

73

2 Ejen



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ANALISIS FUNCIONAL DE UN
FILTRO RAPIDO DE ARENA
CON GEOMETRIA CONICA

TESIS

Que Para Obtener el Titulo de:
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA:
MENDOZA ROSAS FULVIO



México, D.F.

1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA:

PRESIDENTE	<u>PROF: RAMON ARNAUD HUERTA</u>
VOCAL	<u>PROF: EDUARDO VEGA GONZALEZ</u>
SECRETARIO	<u>PROF: RODOLFO TORRES BARRERA</u>
1er. SUPLENTE	<u>PROF: HUMBERTO RANGEL DAVALOS</u>
2do. SUPLENTE	<u>PROF: VICTOR MANUEL LUNA PABELLO</u>

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CIUDAD UNIVERSITARIA

ASESOR DEL TEMA:

M. en I. EDUARDO VEGA GONZALEZ

SUPERVISOR TECNICO:

I. Q. GPE. JUDITH RAMOS HERNANDEZ

SUSTENTANTE:

FULVIO MENDOZA ROSAS

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A mis padres Leobardo y Carolina por permitirme la satisfacción de adquirir lo que me gusta, con el producto del esfuerzo de mi trabajo.

A los M. en I. Eduardo Vega y Ana Elisa Silva por ayudarme a aceptar y ejercer mi responsabilidad personal, y demostrarme que soy capaz de avanzar en la dirección que deseé.

A los I.Q. Hilario García G. y Judith Ramos H. por su ayuda incondicional y sus sabios consejos.

A Oscar Posadas por su gran colaboración y por verme hecho comprender que un amigo es una defensa sólida, y aquel que lo ha encontrado, ha encontrado un tesoro.

A mis hermanos Leo, Carlo, Marco, Tomás, Rosa y Luisa por ceer en mí, y hacerme ver que se necesita valor para ser lo que somos, y no pretender lo que no somos.

A los Maestros de la Facultad de Química de la UNAM por enseñarme que triunfar en la vida es hacer triunfar a los demás.

INDICE

	Pág
LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABLAS	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. TEORÍA DE LA FILTRACIÓN	7
2.1 Aspectos generales	7
2.2 Diferentes clasificaciones del proceso de filtración	8
2.2.1 Clasificación de acuerdo con el tratamiento previo que se le da al influente	8
2.2.2 Clasificación de acuerdo con la forma en que se retienen los sólidos	9
2.2.3 Clasificación dentro del campo de tratamiento de agua	9
2.2.4 Clasificación de filtros utilizados en tratamiento de lodos	19
2.3 Aplicación de la filtración al tratamiento de agua	21
2.3.1 Potabilización	21
2.3.2 Aguas residuales	22
2.4 Filtración rápida	25
2.4.1 Variables de filtración	26
2.4.2 Mecanismos de filtración	30
2.4.3 Hidráulica de flujo	38
2.4.4 Medio filtrante	41
2.4.5 Métodos de operación de filtros	45
2.4.6 Retrolavado	50

	Pág.
2.4.7 Parámetros de control de operación	51
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	52
3.1 Diseño de filtros piloto	52
3.1.1 Filtros cilíndricos	52
3.1.2 Filtros cónicos	54
3.1.3 Materiales empleados para la Construcción de los Filtros	58
3.2 Descripción de los modelos experimentales	58
3.3 Condiciones experimentales	61
3.3.1 Parámetros de operación	64
3.3.2 Parámetros de evaluación	65
3.3.3 Método de operación de los filtros piloto	67
3.3.4 Soporte y medio filtrante	67
3.3.5 Ejecución de experimentos	68
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
4.1 Duración de la corrida	79
4.2 Eficiencia de remoción de UTN	82
4.2.1 Eficiencia de remoción de UTN, como función de la tasa de filtración	82
4.2.2 Eficiencia de remoción de UTN en función de la geometría del filtro	82
4.3 Pérdida de carga	87
4.3.1 Relación de la pérdida de carga de los filtros cónicos y cilíndricos	89
4.4 Sólidos retenidos a través del Medio Filtrante	91
4.5 Lavado	92
4.5.1 Pérdida de arena durante el lavado	93
4.6 Cantidad de agua tratada	94

	Pág.
5. CONCLUSIONES	96
6. RECOMENDACIONES	98
7. BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	103
ANEXO 1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES	104
ANEXO 2. RESULTADOS DE EFICIENCIAS Y PÉRDIDAS DE CARGA	135
ANEXO 3. RESULTADOS DEL ANOVA	142
ANEXO 4. RESULTADOS DE SÓLIDOS RETENIDOS	150

LISTA DE FIGURAS

No. Figura		Pág.
2.1	Filtro lento con flujo ascendente	13
2.2	Filtro lento con flujo descendente	14
2.3	Filtro lento con flujo horizontal	15
2.4	Filtro rápido ascendente	17
2.5	Filtro rápido descendente	17
2.6	Filtro rápido de flujo mixto	18
2.7	Filtro rápido con lavado por sifón	18
2.8	Esquema de un filtro a presión	19
2.9	Remoción de partículas por cribado	32
2.10	Remoción por sedimentación	33
2.11	Contacto de partículas. Mecanismo de intercepción	35
2.12	Remoción por impacto inercial	36
2.13	Trayectoria de la partícula capturada por las fuerzas de Van Der Waals	37
2.14	Esquema explicativo de la acción de los polímeros en un medio granular	38
2.15	Evolución de la pérdida de carga	40
2.16	Distribución granulométrica	42
2.17	Disposición de un filtro de gravedad para el control del caudal por distribución del flujo de alimentación	47
2.18	Filtro de gravedad dispuesto para filtración con velocidad decreciente variable	49
3.1	Dimensiones de los filtros cilíndricos	53
3.2	Cono truncado	56
3.3	Dimensiones del filtro cónico de 80°	57

No. Figura		Pág.
3.4	Dimensiones del filtro cónico de 70°	59
3.5	(a) Estructura del cono de 80°. (b) Estructura de los filtros cilíndricos.	60
3.6	Estructura del filtro cónico de 70°	61
3.7	Esquema general del sistema de filtración	64
3.8	Método de operación de filtros piloto	68
3.9	Distribución granulométrica	71
3.10	Puntos de muestreo	73
3.11	Muestreador de arena	74
4.1	Efecto de la turbiedad del influente en la duración de la corrida de filtración	80
4.2	Efecto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción de UTN	83
4.3	Eficiencias de remoción de turbiedad del filtro cónico de 80° y del cilíndrico correspondiente	85
4.4	Eficiencias de remoción de turbiedad del filtro cónico de 70° y el cilíndrico correspondiente	87
4.5	Eficiencias de remoción de turbiedad del filtro cónico de 70° y 80° durante la corrida No. 7	88
4.6	Relación de la eficiencia de remoción de turbiedad y la pérdida de carga del filtro cónico 80° durante la corrida No. 4	89
4.7	Relación de la pérdida de carga entre el filtro conico 80° y el cilíndrico correspondiente en la corrida 3	90
4.8	Perfil de sólidos retenidos en el medio de los filtros cónico 70° y cilíndrico correspondiente en la corrida No. 15	92

LISTA DE TABLAS

No. Tabla		Pág.
2.1	Clasificación de filtros de tratamiento de agua	9
2.2	Clasificación y características de los filtros lentos	12
2.3	Características de los filtros rápidos	16
2.4	Principales variables de filtración	27
2.5	Clasificación y significado de las variables de filtración	29
2.6	Mecanismos de remoción	30
2.7	Tabla auxiliar para la construcción de la curva granulométrica	41
3.1	Equipo auxiliar y accesorios de filtros piloto	63
3.2	Tasas de filtración manejadas en los tres sistemas de filtración	66
3.3	Mallas empleadas en el estudio	69
3.4	Resultados granulométricos	70
4.1	Duración de las corridas de filtración	81
4.2	Eficiencias para filtros de distinta geometría	84
4.3	Cantidad de agua de lavado	94
4.4	Cantidad de agua tratada	95

1. INTRODUCCION

Los filtros inicialmente tuvieron carácter doméstico. Se utilizaron por mucho tiempo los filtros de piedras porosas colocados en tinajeros. En Francia se difundieron mucho en el siglo XVIII y XIX los filtros de esponjas, paños, lana y otros materiales. Cuando se hicieron los primeros filtros no domésticos, el agua filtrada no se distribuía por tuberías, sino que se vendía por galones al consumidor. Así surgieron las primeras Compañías de Agua que fueron de carácter privado. A partir de 1856, en Francia aparecieron los filtros a presión: "Fonvielle" y "Souchon". Los primeros estaban constituidos por un cono truncado de hierro fundido con tapa semiesférica, en el cual había 0.70 m de lecho filtrante compuesto de 0.25 m de esponjas marinas, 0.25 m de piedra caliza y 0.20 m de arena de río. Se lavaban extrayendo el material filtrante. Los segundos estaban constituidos por tres lechos de paño de 0.20 m de espesor. El objeto de estos filtros era el de colar los sedimentos del agua.

Fue en Inglaterra (Paisley, Escocia) en 1804, donde por primera vez se pensó en hacer una instalación de filtros para toda una población. Más tarde en 1829, en Londres (Chelsea) se construyó la primera planta de filtros lentos de arena hecha por "The Chelsea Water Work Co.". A medida que la demanda de agua filtrada aumentaba, se fue estudiando más a fondo el trabajo de los filtros y se halló, que ellos no sólo hacían un proceso de cribado sino que también transformaban la materia orgánica. Se formaron dos escuelas: los que creían en la filtración de arriba hacia abajo (descendente) y los que creían en la de abajo hacia arriba (ascendente). Los primeros argumentaban que al filtrar hacia abajo, la mayoría de la materia suspendida quedaba retenida en las primeras capas del lecho, lo que facilitaba la limpieza del filtro, pues bastaba raspar esas capas (procedimiento que todavía se utiliza en algunos filtros lentos). Los segundos decían que al filtrar hacia arriba a través de material cada vez más fino, la gravedad producía el asentamiento de la mayoría de las partículas en el fondo del filtro, y las restantes que alcanzaran a subir, podrían ser fácilmente lavadas invirtiendo el sentido del flujo. Lentamente se

impuso la primera escuela (Filtración descendente) y el uso de los filtros lentos de arena se popularizó tanto en Europa como en América. Con el advenimiento de la Microbiología se le fue dando cada vez mayor importancia al aspecto bacteriológico de la filtración, y ya a fines del siglo XIX muchas ciudades tanto del viejo como del nuevo mundo habían construido plantas de filtración.

El mejor conocimiento del proceso condujo al diseño de los filtros rápidos, que aparecieron en Norteamérica a mediados del siglo pasado, bajo patente. Se les llamó filtros "mecánicos" o "americanos" en contraposición a los "filtros ingleses" que eran los lentos. La gran innovación de los filtros rápidos fue en la limpieza del lecho filtrante, pues en vez de hacerse rascando la capa superior del mismo que era un sistema complejo y costoso, se hacía invirtiendo el sentido del flujo, que en el proceso de filtrado era de arriba hacia abajo y en el de lavado de abajo hacia arriba, con lo cual se eliminaban las impurezas que habían quedado retenidas en el lecho. Esto facilitaba la operación de los filtros haciéndola casi continua y permitía la utilización de tasas de filtración considerablemente mayores (aproximadamente 30 veces más) que las de los filtros lentos.

El primer filtro rápido lo construyó en los Estados Unidos, en la ciudad de Somerville en 1855, L. Smith Hyatt.

En los últimos setenta años, tanto la teoría como la práctica de la filtración se han venido desarrollando notablemente, pero sin que se le hayan hecho modificaciones sustanciales al proceso inicial.

No obstante los avances que se han logrado, persisten diversos problemas en el funcionamiento de los filtros, entre los cuales destacan:

- Escaso aprovechamiento del medio filtrante
- Pérdida de medio filtrante durante el lavado del filtro
- Mala calidad del efluente durante la fase inicial de operación del filtro

La hipótesis de Silva y Vega (1993), sustenta que estos problemas se derivan de la falta de dispositivos para controlar la velocidad de filtración y lavado en los filtros convencionales. Para este fin han propuesto el diseño de un filtro de geometría cónica, el cual permite que las velocidades de filtración y lavado se ajusten en función del área.

En teoría, el incremento de la velocidad que experimenta el fluido durante la filtración en este tipo de filtro, favorece la acción de los mecanismos de transporte y fijación, por lo que se espera un mayor aprovechamiento del espesor del medio filtrante. En el lavado, el flujo es ascendente y, por tanto, las velocidades decrecen al aumentar el área, se espera que esto favorezca la separación de los flóculos retenidos y evite la pérdida de arena.

