado, se requiere que los materiales empleados tengan densidades mayores conforme están colocados en las partes inferiores del filtro. Así, se tiene que para la primera capa se emplea (en orden descendente) antracita o ilmenita, para la segunda carbón activado y para la última arena sílica.

En la TABLA 7.5 se presentan algunas combinaciones para filtros multicapas.

TABLA 7.5 Composición de los filtros multicapas

Filtros de medio dual	Filtros de medio múltiple
antracita-arena	antracita-arena-granate
carbón activado-arena	carbón activado-antracita-arena
resina-arena	esferas de resina-antracita-arena
resina-antracita	carbón activado-arena-granate

Con el fin de evitar al máximo el mezclado en la interfase de las capas se debe seleccionar los tamaños de manera que la expansión y la velocidad de caída de los granos sean prácticamente iguales para las diferentes capas. Considerando las leyes de la sedimentación se requiere por ejemplo, para un lecho de bicapas que

$$\frac{d_1}{d_2} = \left| \frac{\rho_2 - \rho}{\rho_1 - \rho} \right|^{0.02} \quad (7.3)$$

donde

$d_1$ : tamaño correspondiente al 60 % de la curva granulométrica del medio colocado en la parte superior.

$\rho_1$ : densidad del medio colocado en la parte superior.

$\rho_2$ : densidad del medio colocado en la parte inferior.

$d_2$ : tamaño efectivo del medio inferior.

$\rho$ : densidad del líquido

La ecuación 7.3 supone que los granos tienen la misma esfericidad.

El lavado de un lecho de medios múltiples es más delicado debido a la baja densidad del material de la capa superior por lo que se emplean porcentajes de expansión pequeños con un máximo del 25%.

En la práctica una cierta mezcla entre las capas es inevitable por lo que estas zonas se taponean cada vez más rápido. Los cuidados que deben tenerse con estos filtros conducen a pensar que es más favorable el empleo de lechos con un sólo medio.

Para determinar los espesores relativos de las capas se emplea la relación siguiente

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{d_{50(1)}}{d_{50(2)}} \quad (7.4)$$

Es decir, que cada capa tiene un espesor proporcional al tamaño de sus granos. La altura total del lecho es generalmente menor que la de un lecho homogéneo de granos grandes y se sitúa entre 0.6 y 0.9 m.

En cuanto a filtros uniformes existen dos posibilidades, o bien, cribar un medio natural hasta el valor deseado, o, utilizar un medio sintético. Ambas opciones son muy caras. Se tiene noticia de muy pocos medios sintéticos, entre ellos se encuentra uno cuya patente está en trámite (Capdeville, 1988).



## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### *Ventajas*

Es indudable que con la filtración ascendente se tiene una mejor repartición de sólidos y de la pérdida de carga a lo largo del lecho. Además, este tipo de filtración permite tener buenos rendimientos (96.8 promedio global).

### *Inconvenientes.*

Existe una gran dificultad para encontrar en el mercado arena de gran tamaño y bajo coeficiente de uniformidad por lo que el medio filtrante resulta muy caro. Esta desventaja es aplicable a cualquier filtro, independientemente del sentido del flujo.

En muchos casos se señala que existe expansión de la arena durante la filtración. Esto ha generado una serie de adaptaciones para retener el medio que en realidad complican el diseño de un filtro.

El volumen total de agua empleado para el lavado siempre es mayor que el de un filtro descendente.

Algunos autores (como Naylor y Truesdal) han detectado en filtros ascendentes el taponamiento de la entrada en especial de las rejillas y de los falsos fondos.

### *Operación y diseño*

Para la selección de un proceso de este tipo es necesario sopesar la ventaja de tener una reducción en el consumo de los reactivos contra el inconveniente de elevar el requerimiento de agua para el lavado (8.6 % hasta 73.4 % de consumo para ambos TE).

Se debe emplear un coagulante no iónico o catiónico debido a la carga de los flóculos presentes en el agua por tratar, tanto en

potabilización como en tratamiento de agua residual.

Para el tipo de influente empleado y las turbiedades manejadas (20 a 150 UTN ó 50 a 380 mg/l ) las duraciones de corrida son cortas, (1 a 10 h).

### *Lavado*

Con base en este estudio (y con la experiencia adquirida en otros) se pudo constatar que el lavado de un filtro ascendente es mucho más complicado que el del descendente, ya que resulta muy difícil desalojar los sólidos retenidos en la parte inferior del filtro. Es muy laborioso controlar el lavado debido, por una parte, al espesor tan grande del lecho (de 1.80 a 2.0 m) y, por otra, al mayor tamaño de arena que no permite fácilmente su fluidificación.

Se recomienda no lavar sólo con agua sino emplear uno de los métodos con agua y aire. Autores, como Diaper encontraron que es necesario introducir aire a presión antes del lavado de un filtro ascendente.

La metodología de lavado empleada en el presente estudio fue la siguiente:

1. Disgregación del medio por medio de la introducción de un tubo dentro del filtro;
2. Introducción de agua y aire simultáneos a razón de 40 y 25 m/h, respectivamente, durante 10 min.

Este tipo de lavado permitió limpiar satisfactoriamente los filtros pero tiene los inconvenientes de consumir aproximadamente el 60 % del agua producida y requerir mano de obra.

Por último, se señala que:

- Lenchevskas y Mintz recomiendan no filtrar a una velocidad superior a 6 m/h con turbiedades elevadas (> a 150 mg/l).

- Diaper e Ives hicieron un estudio comparativo entre la filtración ascendente y la descendente en el que encontraron una mayor duración de corrida en el filtro ascendente pero tuvieron que colocar un disco perforado en la parte superior para evitar la expansión y salida de la arena.

- En Europa la tendencia ha sido por evitar la fluidificación y para ello realizan lavados descendentes en un inicio, o bien, el empleo de dispositivos para retener el medio.

Así, se tiene que la filtración ascendente es un sistema que a pesar de sus indudables ventajas, posee varias limitaciones, sobre todo en el ámbito de la operación debido a la dificultad de la limpieza del lechó. Aún, empleando una gran cantidad de agua para el lavado, con el tiempo, el medio retiene sólidos que hacen que el lecho tienda a fluidificarse durante la filtración.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adin A., Bauman E. y Cleasby J. (1979) "The application of filtration theory to pilot-plant design" Jour. AWWA, Vol 71 pp 17-27
- Barceló J. (1982) "Diccionario terminológico de química". Ed. Alhambra
- Buitrón G. y Jiménez B. (1988) "Manual de Operación de filtros de arena". Proyecto 7305. Contrato CC-86-323 D, elaborado para la SARH por el Instituto de Ingeniería.
- CEPIS (1973) " Teoría Diseño y Control de los procesos de clarificación del agua".
- Degrémont (1979) "Manual técnico del agua". Ed. Artes gráficas Grijelmo.
- Diaper E. e Ives K. (1965) "Filtration through size-graded media" Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE. SA3 pp 89-114
- DiBernardo L. y Teixeira J. (1986). " Influência das características da cama suporte e da areia no proceso de filtração direta ascendente". Artículo presentado para su aceptación en el XX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en Guatemala.
- Fair Geyer J. y Okun D. (1979) "Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales" Ed. Limusa.
- Habibian M. y O'Melia R. (1965) "Particles, polymers and performance in filtration". Journal of the Environmental Engineering Division. EE4, pp 567-573
- Hamann C. y McKinney R. (1967) "Upflow Filtration Process". Journal AWWA. Vol 60. No. 9, pp 1023-1039
- Hammer M. (1986) "Water and Wastewater Technology" SI version, segunda edición. Ed. Wiley
- Haney B. y Steimle S. (1974) "Potable-Water Supply by means of a Upflow Filtration (L'Eau Claire Process)". Journal AWWA, Vol 62, No. 2, pp 117-123
- Hill F. (1962) "Communications on some Aspects of Upflow Filtration". J. Institute Water Engineering, Vol 16 pp 336.
- Hudson H. (1963) "Functional Design of rapid Sand Filters" Journal of the Sanitary Engineering Division. ASCE, Vol 89. No 1, pp 17-28

Ives K. y Sholji I. (1965) "Research on variables affecting filtration" Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE Vol 91, No. 4 pp 1-19.

Juarez E. y Badillo A. (1977) "Mecánica de suelos". Ed. Limusa

Jung H. y Savage E. (1974) "Deep Bed Filtration" Journal AWWA, Vol 66, No. 2, pp 73-78

Miró F. y de Lora (19 ) "Técnicas de Defensa del Medio Ambiente" Ed. Labor

Matsumoto, Tchobanoglous y Ross (1982) "Filtration of Primary effluent". JWPCF vol.54, No.12 pp 1581-1591

Mejía E., Pacheco H. y Sánchez R.(1986) "Filtración de agua con flujo ascendente". Memorias del V Congreso de la SMISAC, Puebla, Pue pp 177-182.

Metcalf & Eddy Inc., (1979) "Wastewater Treatment, Disposal, Reuse". Ed. McGraw-Hill

Mintz (1960) "Some Results of Research into Drinking-Water Purification and Desinfection". Who Regional Office for Europe.

Mintz (1964) "Theoretical principles of Water Purification". Building and Construction publication.

Naylor A., Evans S. y Dunscombe K. (1967) "Recent developments on the rapid sand filters at Luton". Water Pollution Control Vol 66 pp 309.

Nalco (1979) "Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones". Ed. Mc-Graw Hill.

Oeben R., Haines H. y Ives K. (1967) "Comparison on normal and Reverse grades filtration". Journal AWWA pp 429-439

Smit W. (1963) "Upflow filter". Journal AWWA Vol 55 pp 804.

Truesdale G. y Birkbeck A. (1967) "Tertiary Treatment Processes for Sewage Works Effluent" Water Pollution Control Vol 66 pp 371.

**ANEXO A. Medición de la turbiedad.**

## ANEXO A. MEDICION DE LA TURBIEDAD

La materia sólida aparece en la mayor parte de las aguas en forma de sólidos suspendidos y materia coloidal. La concentración de los sólidos en suspensión se determina mediante filtrado, secado y pesado de los sólidos retenidos en una membrana de filtración. Aquellos sólidos en suspensión que son grandes y pesados se llaman sólidos sedimentables, y pueden determinarse volumétricamente en un cono de sedimentación (cono Imhoff). Los sólidos que quedan en el agua sobrenadante son muy finos y causan la turbiedad.

Cuando la turbiedad de un agua excede de 5 unidades no se considera potable. Un agua clara de un lago tiene en promedio una turbiedad de 25 UTN en tanto que un agua lodosa fácilmente excede de 100 unidades de turbiedad.

La turbiedad de un agua se mide mediante el efecto que tienen las partículas finas en suspensión sobre un haz de luz. En especial, los métodos analíticos de interferencia luminosa se clasifican como nefelométricos.

### A.1 Unidades UTJ

El primer método empleado para medir la turbiedad utiliza una fuente luminosa estandarizada que proporciona resultados en unidades de turbiedad Jackson (UTJ). El aparato empleado consta de un tubo de vidrio calibrado colocado sobre una candela. La turbiedad del agua se determina al colocar el tubo en línea recta sobre la candela y añadir progresivamente la muestra al tubo. El momento en el cual se pierde de vista la luz a una determinada marca del tubo proporciona el valor de la turbiedad y cuanta mayor cantidad de agua se añada menor será su turbiedad. Así, una longitud de 10.8 cm equivale a una turbiedad de 200 UTJ, 21.5 cm a 100 UTJ y 72.9 cm a 25 UTJ (Hammer, 1986). La turbiedad mínima que puede medirse con el aparato de Jackson es de 25 UTJ por lo que su aplicación en potabilización es limitada.

## A.2 Métodos nefelométricos.

La necesidad de contar con mediciones más precisas hizo que se desarrollaran los métodos nefelométricos basados en la medición de la luz que es dispersada en un ángulo de  $90^\circ$  al atravesar la muestra. Como dichas mediciones no emplean el mismo principio que el tubidímetro Jackson (paso de luz en línea recta) no existe relación entre las unidades UTJ y UTN.

Actualmente, los estándares de turbiedad se preparan con diversas soluciones siendo las principales la formacina y la solución de Kieselguhr. Cuando se emplea la primera el resultado se da en UTF (Unidades técnicas de formacina).

### A.2.1 Calibración con formacina

Se trata de comparar la intensidad de la luz dispersada por la muestra a  $90^\circ$  con la correspondiente a una solución patrón de formacina, por medio de aparatos fotosensibles. Los fabricantes suministran estándares estables de formacina para su calibración: en caso contrario se prepara la solución patrón de la manera siguiente:

Solución A: Pesar 1 g de sulfato de hidrazina y disolverlo en una pequeña cantidad de agua destilada y ajustar el volumen a 100 ml.

Solución B: Pesar 1 g de hexametilentetramina y disolverlo en caliente en una pequeña cantidad de agua destilada ajustando el volumen a 100 ml, después de enfriar la solución.

Tomar 5 ml de la solución A y 5 ml de la solución B e introducirlos en un matraz aforado de 100 ml. Mezclar bien y dejar en reposo durante 48 h a  $20^\circ$  centígrados. Aforar para obtener una solución patrón equivalente a 40 UTJ.

Cuando se utiliza para la calibración formacina, 40 UTN equivalen a 40 UTJ, equivalencia que sólo es válida para esa solución.

### A.2.2 Calibración con solución de Kieselguhr.

Debido a la variedad de materiales que se pueden emplear para la calibración de los aparatos de turbiedad se estableció como estándar el sílice de tal forma que:

$$1\text{mg/lSiO}_2 = 1 \text{ Unidad de turbiedad}$$



Se debe señalar que no se emplean soluciones puras de sílice sino tierra de diatomeas con tamaño equivalente a la malla 325 (solución de Kieselguhr). Dicha solución está formada por las caparazones de diatomeas; son de naturaleza sílicea y aparte de emplearse en la preparación de soluciones patrones de turbiedad se usa para pulir e impregnar la nitroglicerina. La solución de Kieselguhr es especial para nefelometría y los resultados se pueden expresar tanto en UTN como en mg/l de sílice (Degrémont, 1979). Una lectura de 100 UTN es equivalente a aproximadamente 40 UTJ (Nalco, 1979).

A.3 Correlación entre la turbiedad y el contenido de sólidos en peso.

La correlación entre la turbiedad y la cantidad en peso de materia en suspensión raramente es lineal debido a la variación en tamaño, forma e índice de refractividad de las diferentes partículas que conforman los sólidos suspendidos.

#### A. 4 Unidades estandarizadas para la turbiedad

Las unidades aceptadas por la ASTM son:

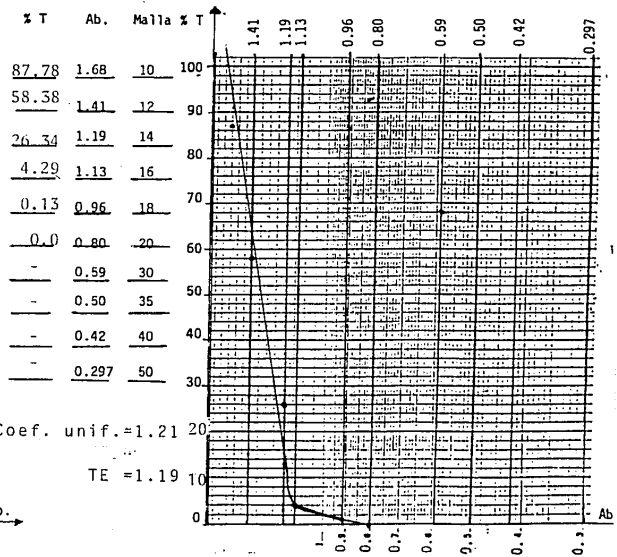
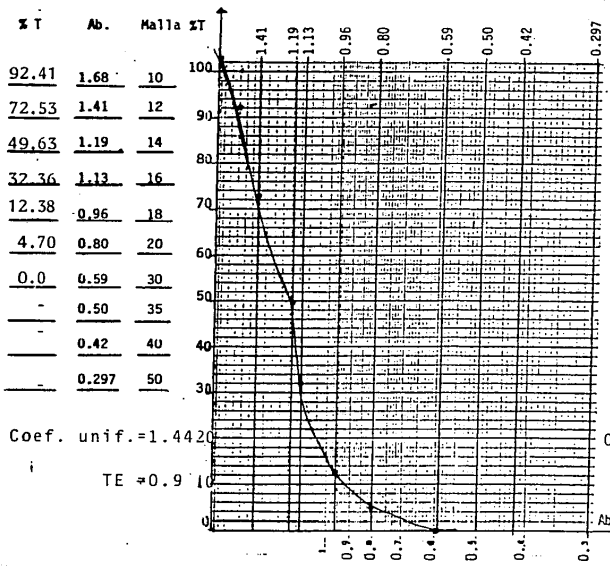
UTJ: Unidades técnicas Jackson

UTF: Unidades técnicas de formacina

UTN: Unidades técnicas de nefelometría

## **ANEXO B. Análisis granulométrico**

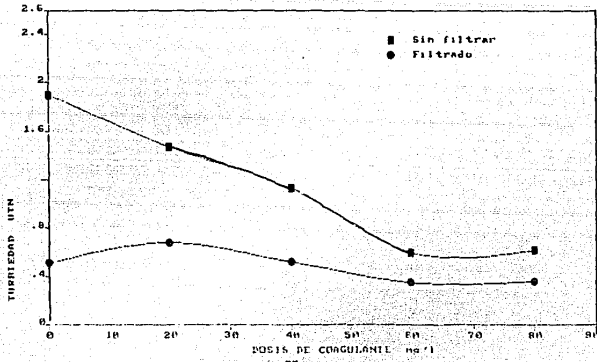
ANALISIS GRANULOMETRICOS  
HOJA DE DATOS