El objetivo de este trabajo es la evaluación del funcionamiento de un filtro rápido de arena con geometría cónica respecto al filtro convencional.

El trabajo desarrollado consta de tres partes principalmente, siendo la primera una revisión bibliográfica sobre la filtración. La segunda parte consiste de la metodología experimental seguida para la evaluación del funcionamiento del filtro cónico. La última parte consiste del análisis de los resultados obtenidos; así como, las recomendaciones y conclusiones derivadas del estudio hecho.

2. TEORÍA DE LA FILTRACIÓN

La filtración es la separación de las partículas sólidas contenidas en un fluido, pasándolo a través de un medio filtrante, sobre el que se depositan los sólidos (McCabe & Smith 1981).

2.1 Aspectos generales

Es considerado que en la filtración intervienen dos fases, una integrada por un fluido, ya sea gas o líquido, y la otra, integrada por el conjunto de partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el fluido.

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

- a) Recuperar sólidos
- b) Recuperar el fluido
- c) Recuperar ambas partes
- d) Ser un pretratamiento para facilitar otras operaciones como un lavado de materiales solubles depositados en los sólidos, una cristalización, etc.

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

2.2 Diferentes clasificaciones del proceso de filtración

Dada la diversidad de aplicaciones que se le puede dar a este proceso, en la literatura se encuentran clasificaciones muy diferentes; por lo que, a continuación sólo se presentan las principales maneras de clasificar los filtros.

2.2.1 Clasificación de acuerdo con el tratamiento previo que se le da al influente

De acuerdo con este tipo de criterio existen dos tipos de filtración: la directa y la convencional.

2.2.1.1 Filtración directa

La filtración directa es definida como una serie de procesos unitarios, incorporando la coagulación, floculación y filtración sin la necesidad de utilizar la sedimentación, Carol & Rhodes (1980).

Los sólidos presentes en las aguas, así como los agregados a ella (alumbre, polímeros, carbón activado, etc.) son retenidos en el medio filtrante. En este caso se recomienda tener un diámetro de grano muy grande para disminuir la pérdida de carga, así como añadir el coagulante al influente inmediatamente antes de entrar al filtro para lograr una mejor adhesión de las partículas a los granos del medio.

2.2.1.2 Filtración convencional

El agua debe recibir el esquema habitual de tratamiento, es decir: coagulación, floculación y sedimentación. Se puede utilizar un medio único de arena, medios duales (arena-antracita) o medios múltiples (arena-antracita-granate).

2.2.2 Clasificación de acuerdo con la forma en que se retienen los sólidos

Se distinguen dos tipos: la filtración superficial y la filtración en profundidad.

2.2.2.1 Filtración superficial (sobre membrana)

En este caso el objetivo es retener en superficie las partículas y microorganismos, para ellos se emplea un medio poroso poco profundo como soporte. Ejemplo de este tipo de filtros son los filtros de mallas de rejilla, de discos o tambores, los filtros prensa, el filtro al vacío, etc. (Degrémont, 1979).

2.2.2.2 Filtración a profundidad

Este tipo de filtros se emplean comúnmente para el tratamiento del agua. La retención de sólidos se realiza en todo el cuerpo del filtro el cual se compone de material granular.

2.2.3 Clasificación dentro del campo de tratamiento de agua

Los filtros más comúnmente utilizados son los de medio granular. En este caso su

clasificación se realiza de acuerdo con la fuerza impulsora en: filtros a gravedad (o filtros a cielo abierto) y filtros a presión. Posteriormente los filtros se pueden subdividir tomando en cuenta el sentido del flujo. En la TABLA 2.1 se representa la clasificación para los filtros de tratamiento de agua (Arboleda, 1973).

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE FILTROS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Según la velocidad de filtración	Según el medio filtrante	Según el sentido del filtro	Según la carga sobre el lecho
Rápidos	1. Arena	Ascendente	Por gravedad
	2. Antracita	Descendente	Por presión
	3. Mixtos: antracita y arena		
	4. Mixtos: arena, antracita, granate	Flujo mixto	
Lentos	Arena	Descendente	Por gravedad
		Ascendente	

2.2.3.1 Filtros a gravedad

En estos filtros la acción de la gravedad es la fuerza impulsora. La columna de líquido acumulada sobre el medio provoca el paso del agua a través de él.

Los filtros a gravedad se emplean tanto en plantas de aguas residuales como en plantas de agua potable. Según donde se sitúe dentro del proceso su tratamiento puede ser primario, secundario o terciario. Estos filtros pueden trabajar a distintos intervalos de velocidad por lo que existen filtros lentos y filtros rápidos.

- a) Filtros lentos. Estos filtros trabajan a velocidades de filtración entre 0.08 a 0.58 m/h (2 a 14 m³/m²d). Se clasifican a su vez de acuerdo con el sentido del flujo en: de flujo ascendente, de flujo descendente y flujo horizontal. Las principales condiciones de operación para los filtros lentos son mencionadas en la TABLA 2.2. En las figuras 2.1, 2.2 y 2.3 se muestran los esquemas de este tipo de filtros.

- b) Filtros rápidos. En este caso la velocidad de filtración se sitúa dentro del intervalo de 5.0 a 15 m/h (120-360 m³/m²d). Los filtros rápidos se clasifican de acuerdo con el sentido del flujo: en flujo ascendente, de flujo descendente, de flujo mixto y lavado por sifón. En la TABLA 2.3 se presentan las condiciones de operación y en las figuras 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 los esquemas respectivos.

TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS FILTROS LENTOS

CONDICIÓN DE OPERACIÓN	ASCENDENTES	DESCENDENTES	HORIZONTAL
-Tratamiento previo del agua	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL	CONVENCIONAL
-Velocidad de filtración (m/h)	0.11 - 0.15	0.25 - 0.58	0.08 - 0.58
-Carga hidráulica (m ³ /m ² d)	2.7 - 3.6	6 - 14	2 - 14
-Profundidad del medio			
Arena(m)	0.9 - 1.1	0.9 - 1.2	0.9 - 0.1
Grava (m)	0.3 - 0.45	0.4 - 0.45	0.4 - 0.45
-Características del medio			
Arena			
Talla efectiva (mm)	0.3	0.15 - 0.35	0.35 - 4
Coefficiente de uniformidad	1.7 - 2	1.5 - 3	1.5 - 3
-Pérdida de carga hidrostática (m)	0.35 - 1.2	0.2 - 1.5	

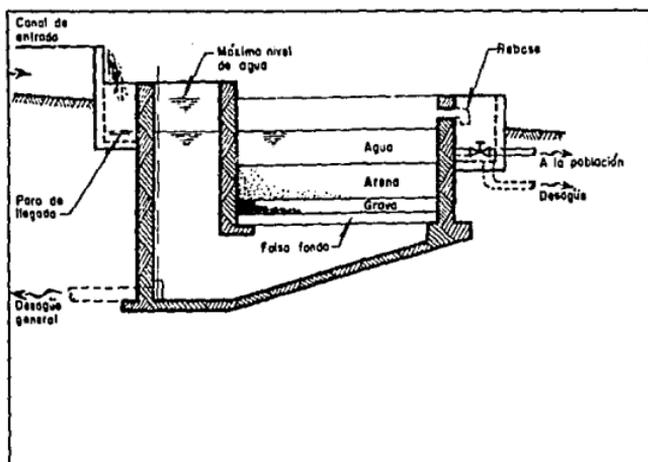
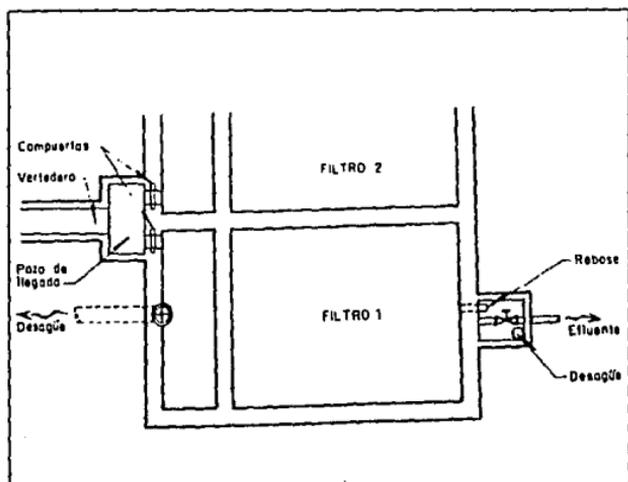


FIG. 2.1 Filtro lento con flujo ascendente

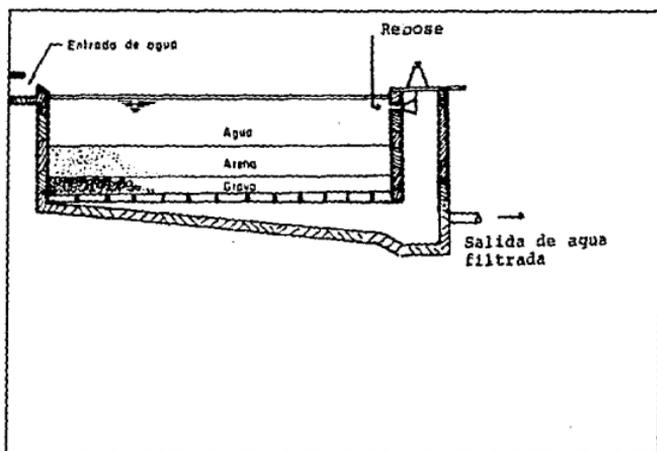
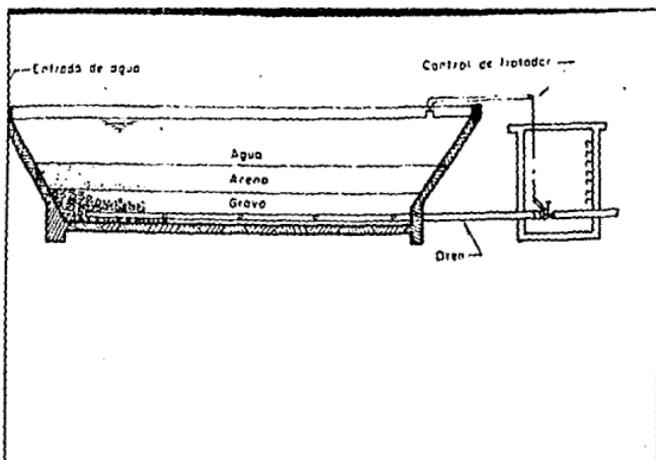


FIG. 2.2 Filtro lento con flujo descendente

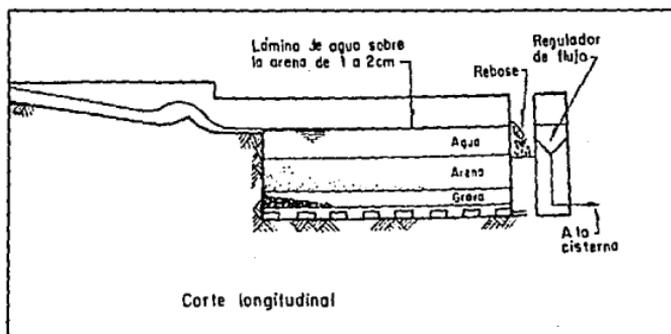
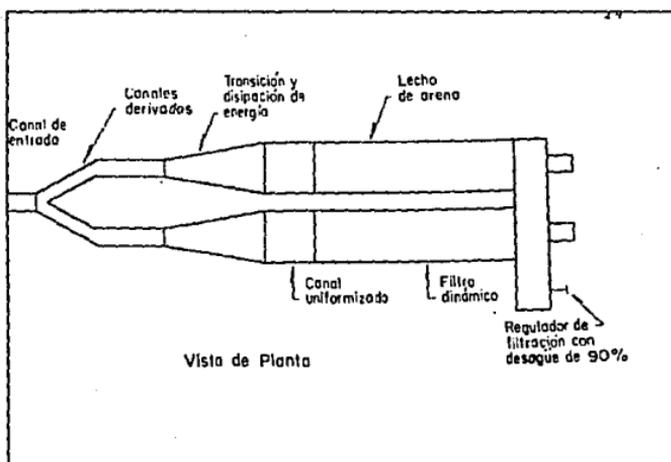


FIG. 2.3 Filtro lento con flujo horizontal

TABLA 2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS FILTROS RÁPIDOS

CONDICIÓN POR OPERACIÓN	ASCENDENTES	DESCENDENTES	FLUJO MIXTO	LAVADO POR SIFÓN
- Tratamiento previo del agua	Convencional Directo	Convencional, Directo	Convencional	Convencional
- Velocidad de filtración (m/h)	4.8 - 7.2	2.0 - 6.7 10 - 25	4.8 - 19.4	10
- Carga hidráulica (m ³ /m ² /d)	114 - 172	90 - 160 240 - 600	114 - 465	240
- Profundidad del medio				
Antracita (m)	—	— 0.45 - 0.60	0.45 - 0.80	
Arena (m)	0.25 - 2.0	0.6 - 0.75 0.15 - 0.30	0.30 - 0.45	0.6
Grava (m)	0.35 - 0.4	0.3 - 0.45 0.30 - 0.45	0.07 - 0.075	
- Características del medio				
Antracita				
Talla efectiva (mm)	—	— 0.8 - 2	0.9 - 1.1	0.6 - 0.88
Coeficiente de uniformidad	—	— 1.3 - 1.8		
Arena efectiva (mm)				
Coeficiente de uniformidad	0.9 - 1.1 2.0 - 5.0	0.35 - 0.7 0.4 - 0.8 < 1.7 1.2 - 1.6	0.35 - 0.7 < 1.7	0.35 - 0.7 < 1.7
- Pérdida de carga hidrostática (m)	1.8 - 6.09			

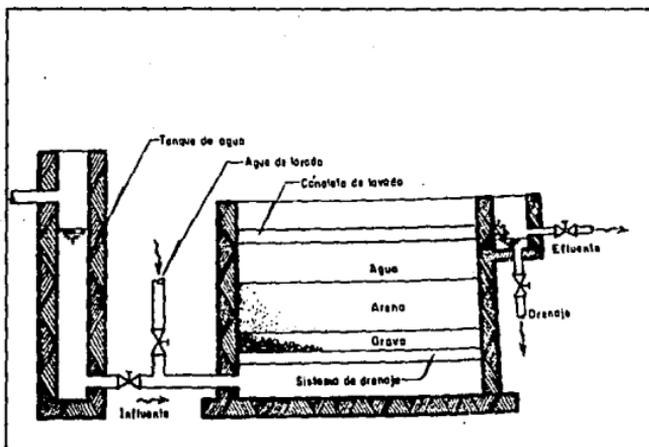


FIG. 2.4 Filtro rápido ascendente

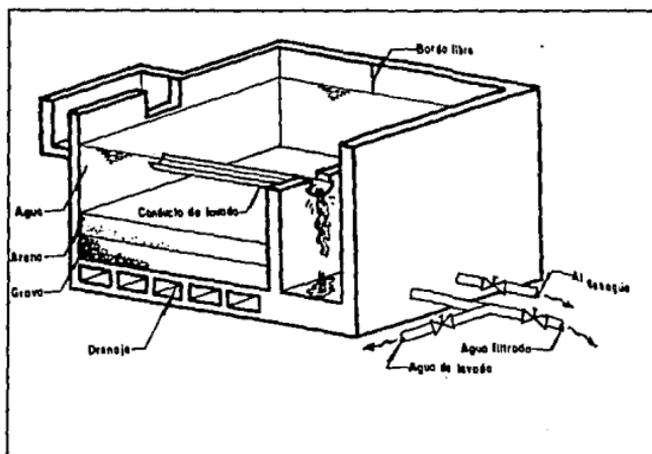


FIG. 2.5 Filtro rápido descendente

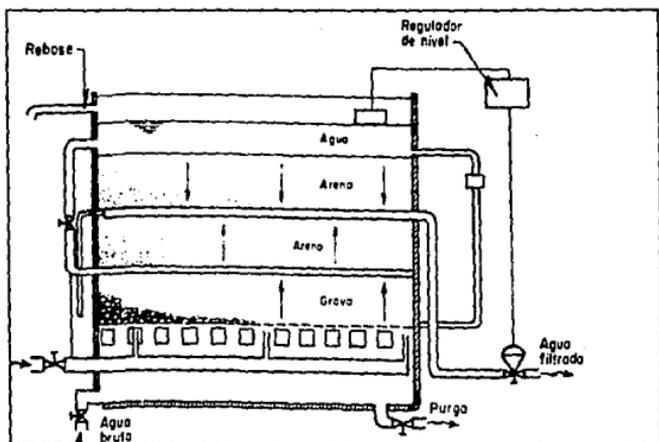


FIG. 2.6 Filtro rápido de flujo mixto

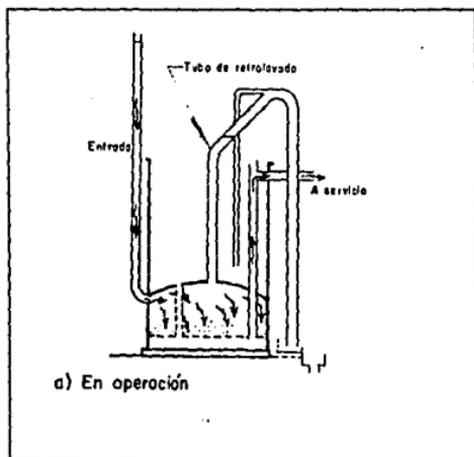


FIG. 2.7 Filtro rápido lavado por sifón

2.2.3.2 Filtros a presión

Estos filtros se encuentran en tanques metálicos totalmente cerrados donde la fuerza impulsora es ejercida por la presión de bombeo. La selección de la talla efectiva del medio y su altura depende de la velocidad de filtración, de la pérdida de carga hidrostática y el tamaño de partícula que será filtrada.

Estos filtros trabajan con altas pérdidas de carga (entre 2 y 19 m.c.a.) y velocidades de filtración de 5 a 50 m/h. La figura 2.8 muestra un filtro a presión clásico.

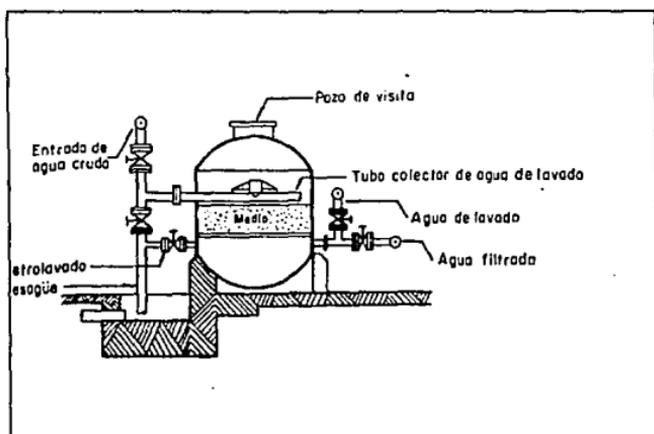


FIG. 2.8 Esquema de un filtro a presión

2.2.4 Clasificación de filtros utilizados en tratamiento de lodos

El tratamiento de lodos producidos en una planta comprende los siguientes pasos: concentración de lodos, estabilización, acondicionamiento, deshidratación, degradación y reducción térmica.

Los filtros tienen una amplia aplicación para la deshidratación ya que eliminan el grueso del agua contenida en los lodos. Los filtros más utilizados son filtros al vacío, o bien, filtros prensa. La selección de cada equipo depende de las características específicas del lodo producido en la planta.

2.2.4.1 Filtros al vacío

Comúnmente son de dos tipos: de tambor rotatorio simple o de tambor rotatorio con sistemas de transmisión.

El medio filtrante es malla de alambre, resorte enrollado o tela. Su funcionamiento se basa en que, por el vacío, se hace que se adhieran los lodos al medio filtrante que se encuentra en un tambor giratorio.

2.2.4.2 Filtros prensa

Este tipo de filtro utiliza un sistema de placas y marcos sobre los cuales se encuentra el medio filtrante (lona, tela sintética o malla de alambre).

El principio de operación se basa en ejercer una presión por medio de un tornillo

manual o dispositivos de cierre hidráulico o eléctrico sobre las placas y los marcos cargados de lodo húmedo. La presión fuerza a los lodos a adherirse sobre el medio y al agua a ser drenada.

2.3 Aplicación de la filtración al tratamiento de agua

2.3.1 Potabilización

La filtración es uno de los procesos de tratamiento más antiguos; en un inicio tuvo un carácter puramente doméstico al colocar piedras porosas en tinajas y hacer fluir el agua a través de ellas. Posteriormente, se construyeron los primeros filtros industriales cuyo filtrado era envasado para su venta. De esta forma, surgieron en Europa las primeras compañías de agua de carácter privado.

La primera planta de filtros lentos de arena se construyó en Londres en 1829, por "The Chelsea Water Work Co.". En 1856 en Francia aparecieron los filtros a presión (Fonvielle y Scuchon) cuyo objetivo era el de colar los sedimentos del agua.

El mejor conocimiento del proceso condujo al diseño de los filtros rápidos, que aparecieron en Norteamérica a mediados del siglo pasado. A estos filtros se les llamó "mecánicos" o "americanos" y su principal innovación radicaba en que la limpieza del medio filtrante se hacía por inversión del sentido del flujo, mientras que en los filtros lentos "filtros ingleses" se realizaba por raspado de la superficie del medio. El sistema de retrolavado facilitó la operación continua del filtro y permitió

el uso de cargas superficiales mayores que la de los filtros lentos. Posteriormente en Bélgica, Alemania y Francia el sistema de coagulación-filtración fue adoptado pero resulto que los filtros se tapaban con demasiada frecuencia (por la falta de un sistema de sedimentación adecuado) sobretodo, cuando la concentración de sólidos en el influente era muy alta. Lo anterior obligaba a gastar mucha agua tratada para el lavado. Fue entonces que en 1880 en Holanda B. Salbach construyó como pretratamiento un sistema de sedimentadores (coagulación con sulfato de aluminio). Con esta idea en 1898, en Estados Unidos, se introdujo un sistema de coagulación y sedimentación en tanques separados para remover la mayoría de las partículas sedimentables antes de llegar a los filtros rápidos. Aparece así la concepción de las plantas de potabilización modernas, en las que todos los tratamientos son preparativos o complementarios a la filtración, y cuyos principios se han aplicado al tratamiento del agua residual.

2.3.2 Aguas residuales

La filtración de aguas residuales se puede realizar tanto con efluentes primarios como secundarios, en éste último caso se denomina también filtración terciaria.

Aunque los principales diseños de filtración terciaria son similares a los sistemas de filtración de agua potable existen ciertas diferencias que requieren especial atención:

- La concentración del influente para instalaciones de tratamiento terciario no

es constante y depende de la operación del proceso anterior.

- La naturaleza de las partículas a remover difiere. En agua potable las partículas son coloidales y contienen material inorgánico, en tanto que, en la filtración terciaria son principalmente de origen orgánico.
- La confiabilidad del sistema y la calidad del efluente tratado es más baja que en los sistemas de agua potable.
- Una especial consideración debe darse a la formación de aglomerados con grasa y microorganismos en el medio filtrante ("mud balls"). Esto comúnmente es originado por lavados incompletos que provocan en la práctica el incremento de la pérdida de carga, un decremento de la duración de carreras y la baja relación filtrado-lavado.

2.3.2.1 Filtración de efluentes primarios

Aunque la filtración de agua residual se ha limitado al tratamiento de efluentes secundarios, el desarrollo de filtros de lecho pulsante ha sido la causa de que la filtración de efluentes primarios se comience a practicar.

El problema principal de la filtración de efluentes primarios sedimentados es la alta concentración de sólidos suspendidos (del orden de 100 mg/l), causa principal del desarrollo de las pérdidas de carga; además la presencia de lama biológica y grasa formadora de bolas de lodo han favorecido este problema.

Los filtros de lecho pulsante especialmente concebidos para este caso cuentan con las características siguientes:

- Pulsación periódica de aire sobre el medio para separar y redistribuir los sólidos retenidos en las capas superiores del filtro. La rapidez del desarrollo de la pérdida de carga decrece de esta forma logrando que la duración de la carrera se incremente en más de cuatro veces, como resultado.
- Introducción de un ciclo de limpieza químico como parte de un programa rutinario de mantenimiento para evitar la formación de aglomerados. El medio pulsante es inundado con blanqueador y detergente en solución. Después de 30 min el filtro es lavado, la grasa y lama biológica acumulada dentro del medio filtrante son eliminadas.