**ANEXO C. Gráficas de las pruebas de jarras**

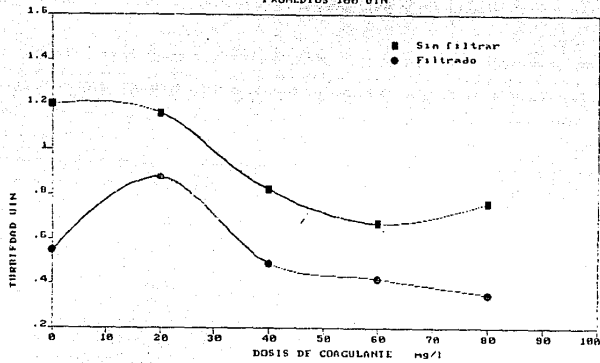
PROMEDIOS 150 UTN

76



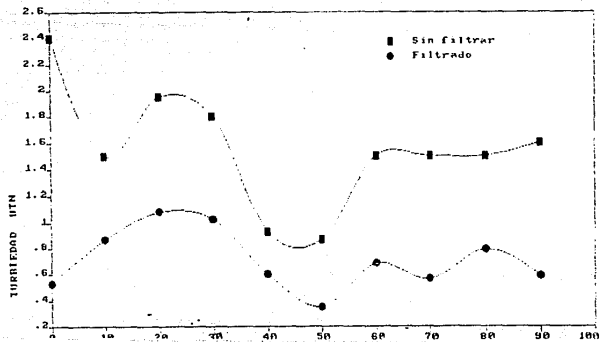
C-1

PROMEDIOS 100 UTN

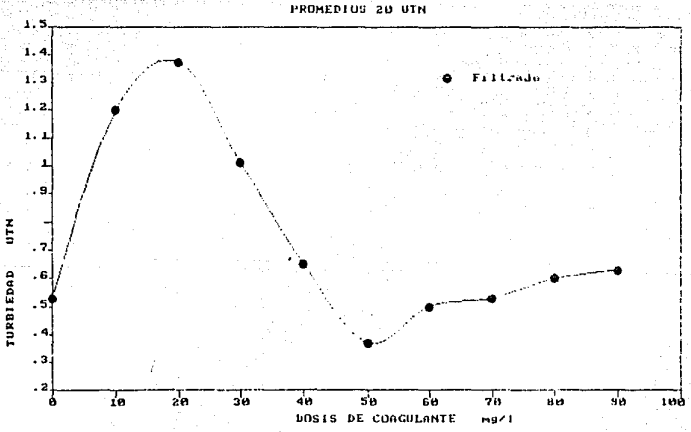
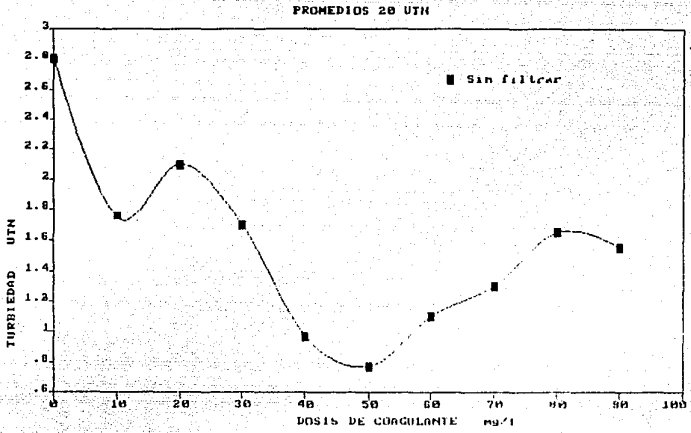


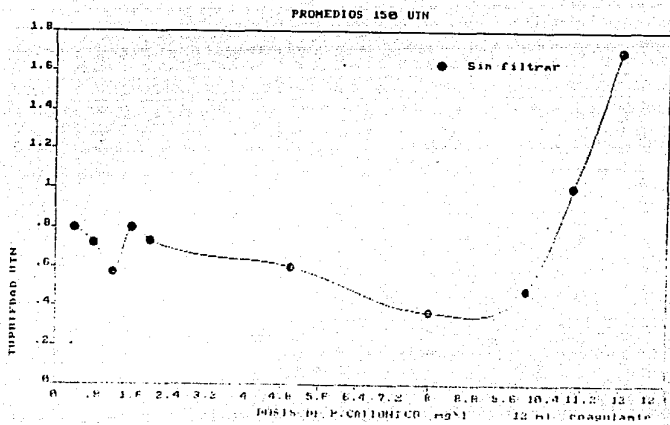
C-2

PROMEDIOS 50 UTN

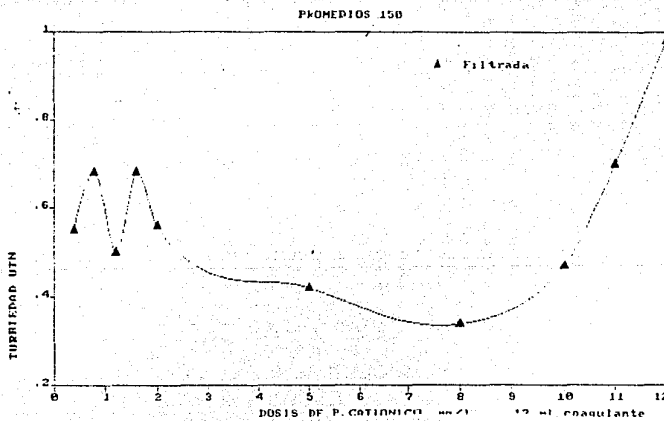


C-3



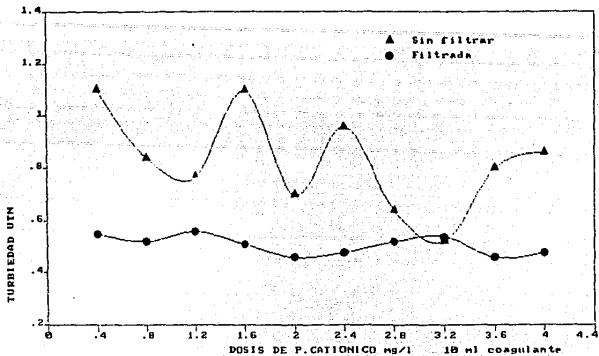


C-6



C-7

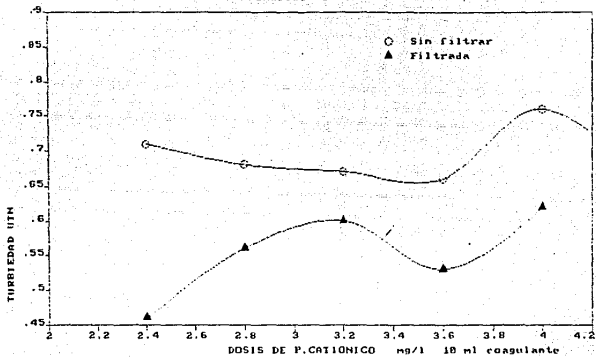
PRÓMEDIO 100 UTN



79  
 INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS  
 CENTRO DE LA FAUNA

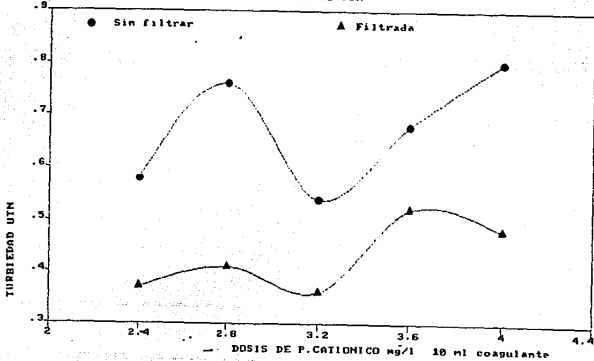
C-8

PROMEDIOS 50 UTN



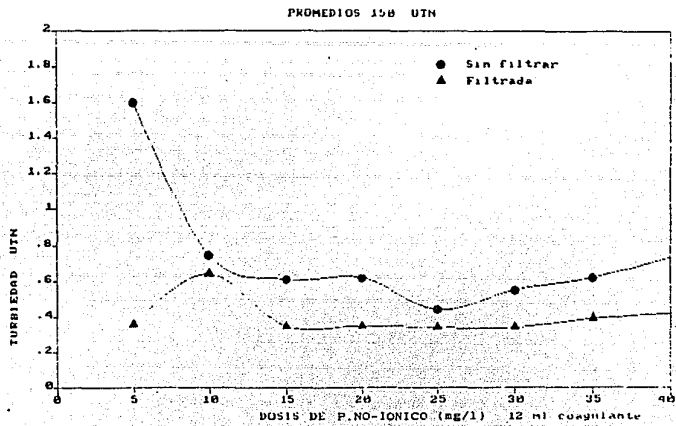
C-9

PROMEDIOS 20 UTN

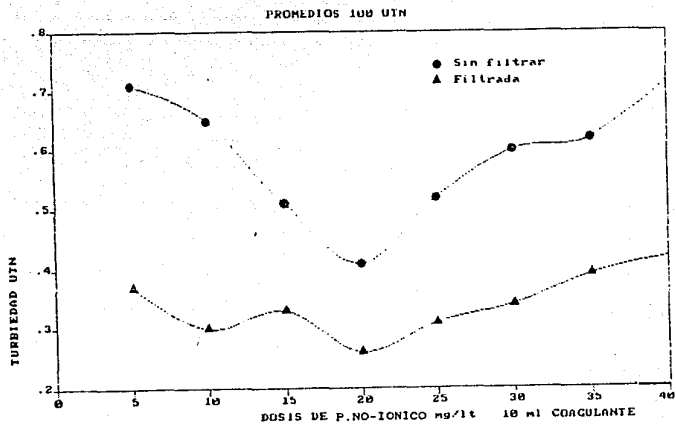


C-10

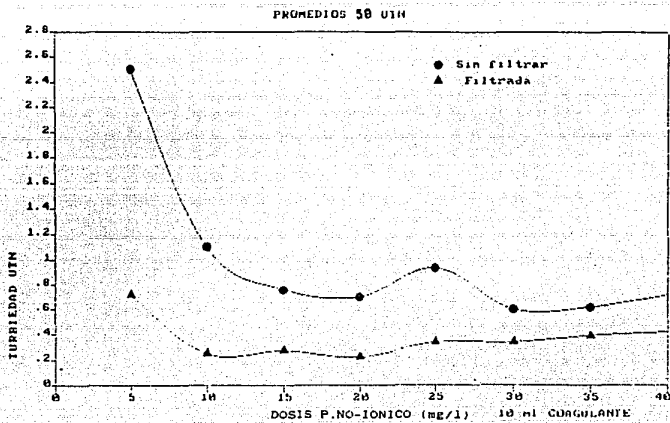




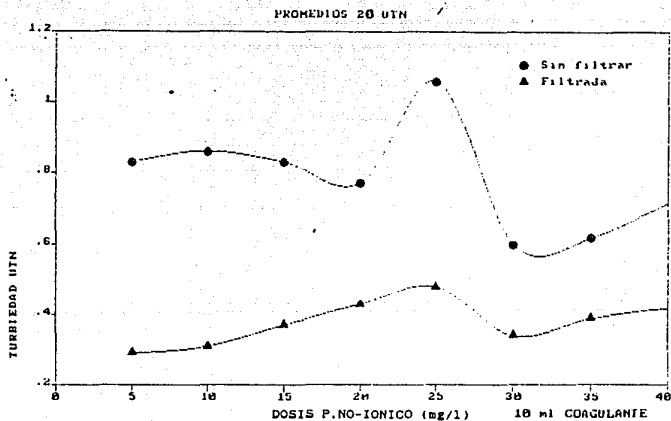
C-11



C-12



C-13



C-14

ANEXO D. Relación entre la turbiedad y el contenido  
de sólidos.

**ANEXO D. RELACION ENTRE LA TURBIEDAD Y EL CONTENIDO DE SOLIDOS****Metodología.**

Se preparó en el laboratorio soluciones con turbiedades diferentes a partir de agua proveniente del tanque de aeración del sistema de lodos activados de la planta de CU y del efluente del sedimentador secundario. A cada muestra se le determinó el contenido de sólidos mediante la técnica gravimétrica presentada en los Métodos estándar, 1981.

Cada determinación se efectuó por duplicado y se presenta en este anexo únicamente el promedio de los dos análisis. Para su interpretación se calculó el promedio y se despreciaron los datos cuya desviación estándar era mayor a la obtenida.

## ANEXO D. Relación entre la turbiedad y el contenido de sólidos

ENSAYO TURBIEDAD PESO			ENSAYO TURBIEDAD PESO			ENSAYO TURBIEDAD PESO		
No.	UTN	mg/l	No.	UTN	mg/l	No.	UTN	mg/l
1	1.2	3.5	51	40	132.5	101	25	82.0
2	5	31.0	52	40	130.0			
3	5	20.0	53	50	155.0			
4	5	37.0	54	50	145.0			
5	5	25.0	55	50	144.3			
6	5	31.0	56	50	145.2			
7	5	28.0	57	50	119.4			
8	5	24.0	58	100	252.3			
9	5	38.0	59	100	224.0			
10	5	30.0	60	100	220.0			
11	10	40.0	61	150	355.6			
12	10	46.4	62	150	353.0			
13	10	24.0	63	10	44.0			
14	10	40.0	64	10	34.7			
15	10	78.8	65	10	18.0			
16	10	46.0	66	10	48.0			
17	10	34.0	67	10	52.0			
18	10	41.0	68	10	40.8			
19	10	40.0	69	10	44.0			
20	15	45.0	70	10	42.0			
21	15	65.0	71	10	38.0			
22	15	75.0	72	10	30.0			
23	15	63.0	73	15	42.0			
24	15	62.0	74	15	40.8			
25	15	40.8	75	15	20.0			
26	15	65.3	76	15	18.2			
27	15	46.9	77	15	62.0			
28	15	52.0	78	15	47.0			
29	20	55.8	79	15	53.0			
30	20	82.5	80	15	60.0			
31	20	62.5	81	15	48.0			
32	20	61.2	82	20	58.0			
33	20	54.0	83	20	67.5			
34	20	71.3	84	20	75.0			
35	20	56.0	85	20	62.0			
36	20	55.8	86	20	50.0			
37	20	78.0	87	20	40.0			
38	25	68.4	88	20	38.0			
39	25	92.5	89	20	60.0			
40	25	75.0	90	20	78.0			
41	25	127.5	91	20	86.0			
42	25	69.0	92	25	66.0			
43	25	84.4	93	25	70.8			
44	25	61.1	94	25	68.0			
45	25	66.0	95	25	90.0			
46	25	70.8	96	25	66.0			
47	30	90.0	97	25	72.0			
48	30	105.0	98	25	84.0			
49	30	105.0	99	25	68.4			
50	30	110.0	100	25	79.5			

ANEXO E. Resultados.

Arena 0.9 mm de TE

TABLA E.1

INSTITUTO DE INGENIERIA-UNAM  
PROYECTO 8343

SISTEMA DE FILTRACION: A

FILTRO No: 2,2

CORRIEN No: 3, 10

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIDEAD (UTN): 20

DOSIS DEL COAGULANTE (mg/l): 10

POLIELECTROLITO MG-IGNICO (mg/l):

DESCARGAS DE FENOXI (no/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO (h)	TASA DE FILTRACION (m/h)	F (CMG)								TURBIDEAD (UTN)								PH		EFICIENCIA						
			P1	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	1	2	3	4	5	6	E	I	E	TURBIDEAD							
1	0.73	6	312.9	34.0	48.9	58.5	61.2	70.7	76.1	16	22	32	2.8	4.0	4.0	1.4	1.4	7.69	8.01	92.2							
2	1.67	6	329.1	36.7	54.4	77.5	86.2	157.8	163.2	18	48	82	2.2	4.2	1.6	2.4	1.2	7.77	8.17	93.3							
3	2.53	6	334.6	36.7	57.1	78.8	85.7	180.5	165.9	16	54	22	2.2	1.4	1.4	1.4	1.2	7.65	7.97	92.5							
4	3.97	6	354.9	51.7	69.4	99.3	111.5	164.6	171.4	22	142	46	1.6	1.6	3.8	1.6	1.2	7.61	7.86	94.5							
5	5.02	6	380.8	55.8	78.9	125.2	137.4	179.5	206.7	20	100	76	1.4	1.2	1.8	1.2	1.2	7.62	7.81	94.0							
6	6.02	6	406.0	34.0	36.2	138.7	157.8	194.5	245.4	22	206	148	1.4	2.0	2.2	1.4	1.4	7.73	7.82	93.6							
7	7.53	6	442.0	51.7	115.5	164.6	178.2	243.7	323.7	16	280	248	1.0	1.6	1.4	1.2	1.0	7.77	7.84	93.0							
8	8.42	6	462.4	40.8	138.7	194.5	238.3	284.2	359.0	20	360	232	10.0	1.2	1.0	0.8	1.2	7.73	7.79	94.0							
PROMEDIO										19										1.2		7.70		7.91		93.5	
1	0.77	9	319.6	48.9	51.7	69.4	74.8	84.3	102.0	26	40	48	4.4	4.0	2.6	2.6	2.2	7.40	7.72	91.5							
2	1.58	9	329.1	54.4	63.9	81.6	84.3	93.8	137.4	22	80	38	1.8	1.2	2.0	1.6	1.0	7.48	7.63	95.5							
3	2.63	9	344.1	62.6	70.7	97.9	110.2	127.8	148.2	12	168	84	2.0	1.6	1.4	2.2	1.4	7.59	7.75	98.3							
4	3.75	9	408.0	34.0	58.4	142.3	145.6	153.2	165.7	30	120	92	7.0	2.2	2.2	1.4	1.4	7.50	7.62	95.3							
5	5.12	9	433.8	70.7	97.9	148.2	176.0	189.0	395.1	26	329	172	32.0	2.4	1.6	1.6	2.0	7.60	7.77	92.3							
6	6.91	9	571.2	97.2	142.3	255.6	303.3	326.4	353.6	24	216	240	140.0	2.2	1.8	1.4	1.6	7.73	7.78	92.5							
7	7.63	9	601.1	97.9	170.0	310.1	326.4	338.6	983.5	20	74	160	30.0	1.4	2.0	2.0	2.0	7.70	7.79	96.0							
PROMEDIO										20										1.7		7.57		7.72		92.2	