2.3.2.2 Filtración de efluentes secundarios

De la distribución del tamaño de las partículas observadas en un efluente sedimentado de una planta a escala piloto de lodos activados con tiempo de retención celular de 10 días, se observó que las partículas se agrupan en dos intervalos caracterizados por un diámetro equivalente. El intervalo de partículas pequeñas va de 1 a 15 μ (con tamaño promedio de 3 a 5 μ) y el de partículas grandes de 50 a 160 μ (con tamaño promedio de 80 a 90 μ). Metcalf & Eddy (1979) señalan que existen pocas partículas cercanas a 500 μ , y que además estas se caracterizan por ser ligeras.

En peso, la fracción de las partículas pequeñas va de 40 a 60 % del total. Este porcentaje varía dependiendo de las condiciones de operación de los procesos biológicos y el grado de floculación logrado en el sedimentador secundario.

El hecho de tener una distribución bimodal implica que el mecanismo de remoción de partículas de 1μ será diferente de las de 80μ .

2.4 Filtración rápida

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

Durante la filtración el depósito del material se efectúa como una cubierta alrededor de los granos de arena, lo que hace disminuir la porosidad del lecho (Camp, 1964). La mayor parte de los sólidos son retenidos en las capas superiores del medio (aún si se utilizan velocidades de filtración elevadas).

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

(Degrémont, 1973).

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

2.4.1 Variables de la filtración

Los principales parámetros que afectan el fenómeno de la filtración (Ives, 1965 y Deb, 1969) se presentan en la TABLA 2.4. Estas variables tienen un papel importante dentro de la operación ya que si se logra un buen control de ellas se obtendrán efluentes de buena calidad.

2.4.1.1 Variables relacionadas con las características del medio filtrante

La principal característica del medio filtrante es la distribución del tamaño del grano ya que determina el rendimiento de operación de la filtración, la pérdida de carga del medio y su evolución a lo largo de la corrida del filtro. Si el medio filtrante es demasiado pequeño se empleará mucha fuerza para vencer la resistencia del medio; en caso contrario si el tamaño del medio es demasiado grande, las partículas pequeñas del influente pasarán directamente a través del filtro.

TABLA 2.4 PRINCIPALES VARIABLES DE FILTRACIÓN

Características del medio	Características de las partículas suspendidas	Características del líquido filtrado	Características de operación
<ul style="list-style-type: none"> -Espesor -Forma -Porosidad -Tamaño efectivo -Coeficiente de uniformidad -Características de superficie 	<ul style="list-style-type: none"> -Tamaño -Forma -Densidad -Concentración -Porosidad del depósito 	<ul style="list-style-type: none"> -pH -Temperatura -Concentración de sólidos -Turbiedad 	<ul style="list-style-type: none"> -Tasa de filtración -Pérdida de carga -Método de operación

2.4.1.2 Variables que afectan las condiciones de operación en forma directa

Estos parámetros son los que determinan la duración de las corridas y se describen brevemente a continuación.

2.4.1.2.1 Características del influente

La principal característica del influente es la concentración de sólidos suspendidos. Esta es medida en peso o en turbiedad. Otros factores importantes son el tamaño de la partícula y su distribución, y la consistencia del flóculo. La cantidad del flóculo

varía en los procesos de tipo biológico, con la forma de operación y con el tiempo de retención celular.

El incremento en la consistencia de los aglomerados biológicos está relacionado con la producción de polímeros extracelulares, así a valores mayores del tiempo de retención celular aumenta su cohesión hasta un máximo (alrededor de 15 días), a partir del cual decrece (Metcalf & Eddy, 1979).

2.4.1.2.2 Espesor del medio filtrante

En el caso de los medios simples se tienen los siguientes espesores: de 25 a 40 cm de grava, la cual sirve como soporte del medio y para una mejor distribución del flujo durante la operación de lavado, y 60 a 75 cm de arena.

2.4.1.2.3 Velocidad de filtración

La velocidad de filtración que se puede aplicar depende principalmente de la resistencia del floculo. Si la consistencia es débil las velocidades de filtración altas tenderán a destrozarlo y sus fragmentos serán arrastrados a través del medio. El intervalo de velocidades recomendado para filtros de alta tasa es de 5 a 20 m/h ya que el floculo biológico no se desintegra bajo tales condiciones (Metcalf & Eddy, 1979).

Es importante señalar que al utilizar velocidades altas la pérdida de carga a través del medio será mayor y en consecuencia la duración de las corridas será menor.

De manera complementaria, en la TABLA 2.5 se presenta, en forma esquemática, la clasificación de cada variable así como su significado.

TABLA 2.5 CLASIFICACIÓN Y SIGNIFICADO DE LAS VARIABLES DE FILTRACIÓN

VARIABLE	SIGNIFICADO
1. Características del medio filtrante -Tamaño de grano -Distribución del tamaño de grano -Forma, densidad y composición del grano	Influyen en la eficiencia de remoción de partículas y determina la pérdida de carga inicial.
-Porosidad del medio filtrante	Determina la cantidad de sólidos a retener
-Espesor del medio filtrante	Influye sobre la pérdida de carga permisible y la duración de la corrida
2. Condiciones de operación -Velocidad de filtración	Afectan con 1 y 3 la duración de la corrida
Pérdida de carga permisible	Variable de diseño
3. Características del influente -Concentración de sólidos suspendidos -Tamaño de partícula y su distribución -Carga de partícula -Consistencia de flóculo -Características del fluido	La concentración influye directamente sobre la duración de la corrida

2.4.2 Mecanismos de filtración

De acuerdo con Tchobanoglous (1970) y Arboleda (1973), los mecanismos de remoción se clasifican en dos grupos: predominantemente físicos o predominantemente químicos según el tipo de factores que involucren. En la TABLA 2.6 se presentan los principales mecanismos identificados en la literatura.

TABLA 2.6 MECANISMOS DE REMOCIÓN

1. Cribado*
a) mecánico
b) por contacto casual
2. Sedimentación*
3. Impacto inercial*
4. Intercepción*
5. Adsorción química
a) enlace
b) interacción química
6. Adsorción física
7. Adhesión*
8. Floculación
9. Crecimiento biológico

* Usualmente identificados como mecanismos de remoción

Los cuatro primeros mecanismos se clasifican como al tipo físicos y están básicamente afectados por parámetros como talla de grano, porosidad, velocidad de filtración, densidad y tamaño de partícula suspendida, temperatura del fluido y espesor del medio filtrante.

Los mecanismos restantes (5 al 9) se relacionan con las características químicas de la superficie tanto de la materia en suspensión como del medio filtrante. En este caso los factores importantes son: carga electrostática de la partícula, composición química y por último, presencia de coagulantes, cuando existe un pretratamiento.

El predominio del tipo de mecanismos responsables de la remoción de una materia específica varía en cada sistema. En el caso de la filtración de efluentes biológicos de agua residual existen ambos.

2.4.2.1 Descripción de los principales mecanismos de remoción

2.4.2.1.1 Cribado

Para este mecanismo existen dos tipos de retención de partículas:

- a) Mecánica
- b) Por contacto casual

Son cribadas mecánicamente las partículas más grandes que los poros del medio

filtrante. Mientras que las más pequeñas son atrapadas dentro del medio por contacto casual (FIG. 2.9).

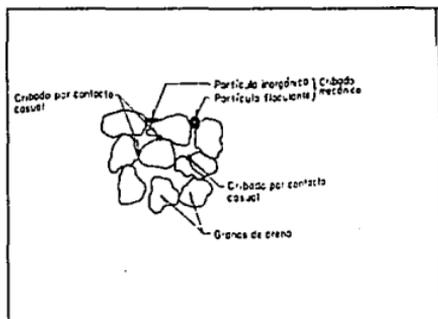


FIG. 2.9 Remoción de partículas por cribado

Basado en consideraciones geométricas (Arboleda, 1973) considera que la probabilidad de remoción de una partícula por cribado (P_r) es directamente proporcional a su diámetro (d) e inversamente proporcional al diámetro del grano del medio filtrante (D) elevado a la 3/2. Esto es:

$$P_r = \left(\frac{d_p}{D} \right)^{3/2} \quad 2.1$$

donde

d_p : diámetro de partículas

D : diámetro del grano del medio

2.4.2.1.2 Sedimentación

Arboleda (1973), consideró que la remoción de las partículas en un filtro es un fenómeno debido a la sedimentación. De tal modo que si se sumara el área total de todos los granos de 0.5 mm de diámetro que hay en 1 m³ de arena con un 40% de espacios vacíos se tendrá un área de 7 200 m².

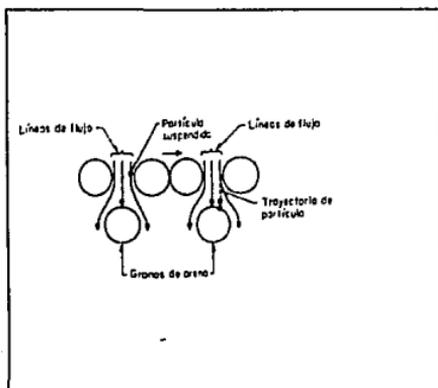


FIG. 2.10 Remoción por sedimentación

Suponiendo que 1/6 del área es horizontal, 3/6 están en contacto con los otros granos de arena y 2/6 bañados por el agua, el área efectiva resulta de $1/6 * 2/6 = 1/18$ del área total, o sea 400 m². Por lo que se estima que la superficie aprovechable para la sedimentación es de 5.56% del total. Así, un m³ de arena

actúa como un sedimentador de 400 m² de superficie.

La sedimentación sólo puede producirse con material suspendido relativamente grande y denso cuya velocidad de asentamiento sea alta en zonas del medio donde la carga hidráulica es baja (FIG. 2.10).

2.4.2.1.3 Intercepción

Camp y Stein (Arboleda, 1973) llegaron a la conclusión que la remoción del flóculo dentro del medio es llevada a cabo por contacto de los flóculos con la superficie de los granos o con flóculos ya depositados. La figura 2.11 esquematiza esta idea. Si suponemos que las partículas (A) viajan con las líneas de flujo, lo cual es cierto a bajas velocidades, resulta que al producirse el estrechamiento de dichas líneas en la contracción (B) estas se ven forzadas a ponerse en contacto entre sí y con el medio filtrante quedando interceptadas.

2.4.2.1.4 Impacto inercial

Cuando la velocidad de flujo es alta y la partícula es grande debe tenerse en cuenta los efectos de la inercia, los cuales hacen que la partícula siga una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo en los cambios de dirección. Esto implica que al pasar una suspensión alrededor de un obstáculo las partículas continúan su trayectoria original impulsadas por la fuerza de inercia, chocan con el grano del medio filtrante y quedan adheridas a él. Las líneas de flujo mientras se deslizan

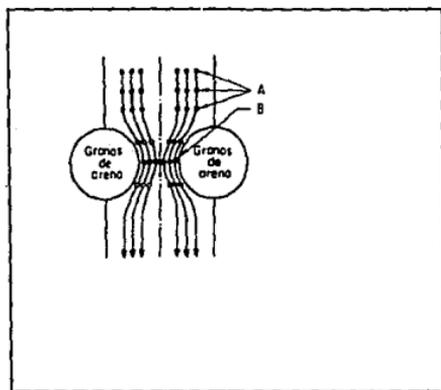


FIG. 2.11 Contacto de partículas. Mecanismo de interceptación.

alrededor del grano (figura 2.12).

En el caso de la filtración de suspensiones líquidas, la viscosidad del fluido hace difícil que la materia suspendida pueda adquirir suficiente cantidad de movimiento como para que el mecanismo de remoción por impacto inercial sea significativo.

2.4.2.1.5 Fuerzas de Van der Waals

V. Mackrlé y S. Mackrlé (Arboleda, 1973) sugirieron que las fuerzas de Van der Waals son responsables de la adhesión de las partículas a los granos del medio filtrante. De tal forma que existe un volumen alrededor de cada grano "espacio de

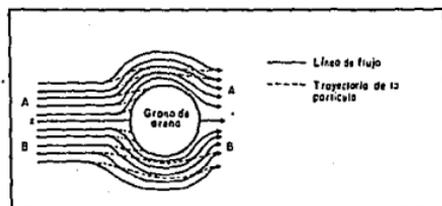


FIG. 2.12 Remoción por impacto inercial

adhesión" en el cual las partículas suspendidas que entran dentro de él son removidas del flujo al quedar adheridas en la superficie de los granos (figura 2.13). La acción es análoga a un sedimentador, en el cual, la fuerza de gravitación es remplazada por las fuerzas de Van der Waals. Cuando actúan en muy corta distancia y el diámetro de partículas es mucho menor del diámetro de grano, las fuerzas Van der Waals se determinan mediante la ecuación:

$$F_a = \frac{K'd_p}{12r^2} \quad (2.2)$$

donde

K' : constante de atracción de Van der Waals

d_p : diámetro de la partícula

r : distancia entre partícula y grano

El valor de la constante de Van der Waals se incrementa con la densidad de las partículas, de manera que el floculo más denso se adhiere con mayor fuerza al medio filtrante.

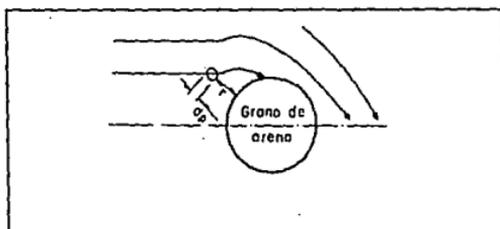


FIG. 2.13 Trayectoria de la partícula capturada por las fuerzas de Van Der Walls

2.4.2.1.6 Interacción química

En este mecanismo se considera que las cadenas poliméricas adheridas a las partículas en suspensión se encuentran extendidas en el agua y pueden así adherirse a otras partículas o a sitios vacantes de los granos del medio (Arboleda, 1973).

El uso de ayudantes de filtración inyectados en el influente es de gran utilidad para este caso, ya que aumenta la adhesión de las partículas pequeñas al medio filtrante (figura 2.14).

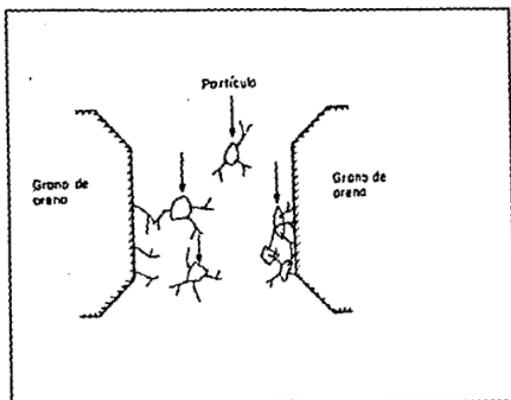


FIG. 2.14 Esquema explicativo de la acción de los polímeros en un medio granular (interacción química).

2.4.3 Hidráulica de flujo

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

- La pérdida de carga es muy grande
- Disminuye el caudal deseado
- La calidad del efluente se deteriora debido al paso de sólidos.

2.4.3.1 Desarrollo de la pérdida de carga

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

La ecuación 2.3 permite calcular la pérdida de carga inicial para granos no esféricos, de diámetro no uniforme y lechos estratificados (Fair y Hatch, 1933).

$$h_o = \frac{f'v}{g} v \frac{1-P_o^2}{P_o^3} \frac{36}{C_o^2} L \left[\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{d_i^2} \right] \quad (2.3)$$

donde:

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

$f' = 5$; valor constante experimental y adimensional = $K/16$; K = coeficiente de fricción.

$g = 7.323 \cdot 10^{10}$ m/día², gravedad

L : longitud del medio

$v = 0.082$ m²/día a 22 °C (viscosidad cinemática)

P_o : porosidad del lecho

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

v = tasa de filtración (m³/m²día)

d_i : diámetro medio de las aberturas entre dos tamices adyacentes

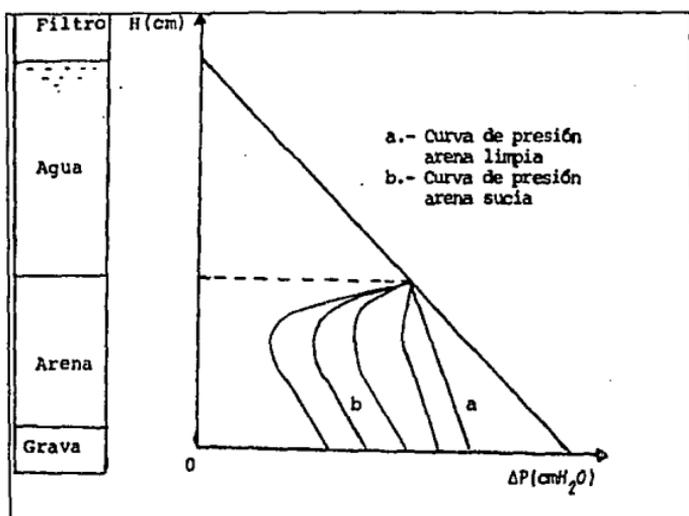


FIG. 2.15 Evolución de la pérdida de carga.

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

En la figura 2.15 se muestra la evolución de la pérdida de carga durante una corrida de filtración (Degrémont, 1973).

2.4.4 Medio filtrante

El medio filtrante es caracterizado generalmente por los siguientes factores (Degrémont, 1973):

2.4.4.1 Granulometría

Esta es evaluada mediante una curva representativa de los porcentajes en peso de los granos que pasan a través de las mallas de una serie de tamices normalizados (ver tabla 2.7, fig. 2.16).

TABLA 2.7 TABLA AUXILIAR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA

Diámetro malla mm	% Material retenido	% Material pasa acumulado
x	x	x
x	x	x
x	x	x
.	.	.
.	.	.
.	.	.

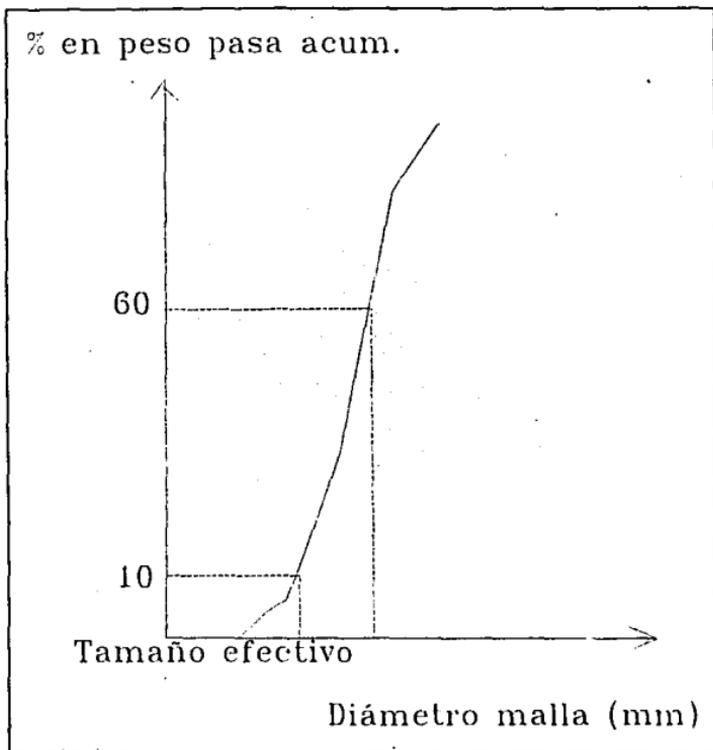


Fig. 2.16 Distribución granulométrica

2.4.4.2 Tamaño efectivo (T.E.)

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

2.4.4.3 Coeficiente de uniformidad (C.U.)

Es la relación de las aperturas correspondientes a los porcentajes 60 y 10 de la curva granulométrica.

2.4.4.4 Forma de los granos

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

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

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

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

En un medio dual, el primer medio de talla superior, captura los sólidos suspendidos gruesos y el segundo los más finos. El tamaño de los granos de antracita pueden ser hasta tres veces más grandes que los de arena (Dahab, 1977).

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

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

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

2.4.4.5 Porosidad

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

La porosidad promedio en un lecho limpio se determina dividiendo el volumen total

del lecho menos el volumen de la arena entre el volumen total. El volumen de la arena puede obtenerse con el peso y la gravedad específica; para arena sílice el valor de su gravedad específica es 2.65 (Camp, 1964).

2.4.5 Métodos de operación de filtros

Existen tres métodos básicos para operar los filtros que difieren principalmente en la forma en que la caída de presión se aplica a través del filtro. Estos métodos son (1) filtración a presión constante, (2) filtración a velocidad constante, y (3) filtración con velocidad decreciente variable (Cleasby, 1969).

2.4.5.1 Filtración a presión constante

En la verdadera filtración a presión constante, la caída total de presión disponible se aplica a través del filtro durante el ciclo del mismo. Al empezar el ciclo del filtro, la permeabilidad del mismo es alta y el caudal de filtración es muy elevado. A medida que el filtro se obstruye con los sólidos, su permeabilidad disminuye, y dado que la caída de presión permanezca constante, el caudal disminuye. El método de filtración a presión constante apenas se usa en la práctica de la filtración del agua y agua residual, ya que requiere un volumen grande de almacenaje de agua.

2.4.5.2 Filtración a velocidad constante

En la práctica se ha tendido hacia una filtración a velocidad constante o velocidad

decreciente. En la filtración a velocidad constante, se mantiene una caída de presión constante a través del sistema del filtro; el caudal de filtración se mantiene constante por medio de una válvula reguladora de flujo. A medida que la filtración progresa, el filtro se obstruye con sólidos, y la válvula de control se abre lentamente para mantener un caudal constante.

Las desventajas para la operación a velocidad constante en filtros de medios granulares profundos son: costes iniciales y de mantenimiento elevados para el sistema de control de caudal, y la calidad del agua filtrada no es tan buena como la obtenida por la operación de filtración a velocidad decreciente.

Se dispone de varios métodos alternativos para el control del caudal. Por ejemplo, es posible dividir el flujo en forma equitativa para todos los filtros en operación (distribución del flujo de alimentación), utilizando una caja de vertedero en la alimentación de cada filtro. La FIG. 2.17 presenta un diagrama esquemático para este tipo de filtro. Las ventajas de este sistema son:

1. La filtración a velocidad constante se obtiene sin controladores de caudal si el flujo total de la planta permanece constante;
2. Cuando un filtro se retira de servicio para lavado o se incorpora al servicio después del lavado, el nivel del agua sube o baja gradualmente en los filtros en operación hasta que se consigue una carga suficiente para manejar el flujo. De esta forma los cambios de velocidad se efectúan lenta y suavemente sin los efectos

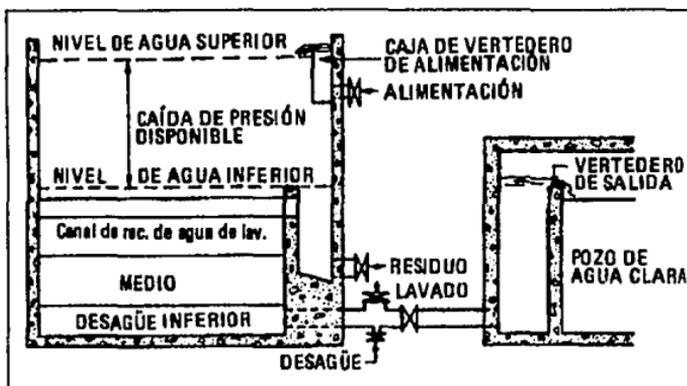


FIG. 2.17 Disposición de un filtro de gravedad para el control del caudal por distribución del flujo de alimentación.

bruscos asociados con la válvula de control y por tanto no se empeora la calidad del agua filtrada (Cleasby et al, 1963).

El vertedero de salida debe colocarse por encima del nivel de arena con el fin de evitar un desecado del lecho del filtro. Esta disposición elimina completamente la posibilidad de carga negativa en el filtro y los problemas indeseables que resultan de esta situación.

La única desventaja del sistema de distribución de flujo de alimentación consiste en una altura adicional de filtro requerida para la caja del filtro.

2.4.5.3 Filtración con velocidad decreciente

Es posible operar con un filtro de forma intermedia entre los dos casos anteriores. Este método se llama filtración con velocidad decreciente variable. Esta operación tiene todas las ventajas de la operación de velocidad constante con caja de distribución para el flujo de alimentación y otras ventajas.

Las principales diferencias entre la velocidad con filtración decreciente variable y la filtración con velocidad constante con distribución de flujo de alimentación, es la localización y tipo de disposición para la alimentación y la provisión de menos carga disponible. La FIG. 2.18 ilustra la disposición deseada para las nuevas plantas diseñadas para este tipo de filtración. El método de operación es similar al descrito por el filtro de la FIG. 2.17 con algunas excepciones. La alimentación al filtro es a través de un cabezal relativamente largo conectado a todos los filtros individuales por medio de una válvula y situado por debajo del nivel del agua interior de los filtros. De esta forma, las pérdidas de carga en el cabezal y válvulas de entrada son pequeñas y no restringen el flujo de entrada, por tanto el nivel de agua es esencialmente el mismo en cada uno de los filtros en operación y en cada momento.