TABLA E.2

INSTITUTO DE INGENIERIA-UNAM  
PROYECTO 8343

SISTEMA DE FILTRACION A

FILTRO No.1.2

CORRIDA No. 7

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIDEIDAD (UTN): 20

DOSES DEL COAGULANTE (mg/l): 10

POLIELECTROLITO NO-IONICO (mg/l): 1

DESCARGAS DE FONDO (No/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO	TASA DE FILTRACION		P (CMCA)								TURBIDEIDAD (UTN)						PH			EFICIENCIA				
		(h)	(m/h)	P1	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I	1	2	3	4	5	6	E	I	E	TURBIDEIDAD				
1	0.3	12	353.6	40.8	62.6	86.0	72.1	115.6	122.4	24	24	22.0	18.0	4.8	2.8	2.6	2.0	7.76	7.84	91.7					
2	1.46	12	369.9	44.9	59.4	91.1	97.9	125.1	144.2	22	42	46.0	16.0	2.0	2.4	1.8	1.6	7.77	7.95	92.7					
3	2.63	12	401.2	102.0	107.4	184.9	199.9	240.7	259.9	24	100	8.4	7.0	2.6	3.0	1.3	1.2	7.78	7.96	95.0					
4	3.63	12	455.6	104.7	112.9	193.1	212.2	261.1	303.3	16	84	102.0	5.2	2.8	2.6	1.6	1.4	7.82	7.97	91.3					
5	4.47	12	477.4	123.8	272.0	235.3	262.5	295.1	384.9	20	54	20.0	18.0	1.4	1.2	1.2	1.0	7.77	7.95	95.0					
PROMEDIO										21.2										1.4			7.78 7.91		93.1
1	0.63	12	340.0	42.2	63.9	110.1	122.4	125.1	131.4	26	26	22	42	2.0	1.6	1.6	1.6	7.77	7.84	93.8					
2	1.67	12	360.4	48.9	69.4	116.9	129.2	136.0	140.1	22	28	50	42	2.8	2.0	1.8	1.8	7.79	7.90	91.8					
3	2.73	12	435.2	57.1	73.4	131.9	160.5	180.9	250.4	26	104	112	56	5.0	2.3	2.3	1.4	7.88	7.80	94.6					
4	3.40	12	435.2	73.4	85.7	163.2	191.7	259.8	303.3	16	100	15	13	3.5	2.4	1.4	1.4	7.80	7.82	91.3					
5	4.46	12	482.8	73.4	99.3	206.7	228.5	300.6	462.6	20	140	30	28	14.0	2.6	2.0	1.6	7.82	7.83	92.0					
PROMEDIO										22										1.6			7.81 7.84		92.7



TABLA E.3

INSTITUTO DE INGENIERIA-UNAM  
PROYECTO 6343

SISTEMA DE FILTRACION: A

FILTRO No:2,1

CORRIERA No: 5

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIDEAD (UTN): 50

DOSIS DEL COAGULANTE (mg/l): 10

DOSIS DE POLIELECTROLITO NO-IONICO

DESCARGAS DE FONDO (No/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO (h)	TASA DE FILTRACION (m <sup>3</sup> /h)	P (CINCA)						TURBIDEAD (UTN)						pH		EFICIENCIA			
			P <sub>1</sub>	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I	1	2	3	4	5	6	E	I	E	TURBIDEAD
1	1.42	6	319.6	6.8	13.6	31.3	39.5	40.8	54.4	38	50	9	2.0	4.0	3.5	1.7	1.4	7.26	7.74	96.3
2	1.83	6	326.4	9.5	40.8	62.6	75.5	84.4	69.9	52	102	4	2.4	1.5	1.9	1.3	1.3	7.86	7.80	97.5
3	2.5	6	353.6	12.3	61.3	85.8	102.1	108.9	122.5	48	200	46	6.2	2.4	2.0	1.8	1.8	7.45	7.34	96.3
4	2.92	6	387.6	21.8	81.7	114.4	117.1	121.2	128	55	220	55	3.5	4.0	1.8	1.5	1.4	7.47	7.65	97.5
5	3.5	6	414.8	28.6	95.3	128	129.3	136.1	149.8	58	58	58	8.0	1.7	2.2	1.4	1.2	7.47	7.70	97.9
6	4	6	544	34	170.2	258.7	272.3	275	313.1	60	60	130	10.0	1.5	1.5	1.4	1.2	7.50	7.74	98.0
PROMEDIO																1.4	7.50	7.67	97.2	
1	0.5	9	326.4	40.8	47.6	65.3	60.0	81.6	102.0	53	47	160	3.8	2.7	2.2	2.0	1.2	7.80	8.36	97.7
2	1.0	9	374.0	46.2	54.4	63.0	81.6	102.0	111.5	50	68	92	2.2	1.8	1.6	1.2	1.2	7.83	8.29	97.6
3	1.66	9	408.0	47.6	81.6	129.2	129.2	142.8	155.4	56	34	88	2.0	2.0	1.4	1.0	1.0	7.72	8.07	98.3
4	2.4	9	462.4	49.0	103.4	190.4	198.6	209.4	209.4	40	62	100	7.0	2.8	1.6	1.2	1.0	7.75	8.27	97.5
5	3.6	9	578.0	163.2	170.0	312.6	319.6	346.8	353.6	30	180	140	16.0	3.0	2.8	1.2	1.0	7.96	7.83	96.7
PROMEDIO																1.1	7.82	8.16	97.6	
1	0.83	12	361.8	25.8	26.6	43.5	61.2	74.0	92.5	50	36	100	4.0	3.2	4.0	2.0	1.6	7.00	7.00	96.6
2	1.38	12	367.2	32.6	40.8	65.3	74.3	96.6	122.4	42	38	40	6.2	2.4	1.8	1.6	1.6	7.50	7.00	96.2
3	2	12	408.0	40.8	61.2	112.9	125.1	137.4	144.2	61	50	49	49.0	2.4	2.0	1.8	1.4	7.00	7.00	97.7
4	2.66	12	516.8	47.6	125.1	224.4	248.9	265.2	278.8	140	68	148	36.0	1.6	1.4	2.0	1.4	7.50	7.00	99.0
5	3.16	12	598.4	54.4	163.2	326.4	346.8	349.5	355.0	48	92	184	84.0	5.0	3.8	1.0	1.0	7.00	7.00	97.9
PROMEDIO																1.4	7.20	7.00	97.5	

TABLA E.4

INSTITUTO DE INGENIERIA-UNAM  
PROYECTO 8043

SISTEMA DE FILTRACION: A

FILTRO No: 1.1.2 CORRIDA No: 3

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIEDAD (UTN): 100

DOSIS DEL COAGULANTE (mg/l): 20

POLIELECTROLITO NO-IONICO (mg/l): 1

DESCARGAS DE FONDO (No/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO	TASA DE FILTRACION	P (CMCA)						TURBIEDAD (UTN)						pH		EFICIENCIA			
			Pi	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I	1	2	3	4	5	6		E	I	E
1	0.5	6	299.2	6.8	6.8	8.2	9.5	12.2	16.3	60.0	76.0	40.0	2.8	1.8	2.0	2.0	1.9	7.57	7.89	97.6
2	1.0	6	333.2	13.6	20.4	56.3	57.1	65.3	81.6	86.0	98.0	60.0	50.0	1.2	1.2	1.2	0.9	7.52	7.59	98.9
3	1.5	6	476.0	35.4	38.1	190.4	204.0	210.0	452.8	140.0	120.0	80.0	38.0	18.0	12.0	1.0	1.2	7.56	7.59	99.1
PROMEDIO										102.0							1.3	7.55	7.74	98.6
1	0.23	9	380.8	54.4	61.2	144.2	176.8	247.5	306.0	140.0	156.0	168.0	4.4	2.8	2.8	2.6	2.6	7.56	7.62	98.1
2	0.67	9	438.3	58.5	115.6	167.7	198.6	284.2	340.0	90.0	200.0	144.0	6.8	2.0	1.8	1.8	1.8	7.56	7.64	97.8
3	1.05	9	536.4	61.2	156.4	265.2	295.6	307.4	357.7	100.0	144.0	120.0	168.0	1.6	1.4	1.4	1.2	7.52	7.63	99.8
4	1.42	9	652.8	66.6	206.7	398.5	408.0	450.2	476.0	100.0	208.0	280.0	28.0	1.6	1.4	1.2	0.94	7.52	7.64	99.1
PROMEDIO										105.0							1.6	7.54	7.63	98.4
1	0.25	12	380.8	61.2	72.1	131.9	164.6	193.1	326.4	80.0	100.0	78.0	2.8	2.2	2.0	2.0	2.0	7.40	7.63	97.5
2	0.65	12	448.8	63.9	81.6	152.3	205.4	244.8	261.12	104	116	192	30.0	5.4	2.8	2.2	1.2	7.38	7.30	98.8
3	0.93	12	578	70.7	129.2	267.9	301.9	320.9	333.2	100	144	200	108.0	26.0	1.6	1.4	1.4	7.42	7.66	98.6
4	1.25	12	673.2	72.1	180.1	380.3	397.1	409.4	428.4	128	180	136	84.0	46.0	1.2	1.2	1.2	7.40	7.60	99.1
PROMEDIO										103							1.5	7.40	7.68	98.5

TABLA E.5

INSTITUTO DE INGENIERIA-IRAM  
PROYECTO 6343

SISTEMA DE FILTRACION: A

FILTRO No: 1,2,2 CORRIJA No: 1

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIDEZ (UTN): 150

DOSES DEL COAGULANTE (mg/l): 20

POLIELECTROLITO NO-IONICO (mg/l): 1

DESCARGAS DE FONDO (ho/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO	TASA DE FILTRACION	P (CMCA)								TURBIDEZ (UTN)								PH		EFICIENCIA						
			PI	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	1	2	3	4	5	6	E	I	E	TURBIDEZ							
1	0.5	6	367.2	27.2	47.6	68.0	74.8	95.2	156.0	150	120	110	2.3	2.2	3.0	2.1	2.0	7.54	7.83	98.7							
2	1.16	6	387.6	68.0	74.8	99.3	122.4	126.5	142.8	150	140	120	3	1.6	1.7	1.8	1.6	7.62	7.65	98.9							
3	1.66	6	516.8	88.4	108.8	204.0	217.6	244.8	326.4	120	168	130	70	3.8	1.6	1.8	1.6	7.60	7.32	98.7							
4	2.08	6	625.6	108.8	204.0	340.0	350.9	367.2	421.6	170	190	162	80	4.0	2.0	1.8	1.6	7.56	7.92	95.1							
PROMEDIO										147.5										1.7		7.59		7.86		98.8	
1	0.76	9	380.8	13.6	61.2	63.9	95.2	108.8	244.8	150	70	450	23	1.9	2.0	1.7	1.7	7.60	7.58	96.9							
2	1.08	9	394.4	27.2	68.0	95.2	136.0	142.8	265.2	170	180	400	11	2.2	1.6	1.5	1.4	7.62	7.96	99.2							
3	1.56	9	516.8	40.8	85.7	163.2	200.0	206.7	312.9	130	140	220	36	4.7	2.1	1.9	1.6	7.66	7.84	98.6							
4	2	9	428.4	54.4	115.7	326.4	356.3	357.2	389.8	140	132	168	50	6.0	3.0	3.0	3.0	7.60	7.78	97.9							
5	2.5	9	489.6	68.0	122.4	340.0	380.8	408.0	459.6	150	180	60	60	6.0	3.1	3.0	3.0	7.74	7.94	93.0							
PROMEDIO										148.0										2.1		7.64		7.83		98.5	
1*	0.42	12	326.4	47.6	122.4	142.8	170.0	176.8	196.4	120	120	60	18	7.5	7.5	8.0	6.0	7.00	7.00	95.0							
2*	0.75	12	360.8	20.4	136.0	190.4	251.6	231.2	258.4	120	100	90	60	36.0	4.0	4.2	4.0	7.00	7.00	96.7							
3*	1.25	12	499.6	27.2	176.8	190.4	272.0	285.6	292.4	120	120	118	38	11.0	10.0	2.2	2.8	7.00	7.00	97.7							
PROMEDIOS										120										4.3		7.00		7.00		96.4	

\* Dosis : coagulante 70 mg/l  
polielectrolito no-ionico 20 mg/l

**ANEXO F. Resultados.**

**Arena 1.19 mm de TE**

TABLA F.1

INSTITUTO DE INGENIERIA-UNAM  
PROYECTO E343

SISTEMA DE FILTRACION: B

FILTRO No: 1,1

CORRIIDA No: 11,12

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIDEDAD (UTN): 20

POSIS DEL COAGULANTE (mg/l): 10

POLIELECTROLITO NO-IONICO (mg/l): 1

DESCARGAS DE FONDO (No/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO (h)	TASA DE FILTRACION (m <sup>3</sup> /h)	P (CMCA)						TURBIDEDAD (UTN)						PH		EFICIENCIA					
			P1	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	1	2	3	4	5	6	E	I	E	TURBIDEDAD			
1	0.86	6	306.0	14.9	21.8	23.9	35.4	44.9	61.2	18	26	20	4.6	2.6	2.8	2.6	1.4	7.67	8.02	92.2		
2	1.62	6	323.7	21.8	27.2	34.0	39.4	50.3	53.0	20	62	22	2.4	2.4	2.4	1.4	1.6	7.79	8.06	92.0		
3	2.47	6	326.4	28.6	43.5	48.9	54.4	65.3	63.0	16	76	34	1.6	2.2	2.2	1.2	1.2	7.69	7.91	92.5		
4	3.96	6	341.4	43.5	51.7	62.6	89.8	96.6	116.9	22	288	140	2.6	1.6	2.2	1.2	1.2	7.58	7.78	94.5		
5	5.08	6	361.8	43.5	74.6	88.4	129.2	152.3	163.6	22	240	116	3.2	2.0	1.4	1.2	1.0	7.62	7.79	95.5		
6	6.20	6	387.6	40.8	65.7	137.4	160.5	171.4	202.6	22	356	168	3.2	2.0	1.8	1.2	1.2	7.76	7.90	94.5		
7	7.75	6	408.0	40.8	92.5	151.9	175.4	198.6	247.5	16	204	52	7.6	1.4	1.4	1.0	1.0	7.76	7.80	93.8		
8	9.03	6	424.3	13.6	97.9	170.0	261.3	216.2	269.3	18	360	192	26.4	0.78	1.2	0.82	1.2	7.74	7.78	93.3		
9	10.08	6	493.7	13.6	118.3	218.8	228.5	276.1	379.4	20	1280	240	50.0	30.0	2.2	2.2	2.0	7.75	7.80	90.0		
PROMEDIO										19.3								1.3		7.71	7.87	93.2
1	0.58	9	340.0	43.5	48.9	57.1	76.2	31.6	115.6	26	76	7	6.4	6.0	5.2	1.8	1.8	7.54	7.15	93.1		
2	1.53	9	354.9	46.2	65.3	78.8	87.0	112.9	130.6	22	156	100	10.0	2.0	9.6	1.8	1.6	7.56	7.71	92.7		
3	2.55	9	344.1	48.9	76.7	83.0	92.5	121.0	153.7	12	194	98	2.2	1.4	3.0	1.6	1.2	7.56	7.74	90.8		
4	3.60	9	367.2	48.9	86.4	102.0	122.4	129.2	164.6	22	208	104	8.2	4.0	9.6	1.2	1.2	7.52	7.72	94.8		
5	5.17	9	435.2	65.3	115.6	142.8	190.4	201.3	223.0	17	240	30	1.4	2.2	1.9	1.2	1.2	7.63	7.76	92.9		
6	7.0	9	510.0	76.7	152.3	260.1	220.3	332.6	247.2	24	448	160	76.0	2.0	1.4	1.4	1.4	7.77	7.80	94.2		
7	8.33	9	616.1	65.0	167.3	315.5	334.6	357.3	397.1	20	184	104	46.0	9.2	2.6	1.6	1.6	7.58	7.77	92.0		
PROMEDIO										20.4								1.4		7.59	7.66	92.8

TABLA F.2

INSTITUTO DE INGENIERIA-UNAM  
PROYECTO 8343

SISTEMA DE FILTRACION: B

FILTRO No: 1,2

CORRIVA No: 3

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIEDAD INTN: 20

DOSES DEL COAGULANTE (mg/l): 10

FOLIELECTROLITO NO-IONICO (mg/l): 1

DESCARGAS DE FONDO (hor corridas): SIN

MUESTRA	TIEMPO	TASA DE FILTRACION	P (CNCA)								TURBIEDAD INTN								PH	EFICIENCIA				
			P1	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I	1	2	3	4	5	6	E	I			E			
1	0.20	12	346.8	17.7	29.9	42.2	61.2	55.3	66.6	22	22	22	3.2	1.30	0.80	0.78	0.56	7.45	7.56	97.5				
2	0.92	12	353.6	36.7	48.9	53.0	76.2	80.2	92.5	18	66	44	18	1.60	1.40	1.20	1.20	7.56	7.80	93.3				
3	1.98	12	380.8	50.3	62.6	78.3	88.4	100.6	138.7	16	82	144	22	0.80	0.78	0.74	0.70	7.73	7.85	95.6				
4	2.65	12	401.2	57.1	76.2	111.5	122.4	144.2	167.3	22	58	84	52	4.60	1.40	1.20	0.82	7.67	7.76	96.3				
5	3.93	12	462.4	57.1	97.9	183.6	193.1	217.8	292.4	32	240	279	34	1.40	0.80	0.80	0.76	7.75	7.95	97.6				
6	6.37	12	516.8	4.1	103.4	187.7	197.2	225.8	299.2	16	102	160	84	3.00	1.00	0.86	0.82	7.76	7.83	94.9				
PROMEDIO										21.0									0.61		7.66		7.78	95.9
1	0.57	12	335.9	16.32	48.9	63.9	70.7	78.9	81.6	20	22	56	6.6	4.20	3.60	2.20	1.40	7.72	7.78	93.0				
2	1.35	12	342.7	38.1	51.7	66.6	73.4	82.9	85.7	22	82	36	12	1.40	1.20	1.00	0.92	7.72	7.78	95.8				
3	2.35	12	384.9	50.3	54.4	89.9	122.4	142.8	144.2	16	56	136	12	1.64	0.84	0.86	0.64	7.78	7.95	96.0				
4	3.22	12	402.6	54.4	72.1	108.3	138.7	131.8	221.7	13	75	50	26	1.20	0.78	0.76	0.76	7.73	8.01	95.3				
5	4.43	12	446.8	24.5	85.7	146.3	176.0	199.6	273.4	22	30	58	34	5.00	1.00	0.76	0.76	7.75	7.86	96.5				
6	6.13	12	490.9	23.12	122.4	220.3	223.1	231.2	356.3	34	166	140	120	3.40	0.68	0.68	0.68	7.77	7.90	98.0				
																0.86		7.76		7.86	95.9			