Cuando los filtros alimentados por un sólo cabezal llegan a ensuciarse, el flujo a través de los filtros más obstruidos decrece rápidamente, y de forma automática los otros filtros aumentan su capacidad. Cuando esto sucede, el nivel del agua en todos los filtros aumenta ligeramente, suministrando a los filtros limpios una carga de presión adicional necesaria debido al aumento de capacidad.

Este método de operación ocasiona una disminución gradual de la velocidad cerca

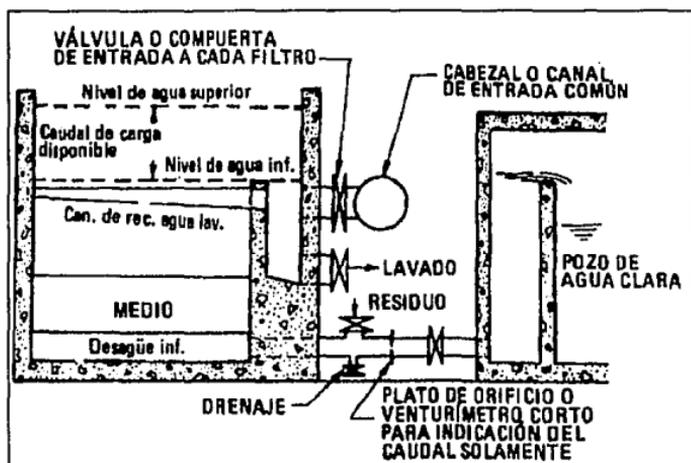


FIG. 2.18 Filtro de gravedad dispuesto para filtración con velocidad decreciente variable.

del final del ciclo de un filtro. Las ventajas de la operación con velocidad decreciente variable sobre la operación con velocidad constante son las de un efluente de mejor calidad y requerimiento de una menor pérdida de carga disponible.

La calidad del efluente del filtro empeora con los aumentos bruscos de caudal. En esta operación los aumentos de velocidad ocurren en los filtros más limpios cuando pueden tener el menor efecto sobre la calidad del efluente. Los cambios de velocidad en ambas direcciones y en todos los filtros, limpios o sucios, ocurre, gradual y suavemente sin necesidad de ningún equipo de control automático.

2.4.6 Retrolavado

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

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

Durante el retrolavado el lecho se fluidifica, es decir, los granos pasan a formar parte de una suspensión donde ocurre la eliminación de los sólidos. La expansión de la cama varía inversamente con la viscosidad del agua de lavado (Camp, 1964). La resistencia de fricción máxima que el grano ofrece es su propio peso, ya que durante la fluidificación se encuentra libre.

Como se mencionó, el uso de granos de mayor tamaño permite corridas de filtración más largas, pero requiere de altas velocidades de retrolavado, esto limita las aplicaciones de diseño (Camp, 1964). Por ejemplo el intervalo de velocidad del agua de lavado depende del porcentaje que se requiera fluidificar el lecho.

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

Durante el retrolavado pueden haber pérdidas del medio filtrante por la violenta agitación que se produce.

2.4.7 Parámetros de control de operación

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

a) Pérdida de carga. Mediante la lectura de la diferencia de niveles de agua. Para ello, se instalan dos tubos transparentes y graduados, uno conectado a la línea del influente y otro a la del efluente (ASCE et al, 1969).

b) S.S.T. (Sólidos suspendidos totales), el análisis se realiza por gravimetría de acuerdo con los métodos estándar (ASCE et al, 1969).

c) Tasa de filtración. Medida que se obtiene por medio de un medidor de flujo (ASCE et al, 1969).

d) Turbiedad. Se determina en el influente y efluente con el fin de evaluar el rendimiento.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El objetivo principal del trabajo experimental es el de adquirir suficiente información que permita establecer las ventajas y desventajas del filtro cónico con respecto al filtro convencional.

Los experimentos se dividieron en tres sistemas. El primero con un filtro cónico de 70° y su correspondiente filtro convencional, el segundo con un filtro cónico de 80° y su convencional correspondiente y el tercer sistema lo forma el filtro cónico de 70° y el de 80°.

En este capítulo se presenta el diseño de los 4 filtros piloto utilizados en la experimentación. Además se da los materiales utilizados para su construcción y los equipos accesorios a los filtros. Se hace una descripción detallada de los modelos experimentales (sistemas de filtración). También se establecen las condiciones experimentales de los sistemas de filtración y finalmente se mencionan los métodos analíticos empleados.

3.1 DISEÑO DE LOS FILTROS PILOTO

3.1.1 Filtros cilíndricos

Para el diseño de los filtros cilíndricos o convencionales se tomó en cuenta la recomendación de Adin et al (1979), que establece que el diámetro del filtro piloto debe ser ≥ 50 veces el máximo diámetro del grano utilizado como medio filtrante para evitar los efectos de pared. Con esta recomendación se diseñaron los filtros cilíndricos. Un filtro fue diseñado con un diámetro de 30.5 cm (12 in) y el otro con un diámetro de 61 cm (24 in), cumpliendo de esta manera con la recomendación ya mencionada dado que el diámetro mayor de grano utilizado fue de 1.19 mm (determinado por el análisis granulométrico). Para determinar la altura del lecho de los filtros se tomó la consideración de Adin et al, de que para un medio sencillo de

arena en el caso de filtros piloto es recomendable utilizar un medio no menor de 15-20 cm de profundidad.

El bajo dren de los filtros cilíndricos tiene 10 cm, ya que el bajo dren a parte de recolectar el agua filtrada sirve de soporte del medio filtrante y como distribuidor del agua de lavado. Considerando el lavado de los fitros se dieron, otros 10 cm por arriba del medio filtrante como bordo libre para evitar la pérdida de arena debido a la expansión del lecho. Para dar la carga disponible a los filtros se diseñaron unas tapas con un conector a una tubería de PVC. Para el filtro cilíndrico de 30.5 cm de

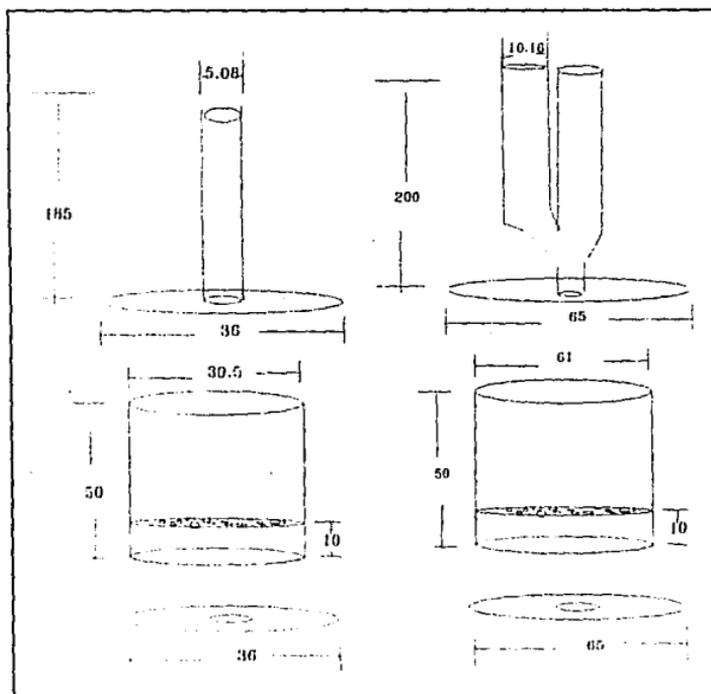


FIG. 3.1 Dimensiones de los filtros cilíndricos (en cm).

diámetro se dió una altura de 1.85 m con un tubo de PVC de 5.08 cm (2 in), y para el filtro cilíndrico de 61 cm se le dió la carga disponible con dos tupos de PVC de 10.16 cm (4 in) y una altura de 2 m. La altura de las tuberías de PVC estuvo restringida por el espacio disponible hacia arriba que se tuvo en el lugar asignado para la experimentación. En la FIG. 3.1 aparecen los dos filtros cilíndricos con las dimensiones correspondientes a cada uno ¹.

3.1.2 Filtros cónicos

Los filtros cónicos se diseñaron tomando en cuenta el diámetro de los filtros cilíndricos y el volumen de medio filtrante a utilizar en estos filtros. Se consideró el volumen del medio filtrante debido a que uno de los objetivos de este trabajo es el establecer si el filtro cónico aprovecha en mayor cantidad el medio filtrante que el filtro cilíndrico. El diámetro de los filtros convencionales fue utilizado para tomar como diámetro mayor el de los filtros cónicos con el fin de empezar con la misma tasa de filtración en ambos filtros. Aunado a estos dos parámetros están los ángulos de inclinación de los filtros cónicos que son 80° y 70°. Con estos factores se determinó el diámetro menor de los filtros cónicos, así como la altura correspondiente a cada uno. Los cálculos realizados son los siguientes:

Para el filtro cónico de 80° se tiene que su volumen de medio filtrante es el mismo que el del filtro cilíndrico de 30.5 cm de diámetro. Por lo tanto el volumen del filtro cilíndrico es:

$$V = \pi r^2 l \quad (3.1)$$

donde V es el volumen, r es el radio del filtro cónico y l es la altura del medio filtrante. Por lo tanto, $V = \pi(0.1524)^2(0.3)$, para darnos $V = 0.02189 \text{ m}^3$.

¹ Todas las acotaciones de dimensiones en todas las figuras están dadas en cm.

Ahora para el cono truncado tenemos que el volumen esta dado por la siguiente expresión:

$$V = \frac{1}{3} l \pi [(r_1^2 + r_2^2) + r_1 r_2] \quad (3.2)$$

donde r_1 y r_2 son los radios mayor y menor respectivamente del cono truncado y l es la altura del cono. De aquí despejando l tenemos:

$$l = \frac{3V}{\pi [(r_1^2 + r_2^2) + r_1 r_2]} \quad (3.3)$$

Ahora de esta ecuación se desconocen l y r_2 . Para poder encontrar estos valores se recurrió al teorema de Pitágoras basados en la FIG. 3.2. El teorema establece que $c^2 = a^2 + l^2$, y como $a = r_1 - r_2$, l es obtenida suponiendo una r_2 . Del teorema de Pitágoras se obtiene c para que después por la ley de los senos se encuentre el ángulo α ; esto es:

$$\frac{c}{\text{sen}90^\circ} = \frac{l}{\text{sena}} \quad (3.4)$$

como ya se dijo de esta expresión se obtiene α que debe corresponder al ángulo de 80° , sino es así se tiene que repetir el cálculo para otra r_2 hasta que chequen los ángulos.

Siguiendo estos pasos para el filtro cónico de 80° se obtuvo la última iteración como sigue:

$r_2 = .01$ m, entonces $a = 0.1404$, $l = 0.8295$ y $c = 0.8413$ para darnos:

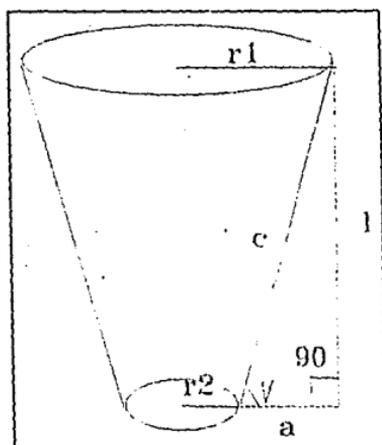


FIG. 3.2 Cono truncado

$\alpha = 80^\circ$

Para el filtro cónico de 70° se siguió la misma rutina de cálculo, obteniéndose en la última iteración los siguientes resultados:

$r_1 = 0.305$ m, $V = 0.0877$ m³, $r_2 = 0.01$ m, $a = 0.295$ m, $l = 0.8708$ y $c = 0.9194$ para dar $\alpha = 70^\circ$.