TABLA F.3

INSTITUTO DE INGENIERIA-UNAH  
PROYECTO 8343

SISTEMA DE FILTRACION: B

FILTRO No: 2,2,1

CORRIIDA No: 6

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIEDAD (UTN): 50

DOSIS DEL COAGULANTE (mg/l): 10

POLIELECTROLITO NO-IONICO (mg/l): 1

DESCARGAS DE FONDO (No/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO	TASA DE FILTRACION	P (CNCA)								TURBIEDAD (UTN)						pH			EFICIENCIA	
			P1	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I	1	2	3	4	5	6	E	I	E		
1	0.18	6	312.8	81.6	74.0	95.2	106.8	100.6	115.6	70	15	2.5	2.8	2.4	2.2	2.3	2.3	7.00	7.50	97.0	
2	0.95	6	337.3	17.6	27.2	43.5	40.8	54.4	54.4	47	80	5	2.5	3	3	2	2	7.65	7.71	96.0	
3	1.52	6	353.6	17.7	20.4	28.9	47.6	47.6	61.2	44	93	25	3.2	2.3	2.3	2.2	1.3	7.72	7.98	97.0	
4	3.47	6	387.6	16.3	68	108.3	118.3	125.1	130.6	56	192	140	16	1.4	1.22	1.2	1	7.81	7.60	98.0	
5	6.0	6	408.0	61.2	88.4	142.8	163.2	204	288.4	52	76	112	14	6	1.6	1.4	1.2	7.67	7.80	98.0	
PROMEDIO										53.8						1.5			7.57	7.72	97.2
1	0.32	9	306.0	4.1	21.8	27.2	46.2	47.6	47.6	50	29	4	2	2.2	4.3	2	1.9	7.00	7.00	96.0	
2	0.75	9	308.7	23.1	27.2	40.8	49.0	51.7	55.8	45	22	2.5	2.6	2.2	2.1	2	2	7.50	7.80	96.0	
3	1.6	9	326.4	20.4	31.3	54.4	51.7	57.1	57.1	48	45	30	3.5	1.9	1.9	2	2	7.56	7.80	96.0	
4	3.30	9	387.6	27.2	68.0	108.8	115.6	118.3	122.4	56	160	122	20	1.6	1.6	1.2	1	7.82	7.68	98.0	
5	6.17	9	393.0	63.9	95.2	146.9	163.2	208.1	299.2	58	190	152	88	2	2	1.2	1.2	7.65	7.83	98.0	
PROMEDIO										51.4						1.62			7.51	7.62	96.6
1	0.75	12	333.2	68.0	40.8	57.1	96.6	176.8	112.9	53	60	60	25	2.5	4	1.9	1.2	7.50	7.00	98.0	
2	1.30	12	353.6	81.6	108.8	117.0	122.4	133.3	142.8	48	44	56	22	4.7	7	1.5	1	7.00	7.00	98.0	
3	1.75	12	394.4	87.0	123.8	121.0	130.6	163.2	171.4	52	56	72	95	14	1.9	0.9	0.9	7.00	7.00	98.0	
4	2.25	12	448.8	88.4	131.9	152.3	163.2	180.3	238.0	50	58	72	100	22	2.5	0.8	0.7	7.00	7.00	99.0	
5	2.90	12	503.2	95.2	136.0	233.3	246.9	267.9	274.7	50	60	72	50	25	1.3	0.8	0.8	7.00	7.00	98.0	
6	3.5	12	625.6	102.0	136.0	232.4	340.0	414.8	416.2	48	60	110	48	58	1.8	0.8	0.8	7.50	7.00	98.0	
PROMEDIO										50.2						0.9			7.20	7.00	98.2

TABLA F.4

INSTITUTO DE INGENIERIA-UAAH  
 PROYECTO 8343

SISTEMA DE FILTRACION: B

FILTRO No: 1,2,1      CORRIDA No: 4

CONDICIONES DE OPERACION:

TURBIEDAD (UTM): 100

DOSIS DEL COAGULANTE (mg/l): 20

POLIELECTROLITO NO-IONICO (mg/l): 1

DESCARGAS DE FONDO (No/corrida): SIN

MUESTRA	TIEMPO	TASA DE FILTRACION		P (CHCA)										TURBIEDAD (UTM)					pH		EFICIENCIA
		(h)	(m/h)	Pi	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I	1	2	3	4	5	6	E	I	E	
1	0.5	6	285.6	40.8	47.6	68.0	74.8	81.6	95.2	84.0	60	14	14.0	3.0	1.6	1.4	1.4	7.76	7.73	98.3	
2	1.0	6	353.6	74.8	88.4	149.6	156.4	163.2	179.0	86.0	80	40	2.7	1.7	1.9	1.6	1.7	7.60	8.03	98.0	
3	1.5	6	489.6	40.8	122.4	170.0	306.0	326.4	469.2	140.0	74	70	70.0	32.0	18.0	2.5	2.4	7.78	7.76	98.3	
PROMEDIO										103.3						1.8	7.71	7.84	98.2		
1	0.27	9	353.6	44.9	48.9	55.8	156.4	172.7	197.2	72.0	94	52	3.8	3.0	2.2	2.0	2.0	7.51	7.76	97.2	
2	0.82	9	390.3	48.9	61.2	110.2	204.0	220.3	244.8	108.0	80	144	36.0	1.6	1.6	1.4	1.4	7.46	7.58	98.7	
3	1.13	9	428.4	51.7	89.9	136.0	224.4	244.8	272.0	110.0	152	148	112.0	12.0	1.6	1.4	1.2	7.52	7.58	98.9	
4	1.62	9	489.6	53.1	130.6	199.9	242.1	272.0	306.0	100.0	122	128	64.0	12.0	1.8	1.4	1.4	7.52	7.60	98.6	
5	2.1	9	612.0	56.0	156.4	295.1	310.1	329.1	374.0	90.0	156	280	68	28	5.6	0.66	0.66	7.56	7.70	99.3	
PROMEDIO										96.0						1.3	7.51	7.64	98.5		
1	0.57	12	335.0	27.2	70.7	131.9	184.9	238.0	367.2	108.0	124	92	92	14	2.4	1.6	1.4	7.46	7.63	98.7	
2	0.83	12	544.0	47.6	102.0	187.7	227.1	251.6	303.3	120.0	136	140	62	52	9.0	1.8	1.2	7.51	7.85	99.0	
3	1.13	12	582.1	53.0	111.5	220.3	276.1	301.9	319.6	96.0	200	240	160	18	9.2	1.4	1.2	7.60	7.72	98.8	
4	1.33	12	625.6	57.1	122.4	252.9	307.4	323.7	346.8	84.0	232	120	100	40	24.0	1.0	1.0	7.56	7.78	98.8	
5	1.60	12	741.2	59.8	144.2	326.4	410.7	463.8	489.6	68.0	176	240	140	38	32.0	1.0	0.8	7.58	7.73	98.8	
PROMEDIO										95.2						1.1	7.54	7.74	98.8		



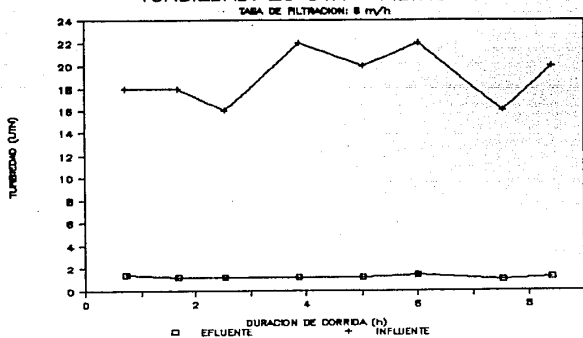


ANEXO G. Gráficas de los estudios.

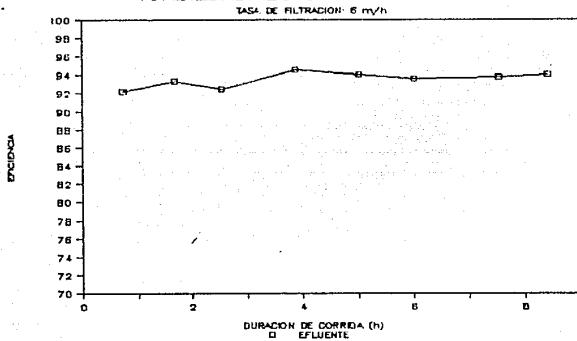
Arenas de 0.9 y 1.19 mm de TE

Arena 0.9 mm de TE

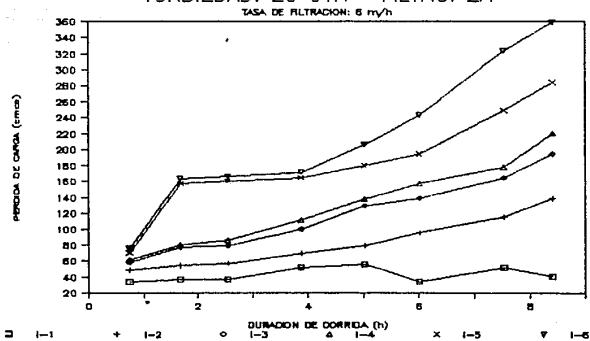
TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 2A



TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 2A

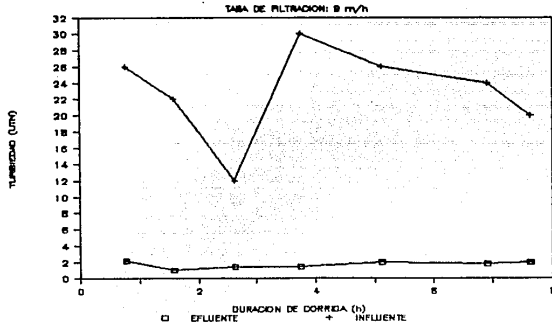


TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 2A

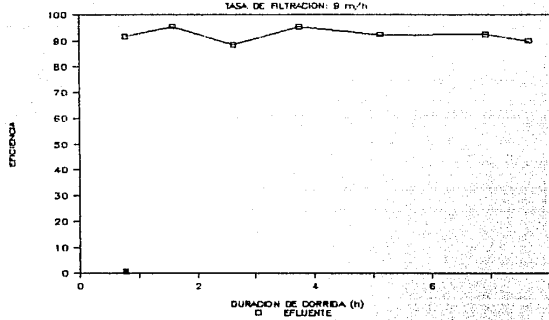


TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 2A

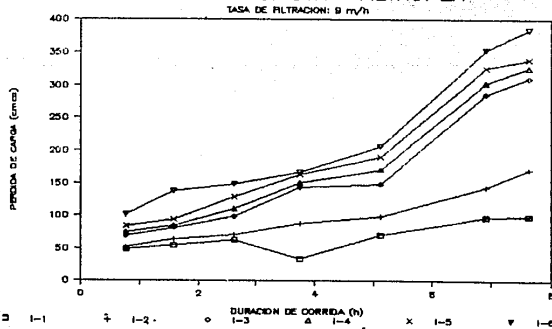
100

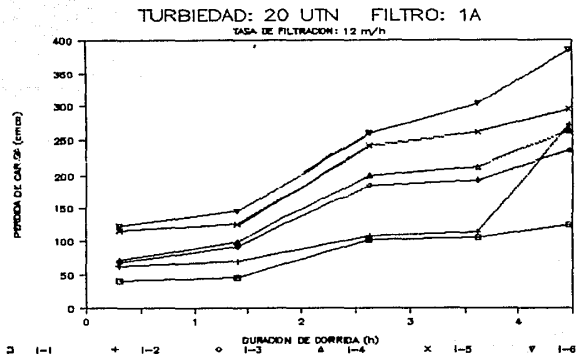
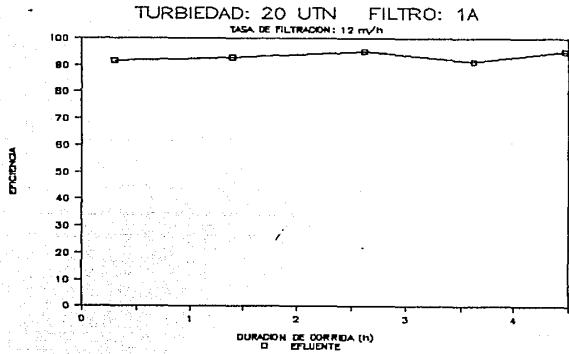
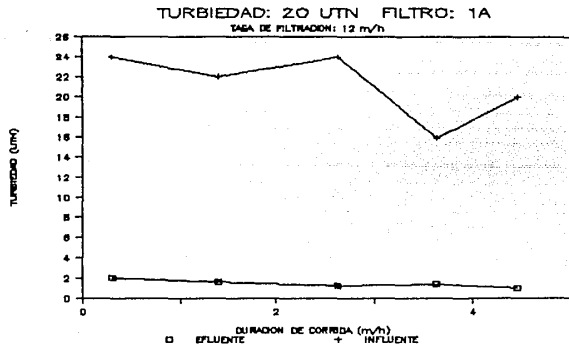


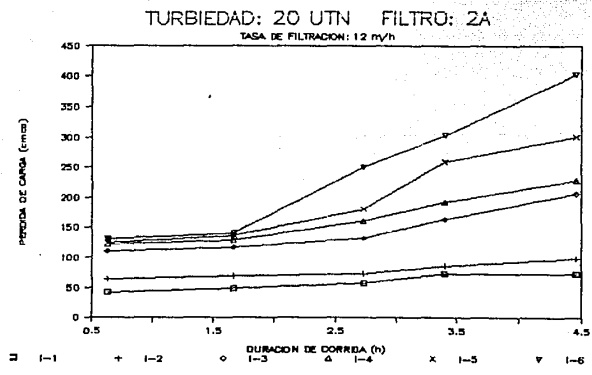
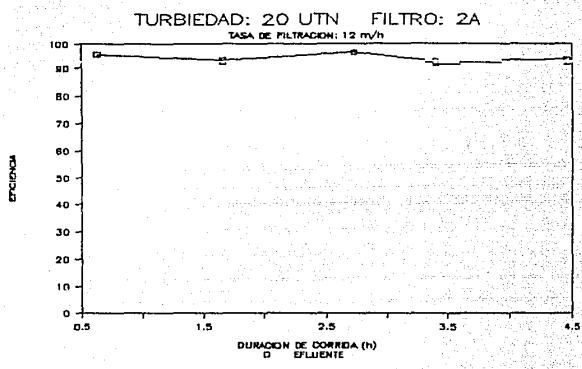
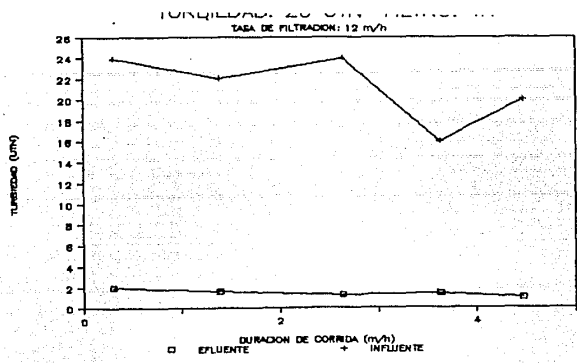
TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 2A

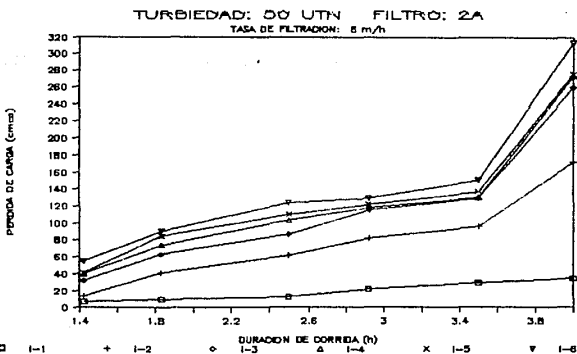
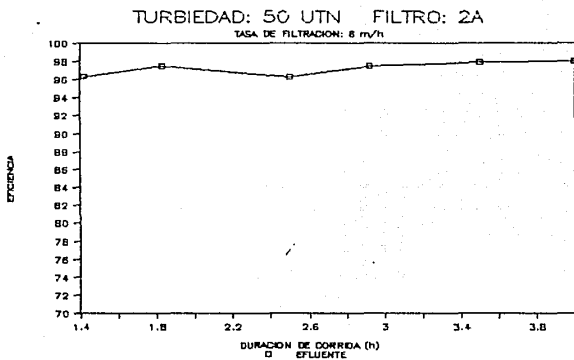
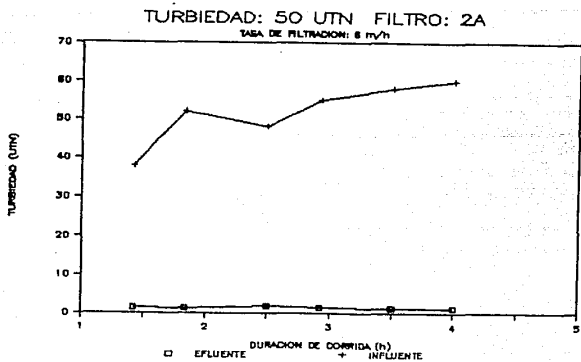


TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 2A

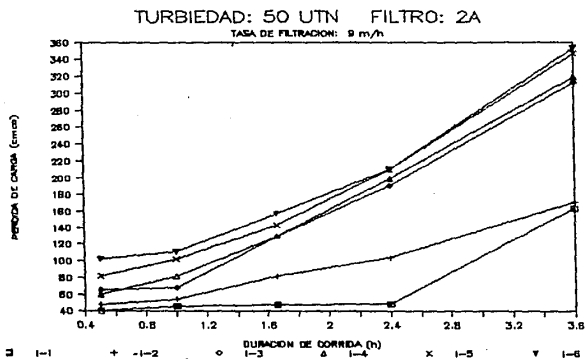
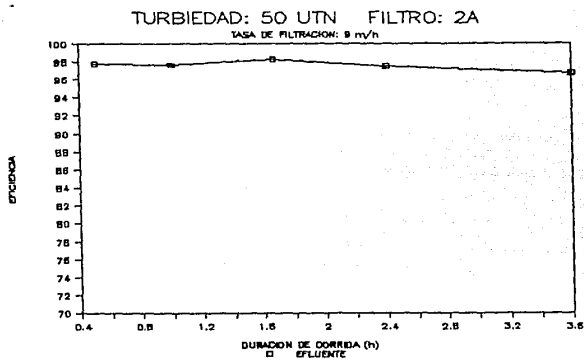
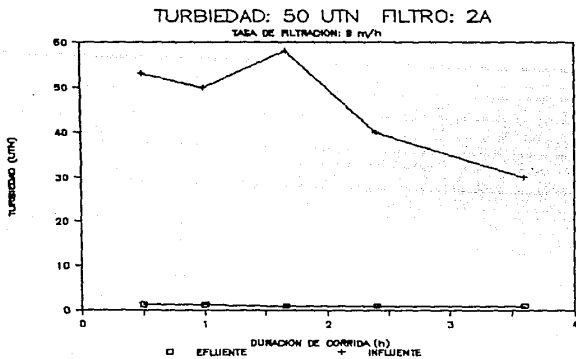


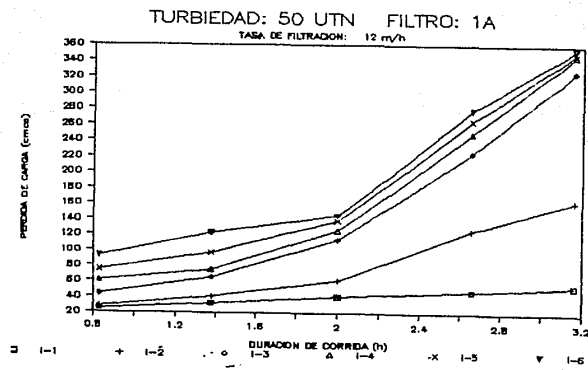
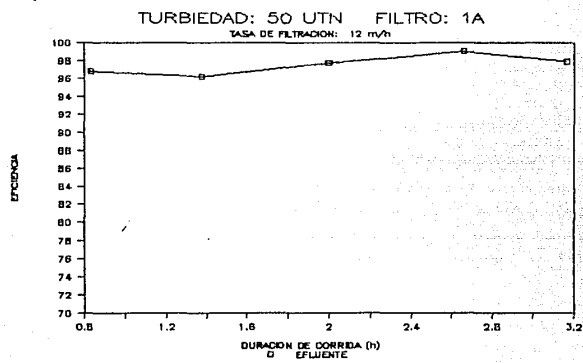
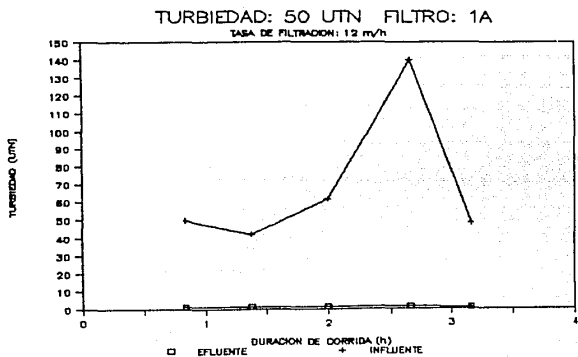


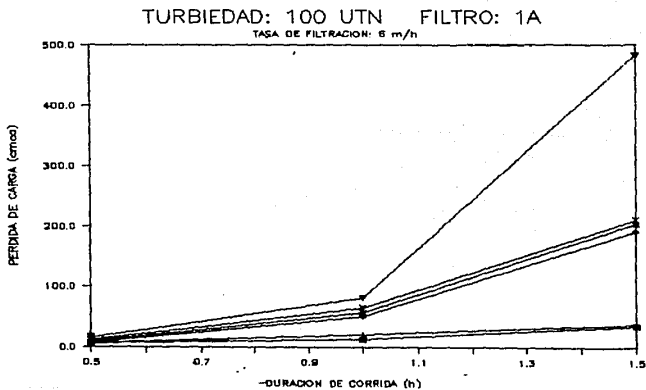
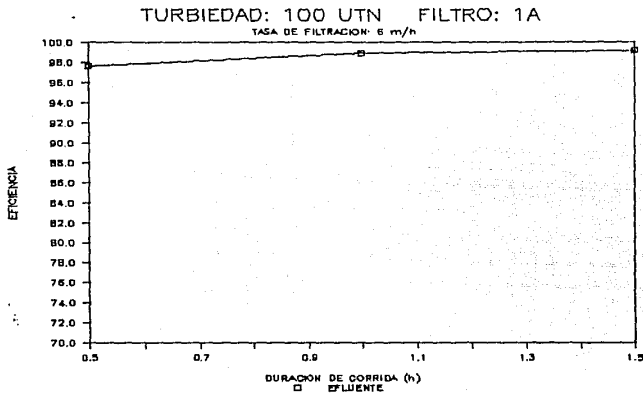
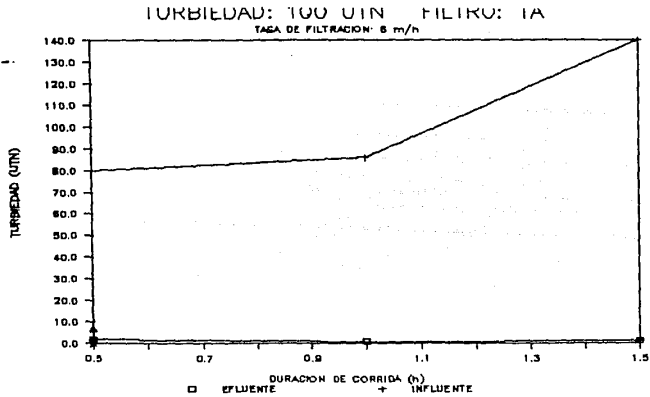




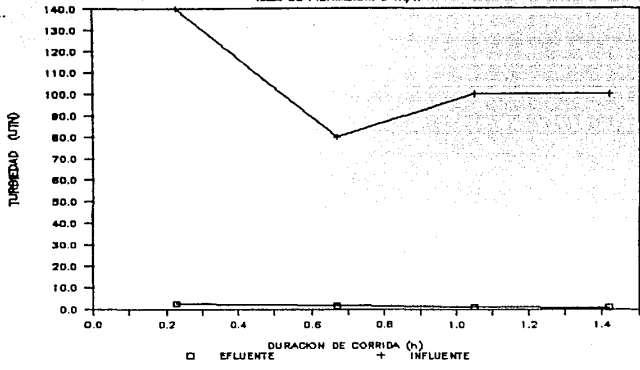




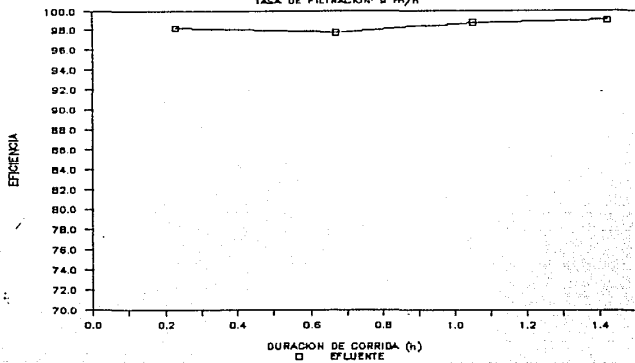




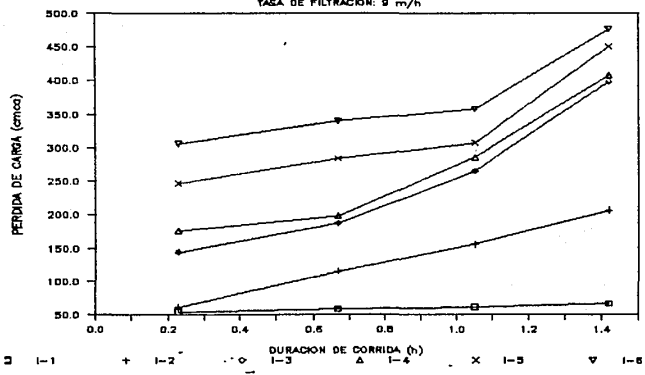
TURBIEDAD: 100 UTN FILTRO: 1A  
TASA DE FILTRACION: 9 m/h



TURBIEDAD: 100 UTN FILTRO: 1A  
TASA DE FILTRACION: 9 m/h

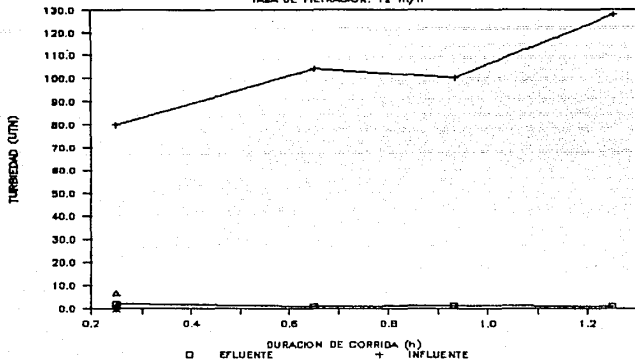


TURBIEDAD: 100 UTN FILTRO: 1A  
TASA DE FILTRACION: 9 m/h



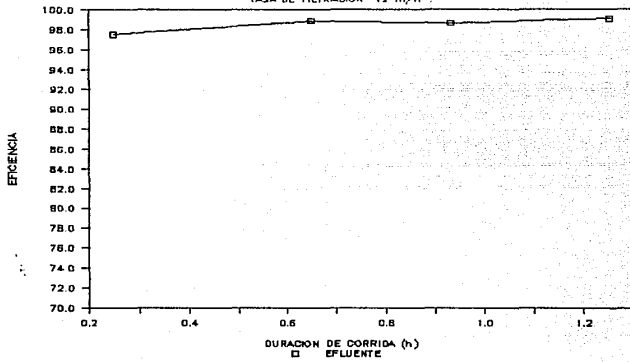
TURBIEDAD: 100 UNTN FILTRO: 2A

TASA DE FILTRACION: 12 m<sup>3</sup>/h

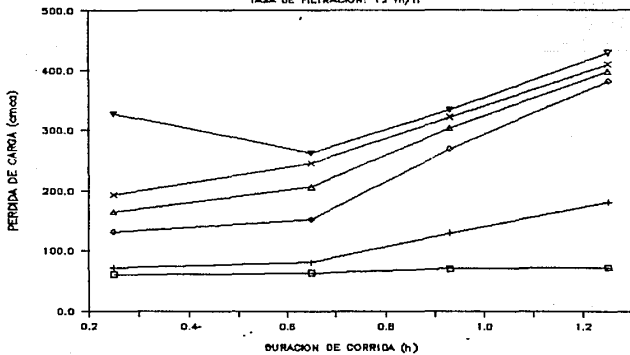


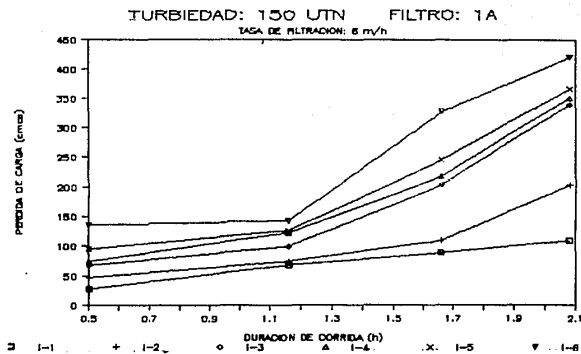
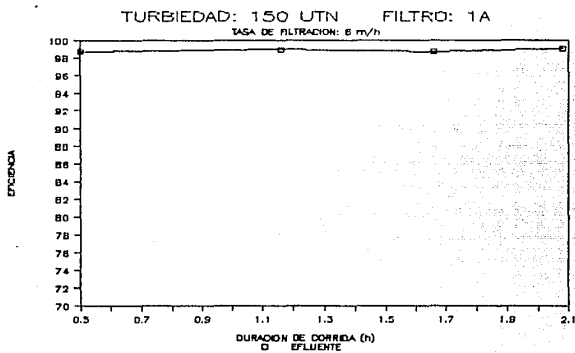
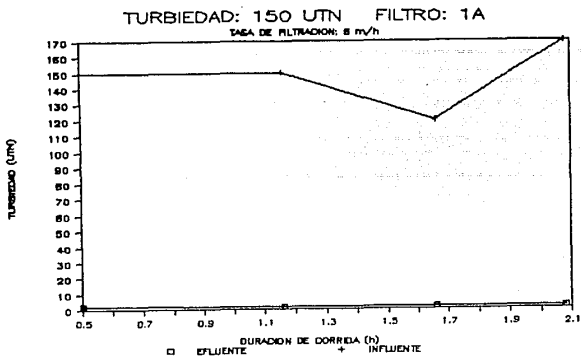
TURBIEDAD: 100 UNTN FILTRO: 2A

TASA DE FILTRACION: 12 m<sup>3</sup>/h



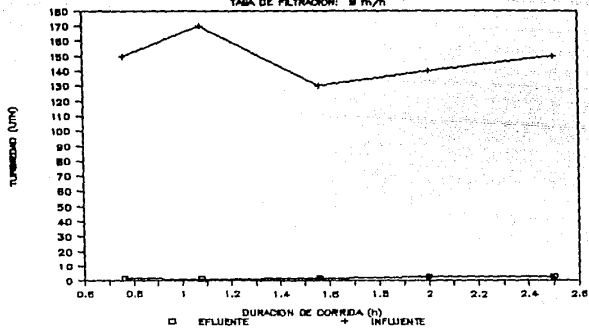
TASA DE FILTRACION: 12 m<sup>3</sup>/h





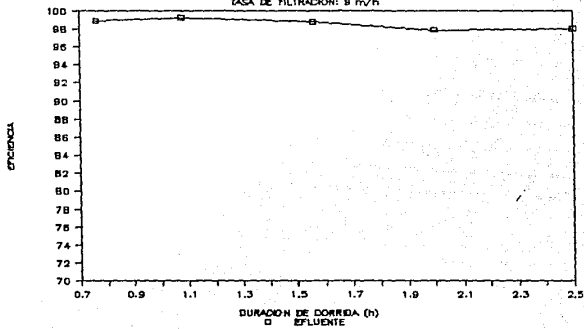
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 2A

TASA DE FILTRACION: 9 m/h



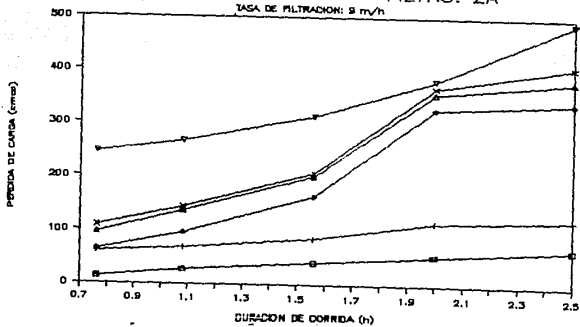
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 2A

TASA DE FILTRACION: 9 m/h



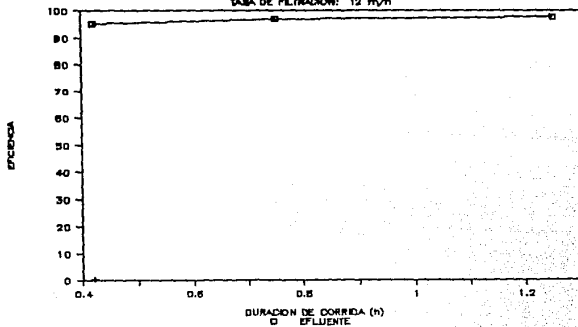
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 2A

TASA DE FILTRACION: 9 m/h



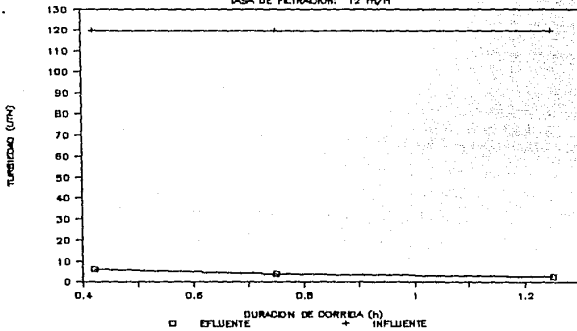
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 2A

TASA DE FILTRACION: 12 m/h



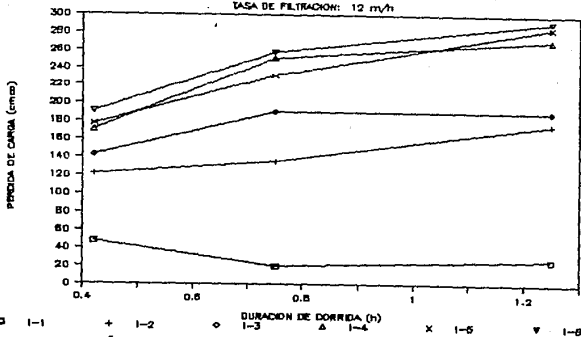
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 2A

TASA DE FILTRACION: 12 m/h



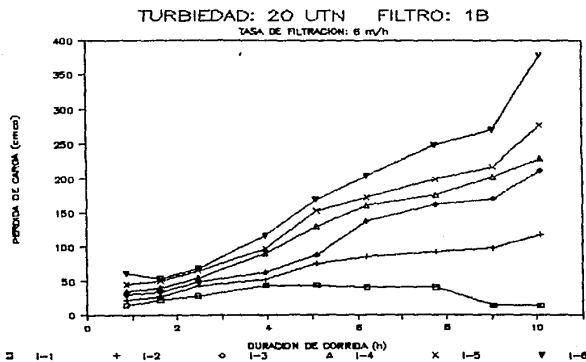
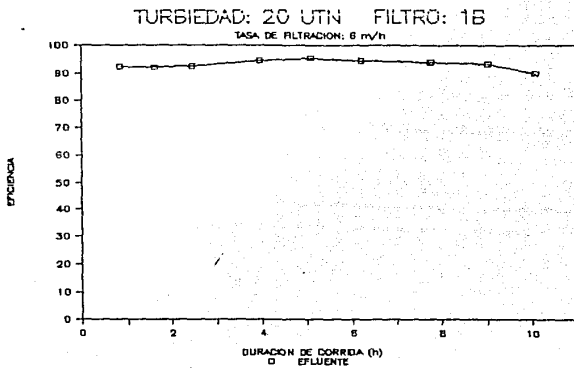
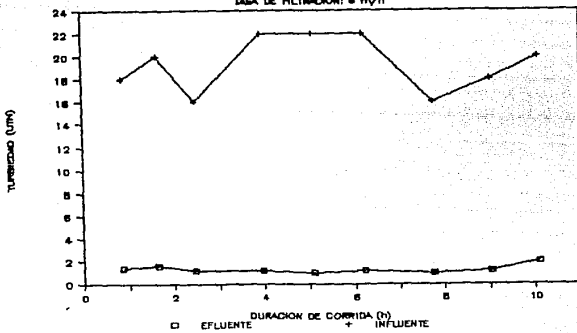
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 2A

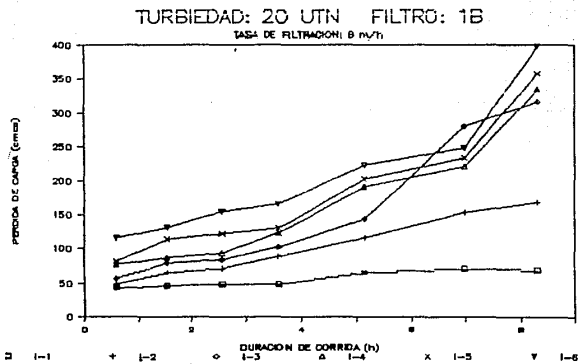
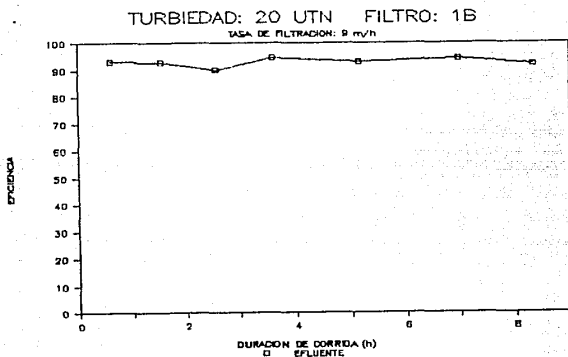
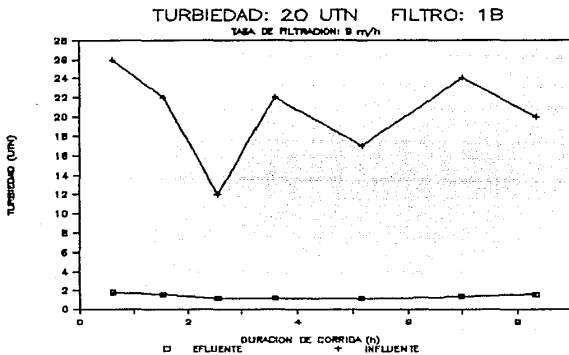
TASA DE FILTRACION: 12 m/h

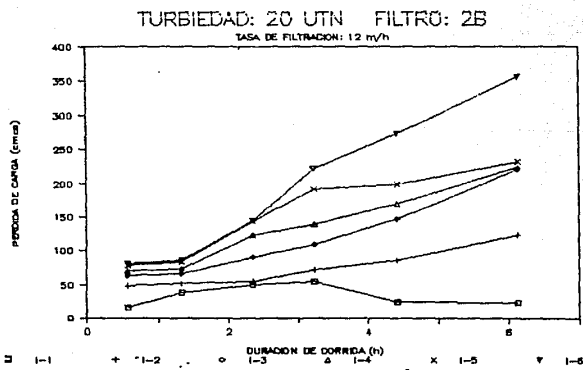
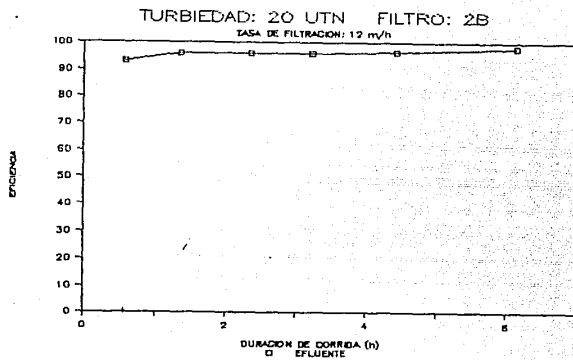
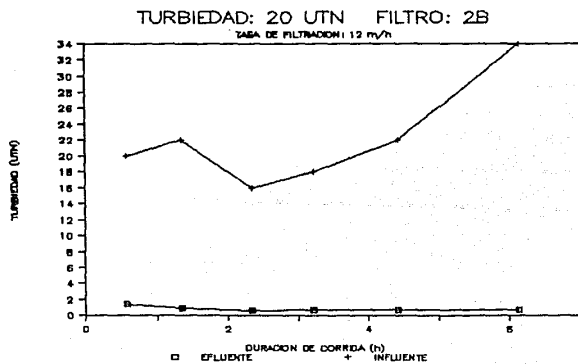




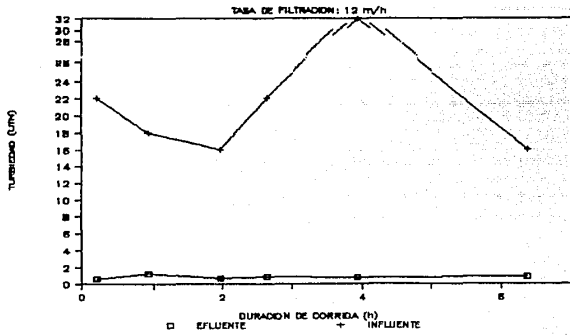
Arena 1.19 mm de TE



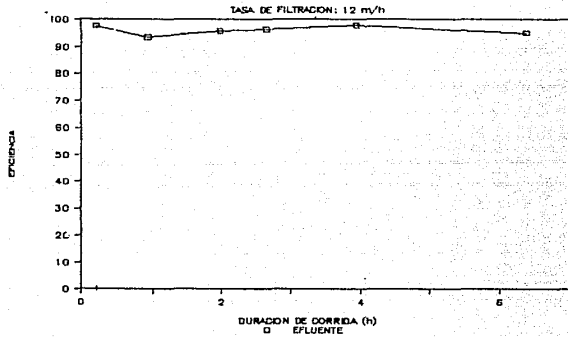




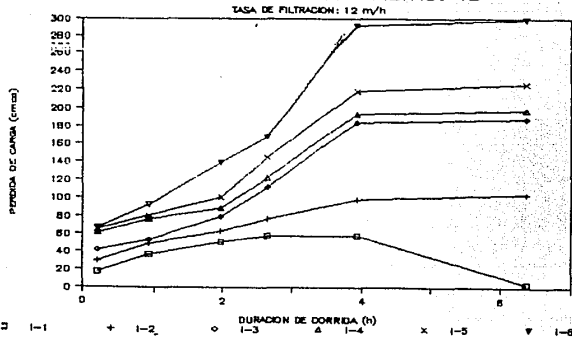
TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 1B



TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 1B



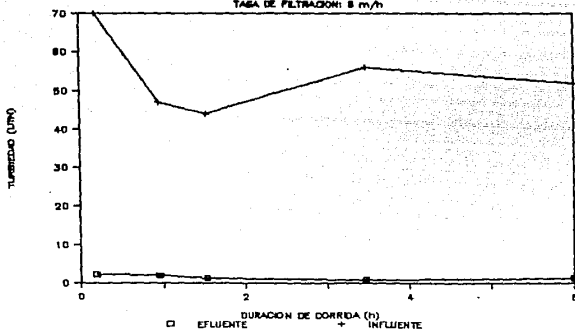
TURBIEDAD: 20 UTN FILTRO: 1B



TURBIEDAD: 50 FILTRO: 2B

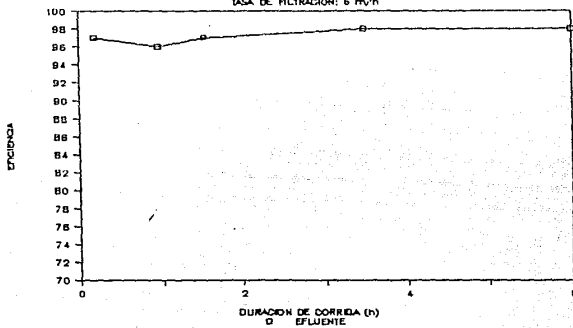
TASA DE FILTRACION: 6 m/h

117



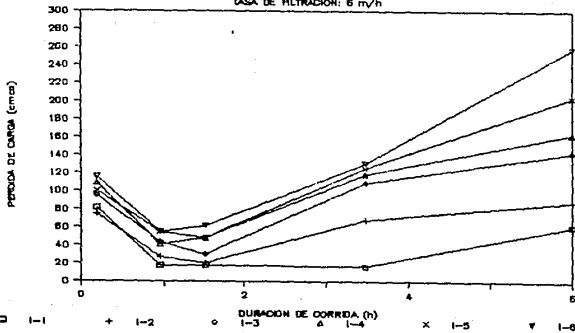
TURBIEDAD: 50 UTN FILTRO: 2B

TASA DE FILTRACION: 6 m/h



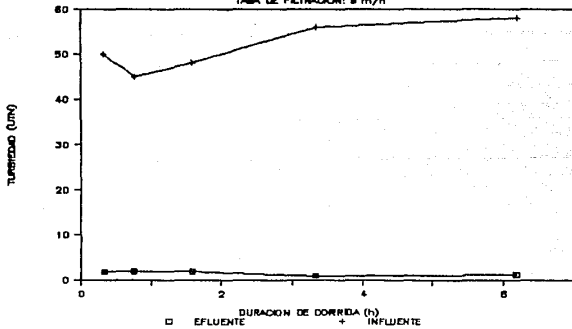
TURBIEDAD: 50 UTN FILTRO: 2B

TASA DE FILTRACION: 6 m/h



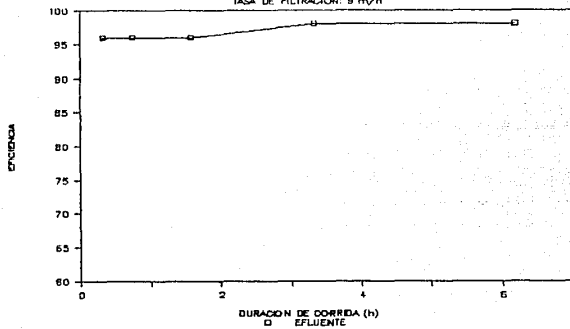
TURBIEDAD: 50 FILTRO: 2B

TASA DE FILTRACION: 9 m<sup>3</sup>/h



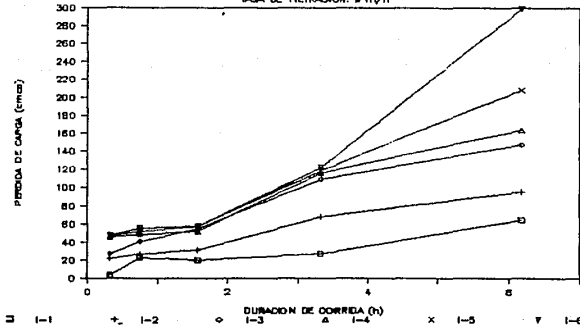
TURBIEDAD: 50 UTN FILTRO: 2B

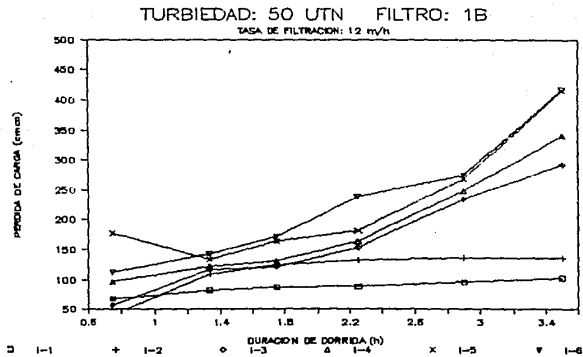
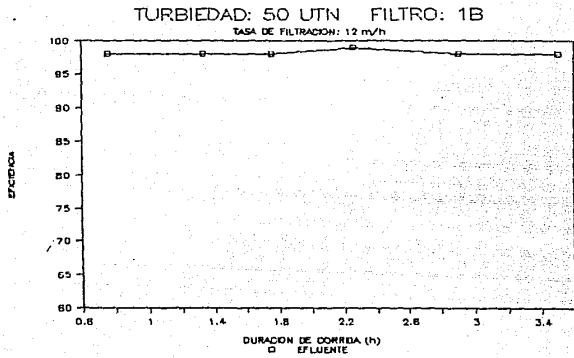
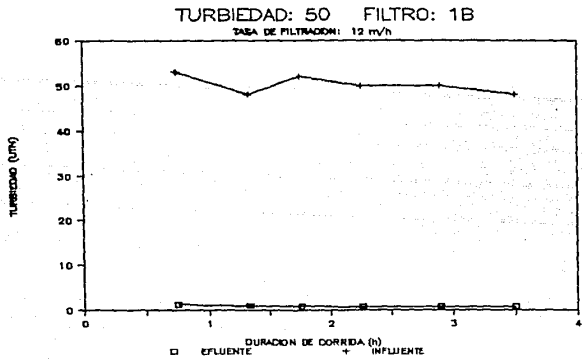
TASA DE FILTRACION: 9 m<sup>3</sup>/h



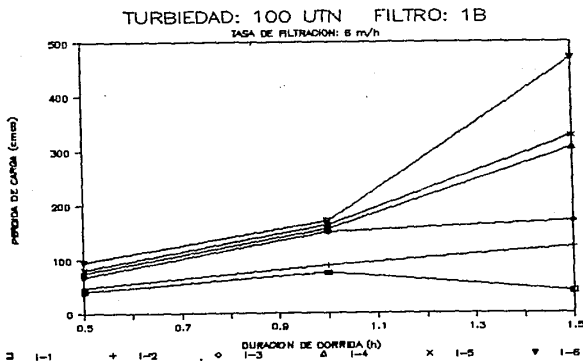
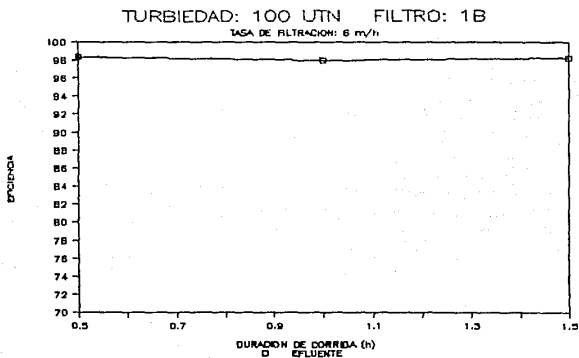
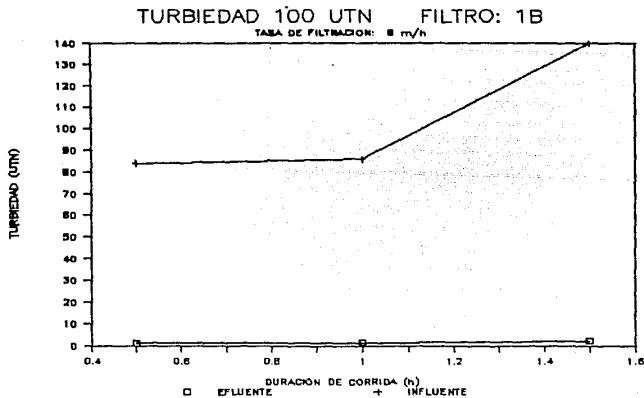
TURBIEDAD: 50 UTN FILTRO: 2B