Ya obtenidas estas dimensiones se le dió a los filtros cónicos otros 10 cm por arriba del medio filtrante por la cuestión del lavado de los mismos. Se consideró un falso fondo con una placa de 5 cm de diámetro a ambos filtros cónicos para el soporte del lecho filtrante y mejor distribución del agua de lavado. De la misma manera que a los filtros cilíndricos se diseñaron tapas con conectores a tuberías de PVC con el objetivo de dar la carga disponible a los filtros. La altura de la tubería fue la misma

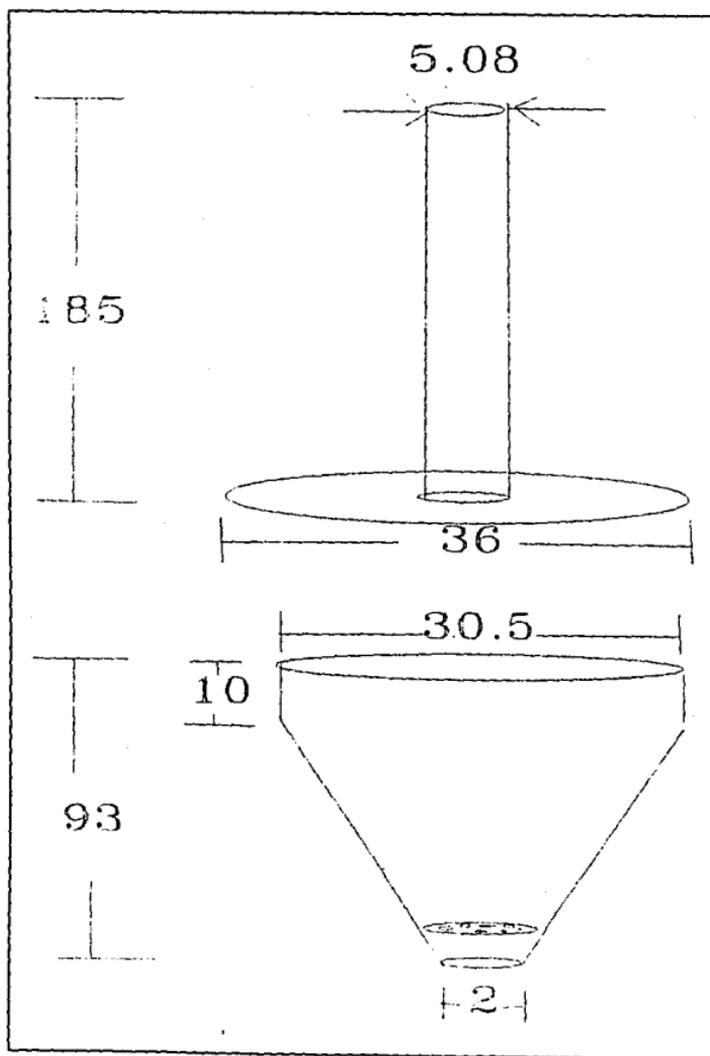


FIG. 3.3 Dimensiones del filtro cónico de 80°.

que se les dió a los filtros cilíndricos correspondientes. La tubería de salida de los filtros cónicos, debido al resultado obtenido para el diámetro menor fue de 1.9 cm (3/4 in), tomando esto como referencia para los filtros cilíndricos. En la FIG. 3.3 y 3.4 se ilustran los filtros cónicos dimensionados.

3.1.3 Materiales empleados para la Construcción de los Filtros

El material elegido para la construcción de los filtros fue lámina de fierro calibre 22, debido a la facilidad de manipulación de este material. Este material forma todo el cuerpo de los filtros tanto cónicos como cilíndricos.

Para las tapas y los bajos drenes de todos los filtros se instalaron placas de acero de 3 mm de espesor. Dado que tanto la lámina como las placas de acero pueden sufrir corrosión, la parte interna de todos los filtros fue recubierta con un impermeabilizante (Fester 550) y la parte exterior de todos los filtros fue recubierta con pintura de esmalte color azul metálico.

Para dar la carga disponible se utilizó tuberías de PVC, y la tubería de descarga del efluente de los filtros fue de cobre, al igual que toda la tubería de alimentación a los filtros.

Las bases de los filtros fueron contruidas con ángulo y solera con una geometría tal que diera estabilidad y soporte a los filtros (ver FIG. 3.5 y FIG. 3.6). Se construyó una sola base para los filtros cilíndricos, dado que no operaron al mismo tiempo en alguna corrida de filtración.

3.1.4 Equipo auxiliar y accesorios de filtros piloto

El equipo y accesorios auxiliares de los filtros piloto son numerados en la TABLA 3.1 y en la FIG. 3.7 está representado un esquema que ilustra de manera general los sistemas de filtración.

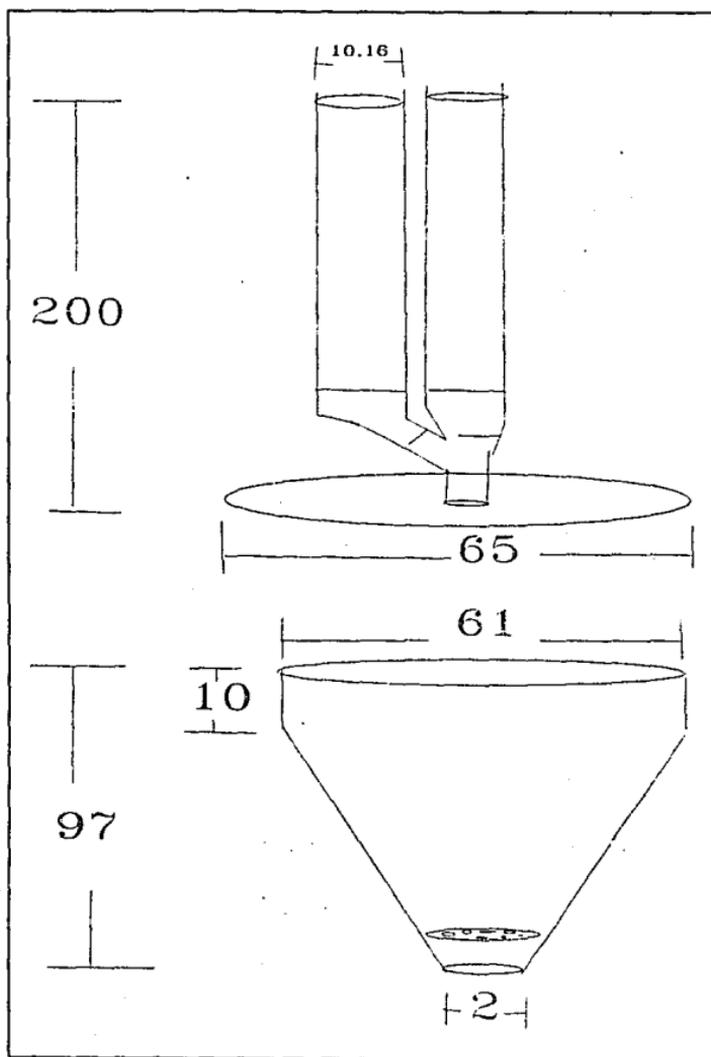


FIG. 3.4 Dimensiones del filtro cónico de 70°.

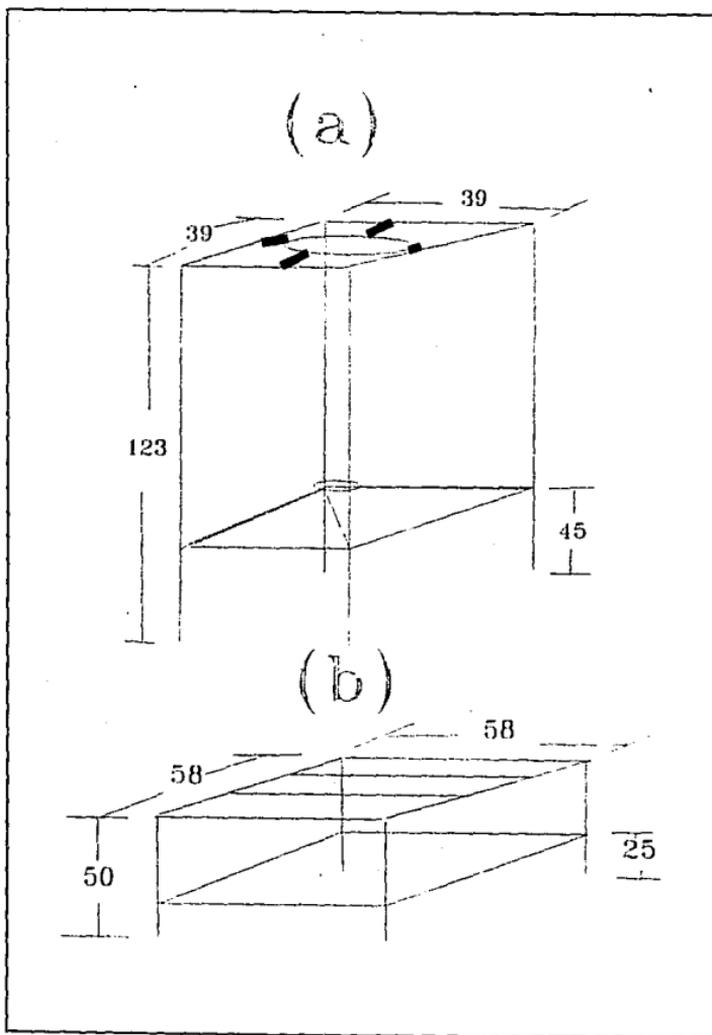


FIG. 3.5 (a)Estructura del cono de 80° . (b)Estructura de los filtros cilíndricos.

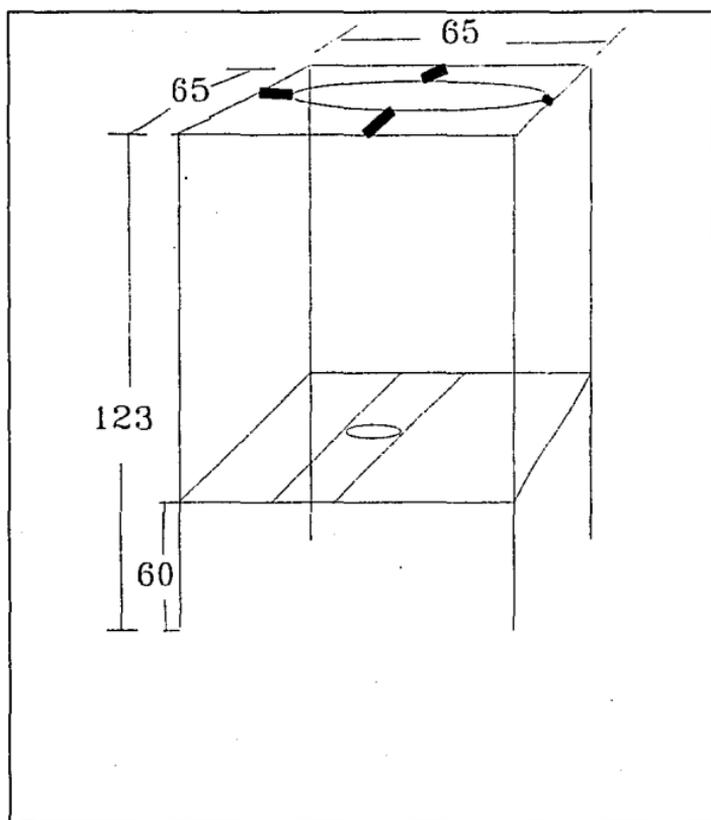


FIG. 3.6 Estructura del filtro cónico de 70°.

3.2 Descripción de los Modelos Experimentales

Para el estudio se consideraron tres sistemas de filtración de los cuales forman parte dos filtros cónicos y dos filtros cilíndricos.

El primer sistema de filtración está formado por el filtro cónico de 80° y el filtro cilíndrico o convencional correspondiente. El filtro cónico tiene un diámetro mayor de 30.5 cm y un diámetro menor de 2 cm con una altura de 83 cm en lo que corresponde al cono truncado. Está soportado en una base con las dimensiones ya ilustradas en la FIG. 3.5 y tiene una altura total a partir del nivel del suelo de 3.1 m.

Tiene un falso fondo de 8 cm, con 6 cm aproximadamente de grava y el medio filtrante tiene 69 cm de arena. Cuenta con un piezómetro para determinar la pérdida de carga total a través del medio filtrante.

El filtro cilíndrico de este sistema a diferencia del filtro cónico cuenta con un falso fondo de 10 cm, con un empacado de aproximadamente 5 cm de grava, y lecho de 28 cm de arena. Cuenta con una base de dimensiones dadas en la FIG. 3.5. Tiene una altura de 2.83 m a partir del nivel del suelo. Ambos filtros de este sistema tienen una tubería de salida del efluente de 1.9 cm (3/4 in).

El segundo sistema de filtración consta de un filtro cónico de 70° y el filtro cilíndrico correspondiente. Ambos filtros constan con un diámetro de entrada de 61 cm y el filtro cónico tiene un diámetro de salida de 2 cm. Sus bases tienen las dimensiones ya mencionadas en las figuras 3.5 y 3.6. El filtro cónico cuenta con un falso fondo de aproximadamente 7 cm con perforaciones de 0.3 cm, una capa de grava de aproximadamente 5 cm y el lecho de arena de 78 cm. Cada filtro cuenta con una tapa de 65 cm de diámetro conectadas a una tubería de PVC de 10.16 cm (4 in) y 2 m de altura.