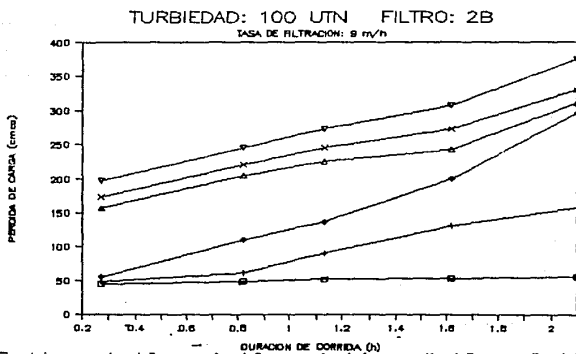
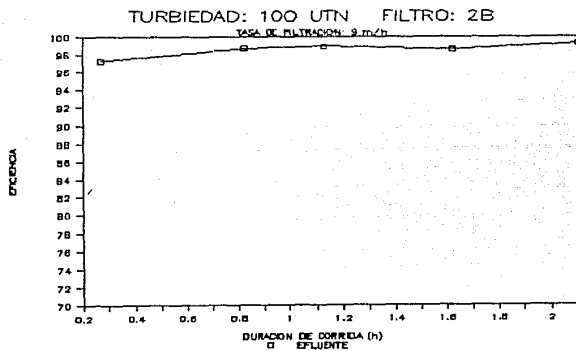
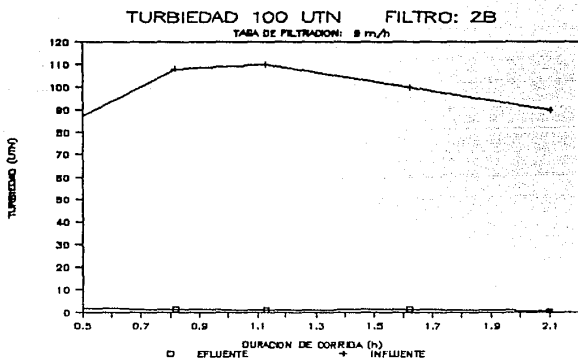
TASA DE FILTRACION: 9 m<sup>3</sup>/h





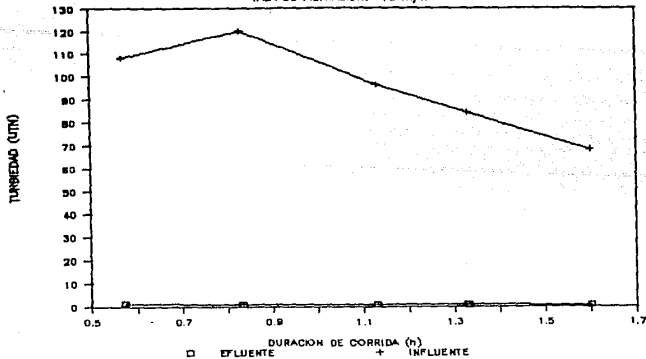






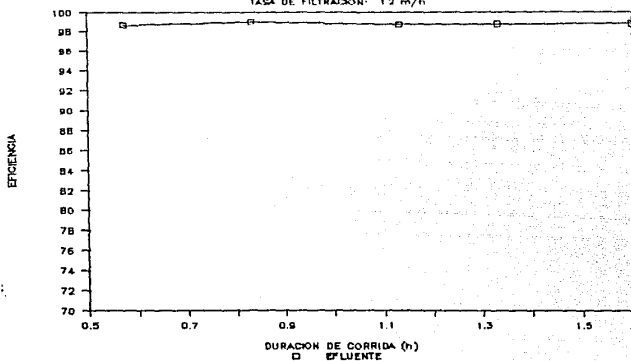
TURBIEDAD 100 UTN FILTRO: 1B

TASA DE FILTRACION: 12 m/h



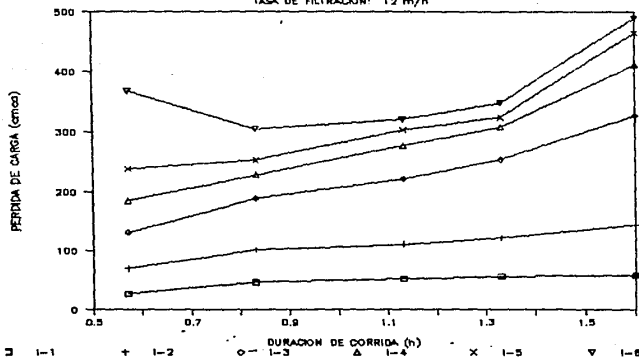
TURBIEDAD: 100 UTN FILTRO: 1B

TASA DE FILTRACION: 12 m/h



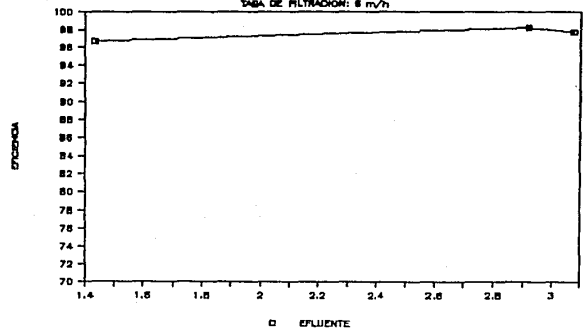
TURBIEDAD: 100 UTN FILTRO: 1B

TASA DE FILTRACION: 12 m/h



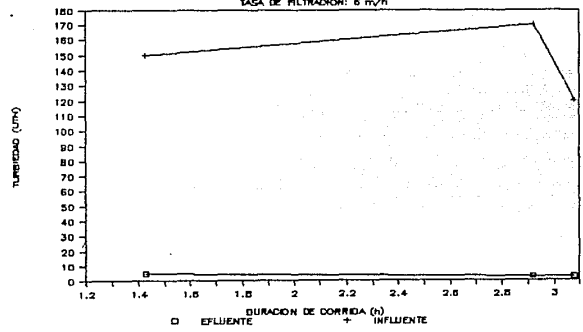
### TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 1B

TASA DE FILTRACION: 8 m<sup>3</sup>/h



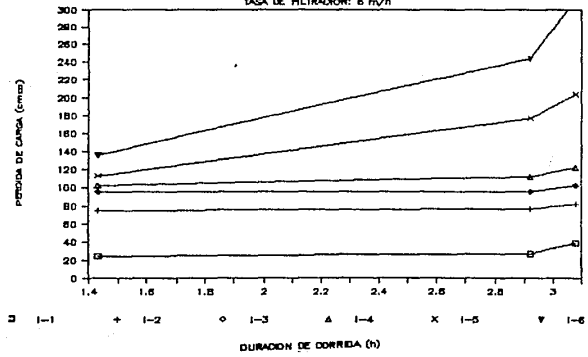
### TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 1B

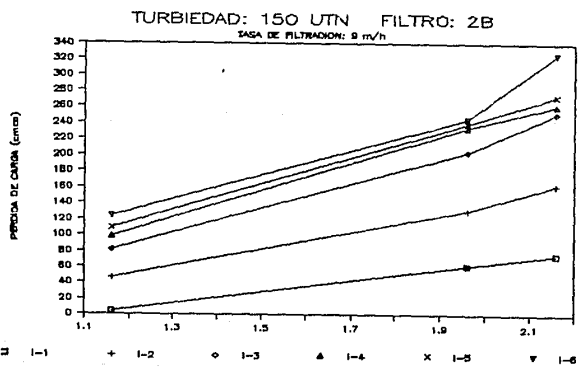
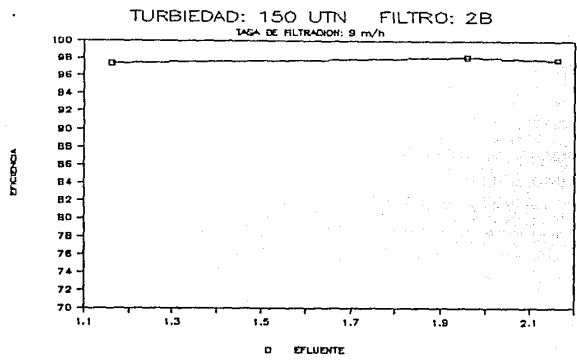
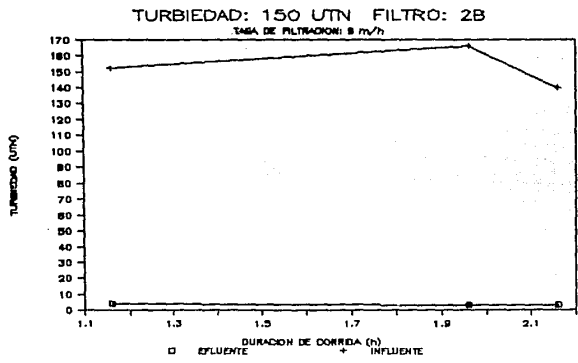
TASA DE FILTRACION: 8 m<sup>3</sup>/h



### TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 1B

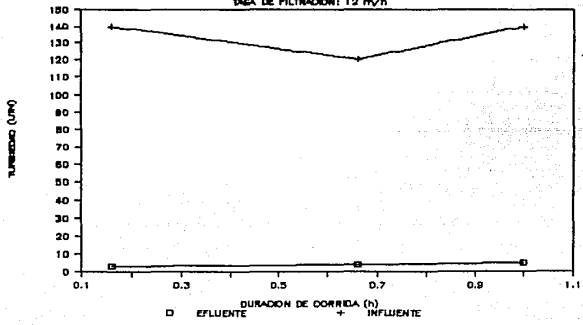
TASA DE FILTRACION: 8 m<sup>3</sup>/h



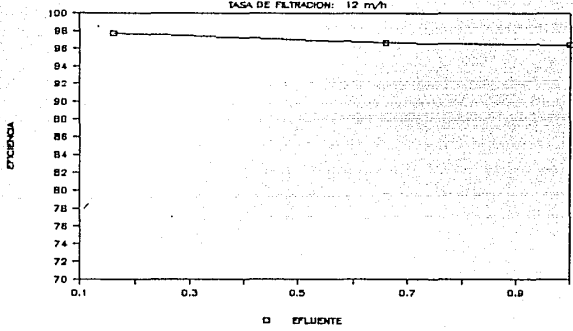


I-1    +    I-2    ◊    I-3    ▲    I-4    x    I-5    ▼    I-6

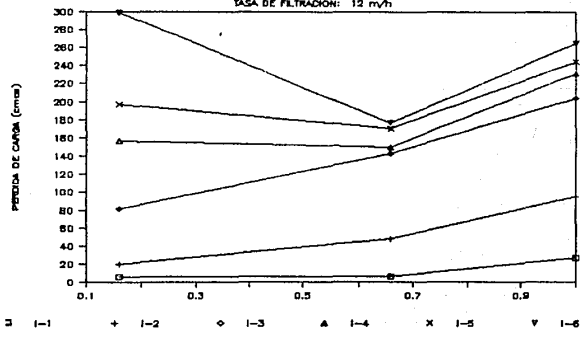
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 1B  
 TASA DE FILTRACION: 12 m<sup>3</sup>/h



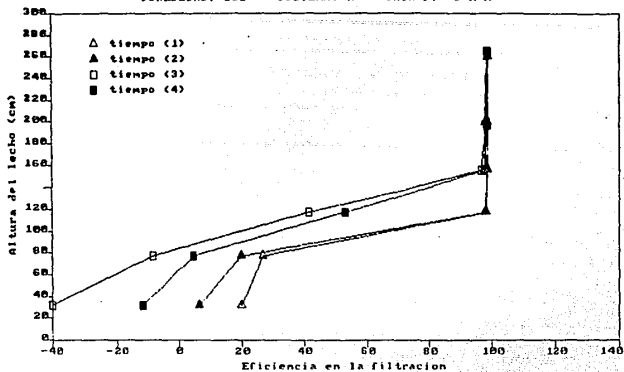
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 1B  
 TASA DE FILTRACION: 12 m<sup>3</sup>/h



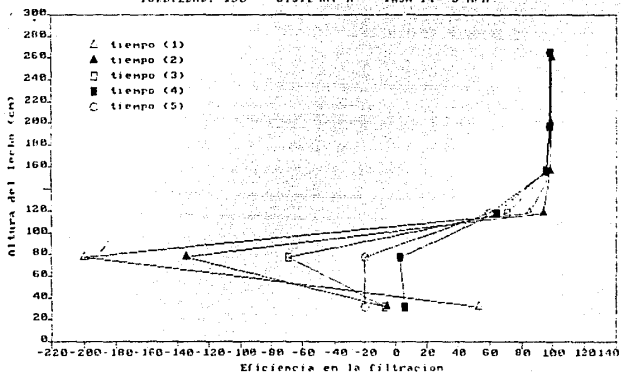
TURBIEDAD: 150 UTN FILTRO: 1B  
 TASA DE FILTRACION: 12 m<sup>3</sup>/h



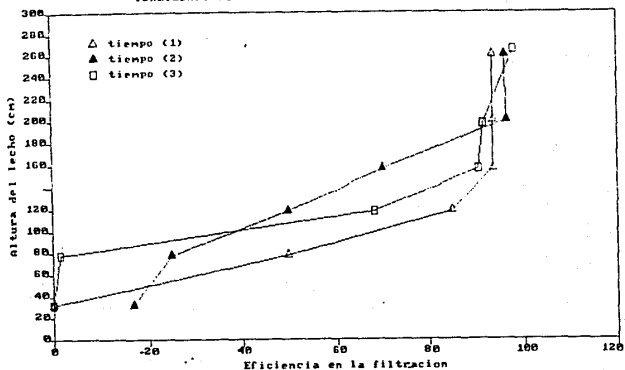
ANEXO H. Gráficas de eficiencia en función del  
espesor del medio filtrante.



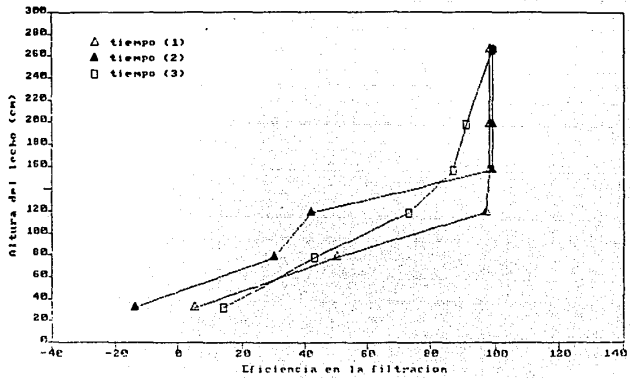
TURBIEDAD: 150 SISTEMA: A TASA F.: 9 m/h.



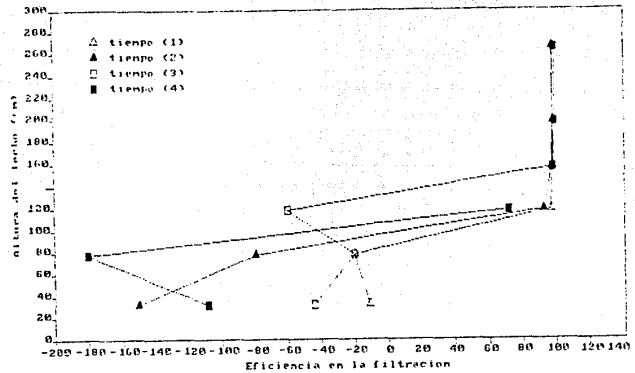
TURBIEDAD: 150 SISTEMA: A TASA F.: 12 m/h.



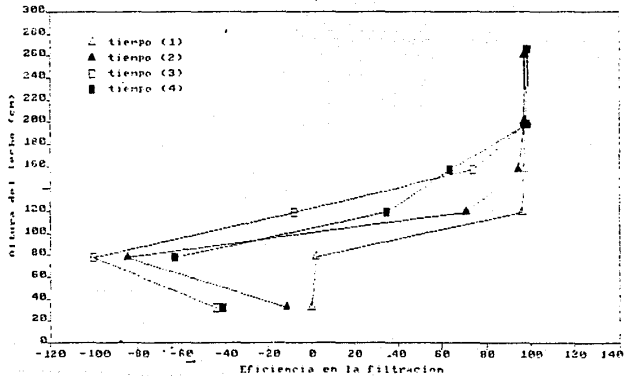


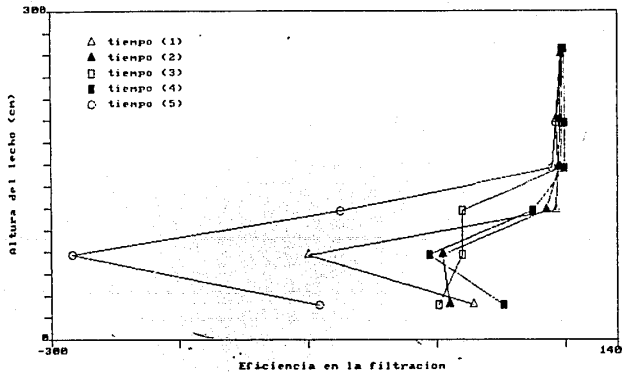
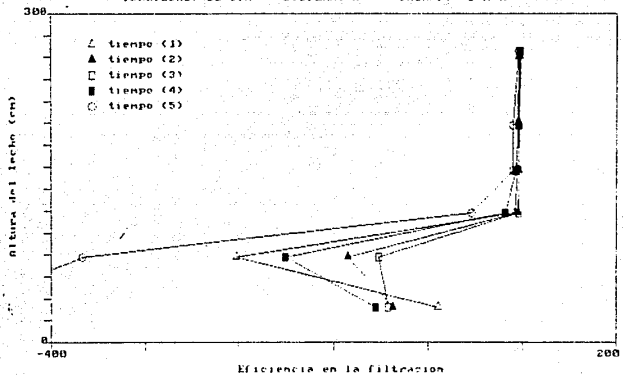
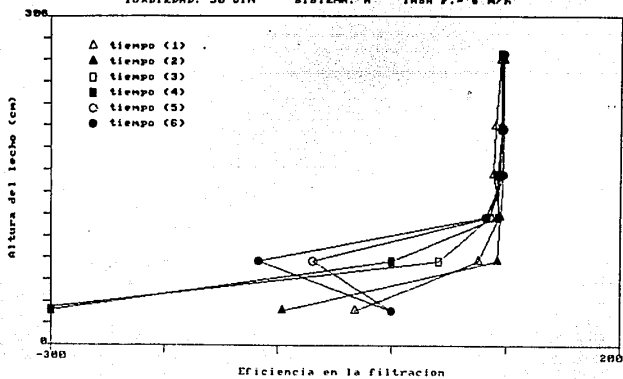


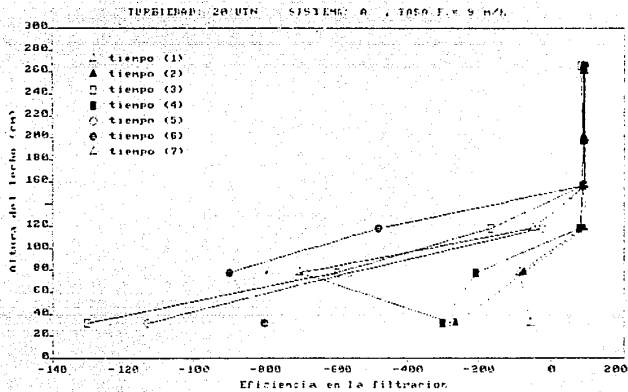
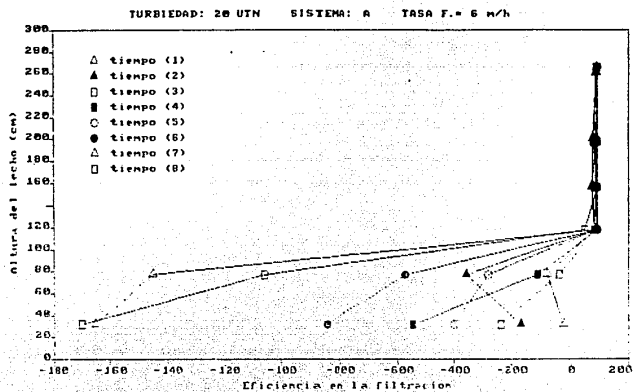
TURBIEDAD: 100 SISTEMA: A TASA F. = 9 m/h

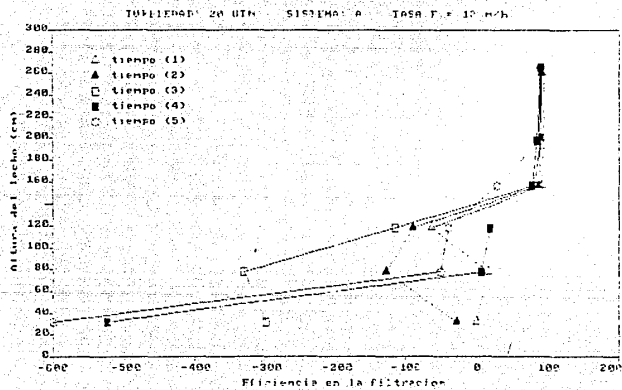
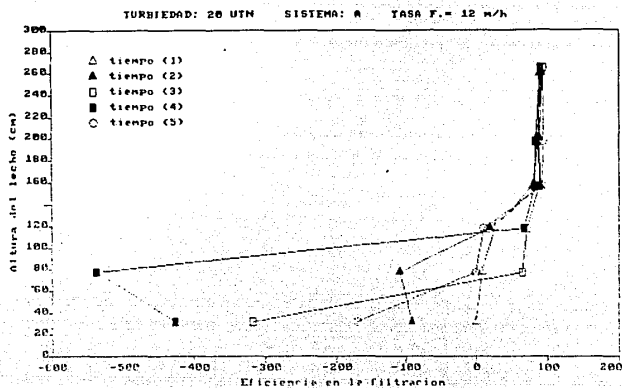


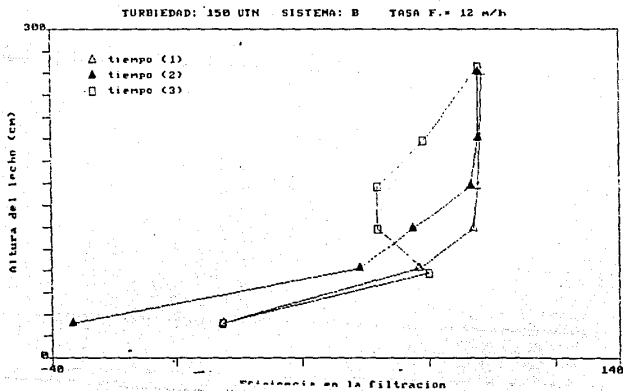
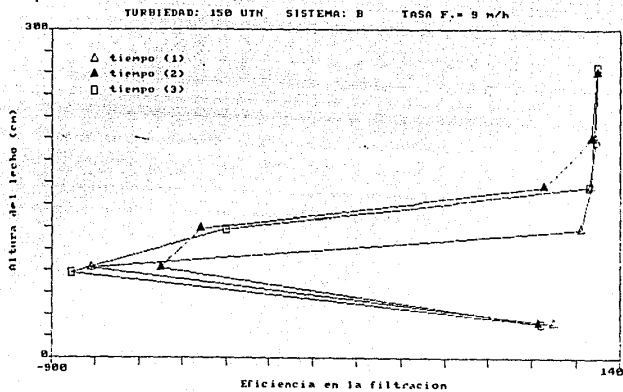
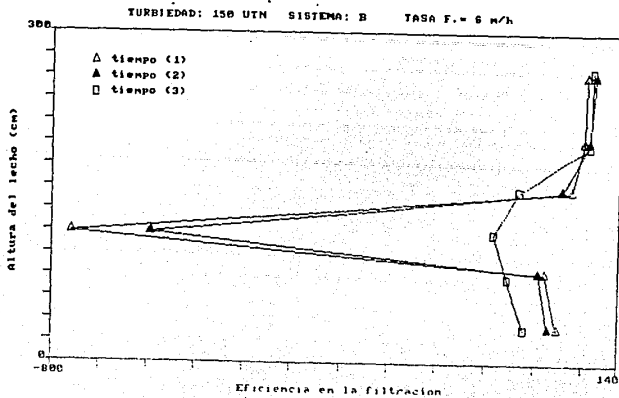
TURBIEDAD: 100 SISTEMA: A TASA F. = 12 m/h

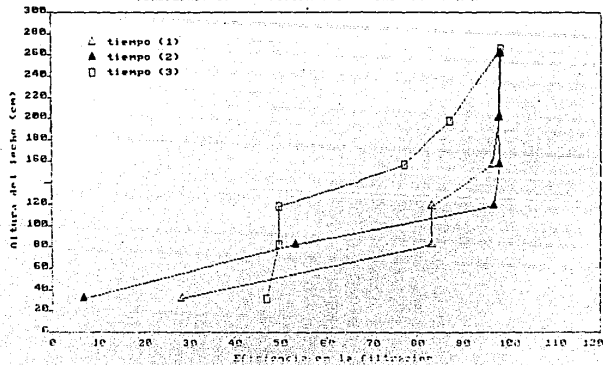




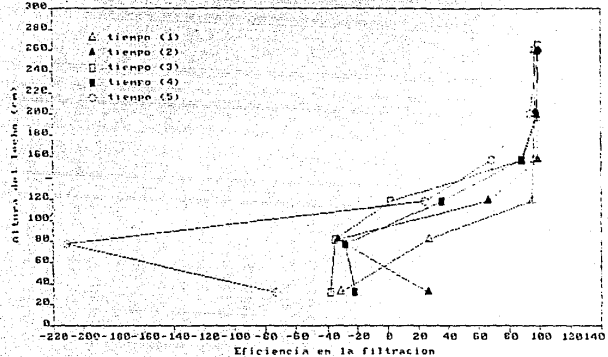




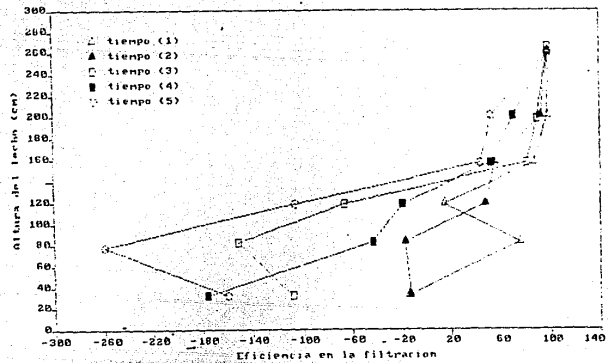


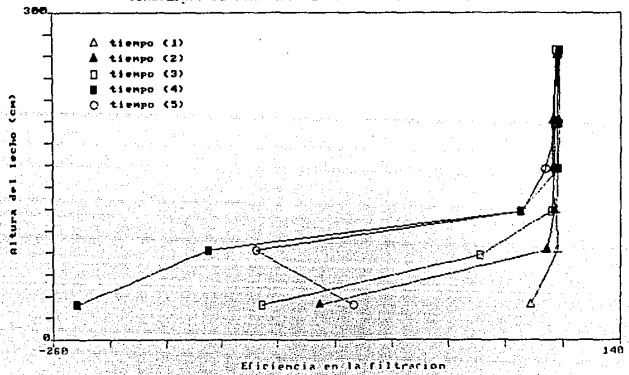


TURBIDAD: 100 SISTEMA: P TASA F. = 9 m/h

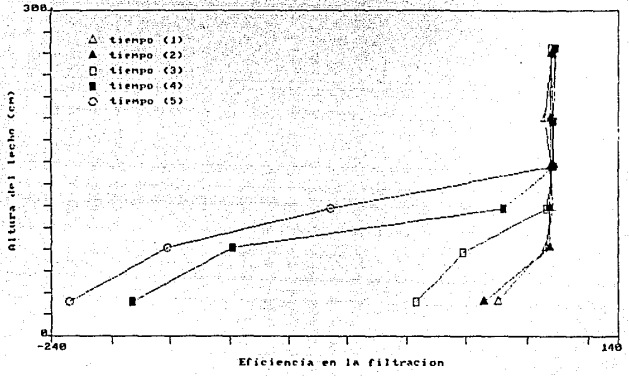


TURBIDAD: 100 SISTEMA: B TASA F. = 12 m/h

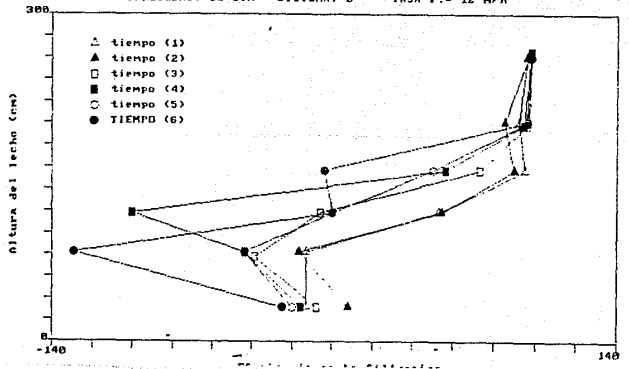


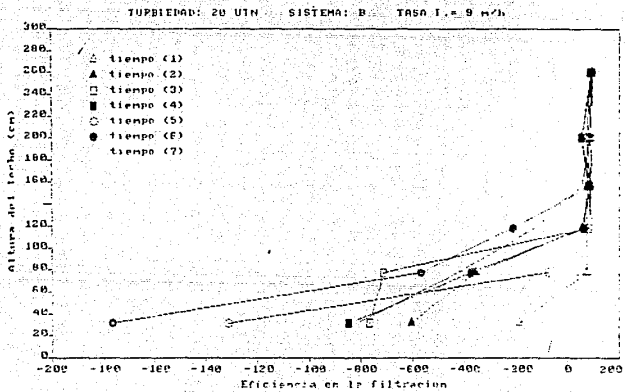
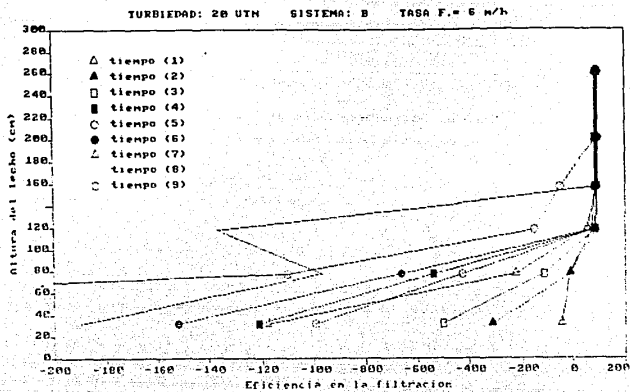


TURBIEDAD: 50 UNT SISTEMA: B TASA F. = 9 m/h

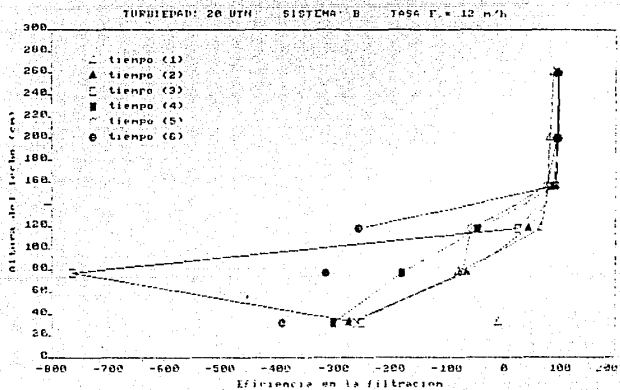
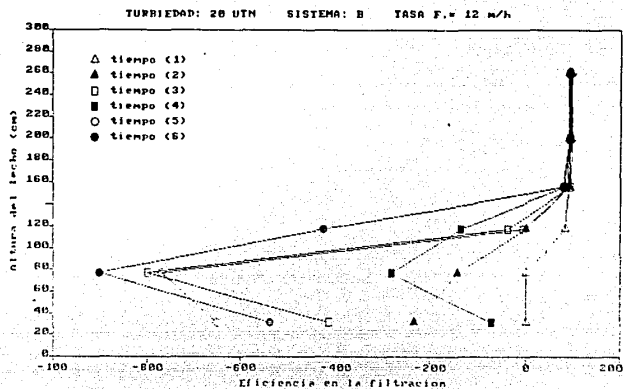


TURBIEDAD: 50 UNT SISTEMA: B TASA F. = 12 m/h

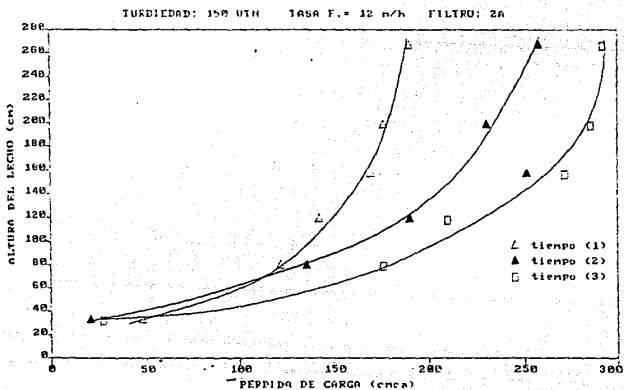
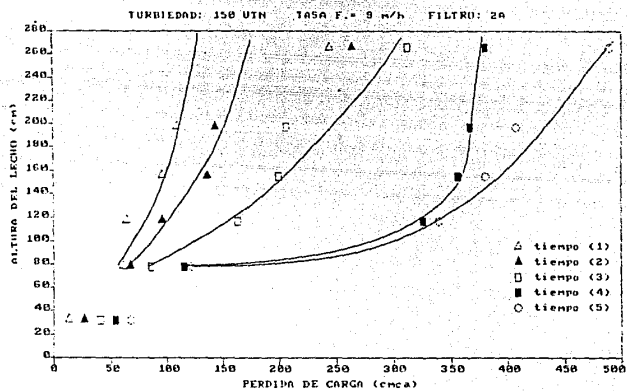
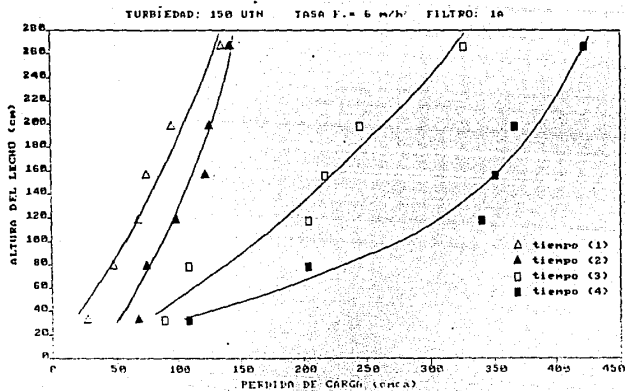


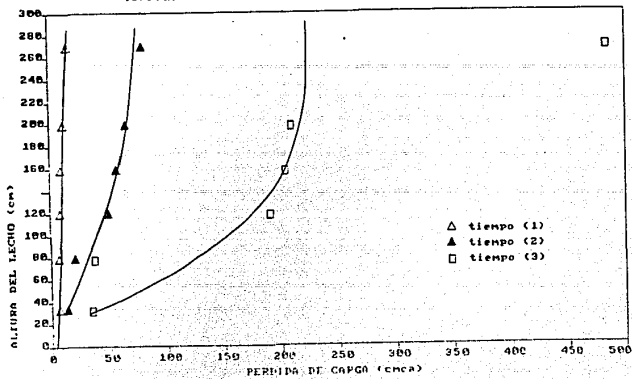




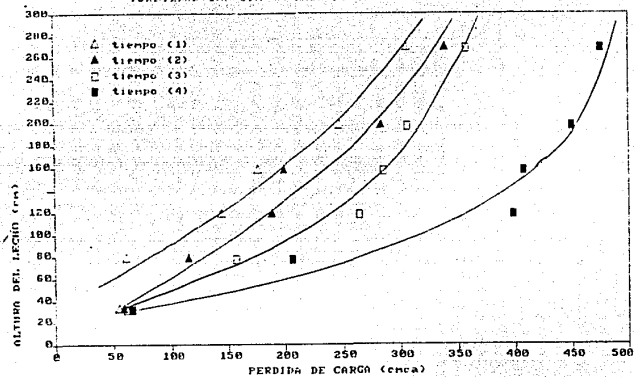


**ANEXO I. Gráficas de pérdida de carga  
en función del espesor de lecho.**





TURBIEDAD 100 UTM TASA F. = 9 m/h FILTRO: 1A



TURBIEDAD 100 UTM TASA F. = 12 m/h FILTRO: 2A