El filtro cónico cuenta con una altura total a partir del nivel del suelo de 3.5 m, mientras que el filtro cilíndrico tiene una altura total de 3 m. Este filtro cilíndrico cuenta con un falso fondo de 10 cm, 5 cm de grava y el lecho de 28 cm de arena. El falso fondo tiene perforaciones de 1.2 cm.

El tercer sistema de filtración está formado por los dos filtros cónicos (el de 80° y el de 70°) con todas las características ya mencionadas anteriormente para ambos filtros.

En general, el sistema de alimentación a los filtros es el mismo para todos los sistemas de filtración (ver FIG. 3.7). Este sistema de alimentación cuenta con

TABLA 3.1 EQUIPO AUXILIAR Y ACCESORIOS DE FILTROS PILOTO

CVE	SERVICIO
B-1	Bomba de alimentación a filtros
D	Desagüe
L-1	Tubería de succión
L-2	Tubería de alimentación a filtros
L-3, L-4	Tubería de descarga de agua filtrada
L-5	Tubería de recirculación del influente
P	Piezómetros
V-1, V-2	Válvulas de control de flujo del influente
V-3, V-4	Válvulas de control de flujo del agua de lavado
V-M	Válvula para muestreo del influente
V-R	Válvula de recirculación del influente

una bomba de 1/2 HP, y con una tubería a la succión de 2.54 cm (1 in) y en la descarga de 1.9 cm (3/4 in). La bomba succiona el agua de alimentación a los filtros de la canaleta del sedimentador, correspondiente al sistema de Biodiscos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria. La tubería de

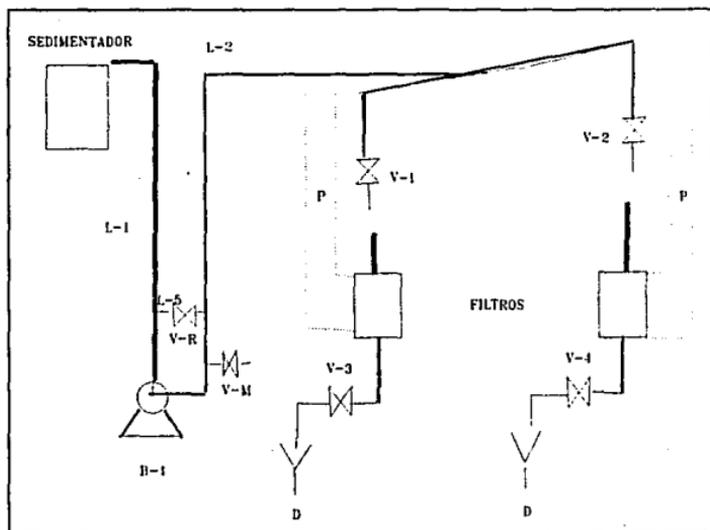


FIG. 3.7 Esquema general del sistema de filtración.

descarga de la bomba es dividida en dos del mismo diámetro para poder alimentar los dos filtros de cada sistema de filtración. La bomba fue fijada a una base de madera, soportada en una estructura metálica. Todas las tapas de los filtros tienen que ser presionadas con una serie de tornillos con mariposas colocados alrededor de la boca de los filtros. Para evitar alguna fuga entre la tapa y el cuerpo de los filtros se les colocó hule espuma en todo su perímetro.

Para evitar la pérdida de arena por el falso fondo, la grava utilizada en todos los filtros fue una mezcla de grava de tamaños de aproximadamente 2, 1 y 0.5 cm de diámetro, en su mayoría de 1 cm de diámetro.

3.3 Condiciones Experimentales

El influente tratado en los tres sistemas de filtración ya mencionados anteriormente fue el efluente secundario proveniente del sedimentador correspondiente al sistema de biodiscos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria (PTARCU).

3.3.1 Parámetros de operación

3.3.1.1 Tasa de filtración

La experimentación consistió básicamente en hacer dos corridas de filtración a diferente tasa de filtración con los primeros dos sistemas de filtración compuestos por un filtro cónico y un filtro cilíndrico. El objetivo de hacer las corridas con estos sistemas a diferente tasa de filtración fue el de llegar a determinar si tiene algún efecto la velocidad de filtración sobre la eficiencia de remoción de turbiedad y en la duración de las corridas de filtración.

Para el sistema de dos filtros cónicos (70° y 80°) se realizó una corrida a una sola tasa de filtración, debido a que con este sistema se pretendía observar el efecto de los ángulos en la eficiencia de remoción de turbiedad. Cada corrida para los tres sistemas de filtración fue hecha por triplicado para dar un total de 15 corridas de filtración.

Las tasas de filtración manejadas en cada sistema de filtración se presentan en la TABLA 3.2.

Las velocidades presentadas en la TABLA 3.2 estuvieron determinadas por la carga disponible dada a los filtros. Para tasas mayores de filtración los filtros alcanzaban la máxima carga disponible de manera casi inmediata haciendo nula la duración de la corrida. Utilizando velocidades menores a las presentadas en esta misma tabla nos estaríamos saliendo del rango establecido en la literatura de la filtración rápida.

TABLA 3.2 TASAS DE FILTRACIÓN MANEJADAS EN LOS TRES SISTEMAS DE FILTRACIÓN.

SISTEMA DE FILTRACIÓN	TASA DE FILTRACIÓN	
	1	2
CONO 80° - CILINDRO ($\rho = 12$ in)	120	132
CONO 70° - CILINDRO ($\rho = 24$ in)	132	152
CONO 70° - CONO 80°	132	-

3.3.1.2 Fin de las corridas

Para los sistemas de filtración formados por un filtro cónico y un filtro cilíndrico, el parámetro indicador del fin de la corrida fue la carga disponible correspondiente a la columna de agua por encima del medio filtrante. Para el sistema de filtración Cono 80°-Cilindro correspondiente se tuvo una carga disponible máxima de 185 cm y para el sistema de filtración Cono 70°-Cilindro correspondiente se dió una carga disponible máxima de 200 cm. Por la manera de operar los filtros se partió de una carga disponible menor a las mencionadas y con el avance en el tiempo de operación de los filtros fue incrementada la carga disponible hasta alcanzar el valor máximo establecido.

En los dos primeros sistemas de filtración mencionados se le dió a cada filtro formador de cada uno de los sistemas la misma altura de carga disponible con el objetivo de determinar que filtro obtenía mejor rendimiento; es decir, que filtro trataría más agua estando ambos filtros en las mismas condiciones de tasa de filtración de entrada, concentración de influente y carga máxima disponible.

Para el sistema de filtración Cono 70°-Cono 80° el fin de la corrida se dió cuando fue alcanzada la máxima carga disponible del filtro cónico de 80°, ya que en este caso no se persiguió el rendimiento de los filtros debido a que los dos filtros tenían

dos áreas de entrada diferentes que ocasionaría que el filtro de mayor área filtrante tardara más tiempo operando.

3.3.2 Parámetros de Evaluación

Los parámetros medidos para la evaluación del funcionamiento del filtro cónico respecto al convencional son los numerados a continuación:

a) Turbiedad (UTN)

b) ΔP (cm H_2O)

c) Sólidos retenidos a través del medio filtrante (gSOL/KgARENA)

d) Gasto de salida de los filtros (l/s)

El parámetro a) fue determinado para el influente y efluente de cada filtro. El b) y d) fueron determinados en cada filtro. Estos parámetros fueron determinados en todas las corridas de filtración, excepto el parámetro c), el cual sólo se llevó a cabo en algunas corridas de filtración.

3.3.3 Método de operación de los filtros piloto

Los filtros piloto en cada uno de los sistemas de filtración fueron operados con base en la técnica de pérdida de carga en aumento con el tiempo y un flujo de salida declinante (casi constante). Esta técnica consiste en: partir de un nivel inicial de carga disponible y terminar en un nivel superior a este (ver FIG. 3.8). El medio filtrante se va obstruyendo con el transcurso de la corrida y el flujo de salida de los filtros empieza a disminuir, debido a que el flujo de alimentación a los filtros es siempre el mismo hay acumulación del agua dentro del filtro ocasionando el incremento en el nivel del depósito de carga hasta el valor previamente establecido en cada filtro. Al operar de esta manera los filtros no se tuvo necesidad de contar con algún sistema de control para la buena operación de los filtros piloto.

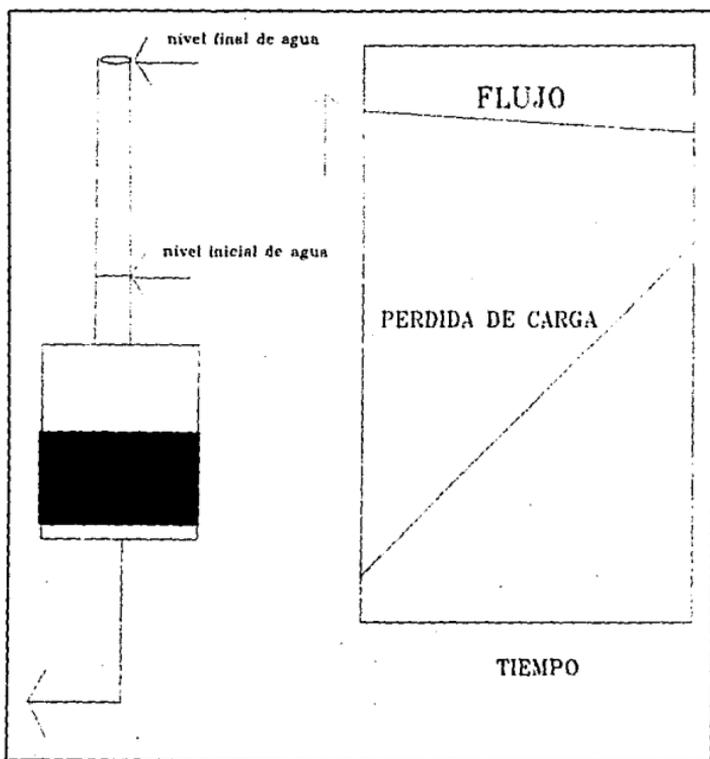


FIG. 3.8 Método de operación de filtros piloto.

3.3.4 Soporte y Medio filtrante

3.3.4.1 Soporte

Como soporte se utilizó una mezcla de grava de diámetros de aproximadamente 0.5, 1 y 2 cm en todos los filtros piloto. Las gravas fueron colocadas por tamaños del mayor al menor a partir del falso fondo de los filtros. El espesor de la capa de grava para el filtro cónico de 80° fue de 6 cm y del convencional correspondiente 5 cm. El filtro de 70° y el filtro cilíndrico correspondiente tuvieron un espesor de grava de 5 cm.

3.3.4.2 Medio filtrante

La arena proporcionada por la PTARCU para la experimentación se le realizó el análisis granulométrico de la siguiente manera:

TABLA 3.3 MALLAS EMPLEADAS EN EL ESTUDIO

No. Malla	Dmm
14	1.19
18	1.0
30	0.59
40	0.42
60	0.251
> 60	<0.251

D: Apertura del tamiz.

Se tomaron tres muestras al azar de la arena a utilizar en el empaquetado de los filtros. Estas tres muestras fueron analizadas por separado para que al final se hiciera un promedio con los resultados obtenidos. Los tamaños de las muestras fueron de 500 g. Las mallas empleadas se presentan en la TABLA 3.3.

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico son presentados en la TABLA 3.4.

TABLA 3.4 RESULTADOS GRANULOMÉTRICOS

Malla	Muestra No.1		Muestra No.2		Muestra No.3		Prom edio	
No	% Ret.	% Pasa Acum.	% Ret.	% Pasa Acum.	% Ret.	% Pasa Acum.	% Ret.	% Pasa Acum.
14	0.12	99.88	0.02	99.98	0.03	99.97	0.06	99.94
18	3.14	96.74	3.04	96.94	3.11	96.86	3.10	96.84
30	51.42	45.32	50.49	46.45	49.99	46.87	50.63	46.21
40	32.77	12.55	33.21	13.24	33.46	13.41	33.15	13.06
60	11.82	0.73	12.29	0.95	12.47	0.94	12.19	0.87
> 60	0.73	0.00	0.95	0.00	0.94	0.00	0.87	0.00

En la FIG. 3.9 se presenta la distribución granulométrica, a partir de la cual se calculó lo siguiente:

$$\text{Tamaño efectivo} = 0.38 \text{ mm}$$

$$\text{C.U.} = 1.84$$

El espesor empleado de medio filtrante para cada filtro ya fue mencionado en la descripción de los sistemas de filtración.

3.3.4.2.1 Porosidad promedio del medio filtrante

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

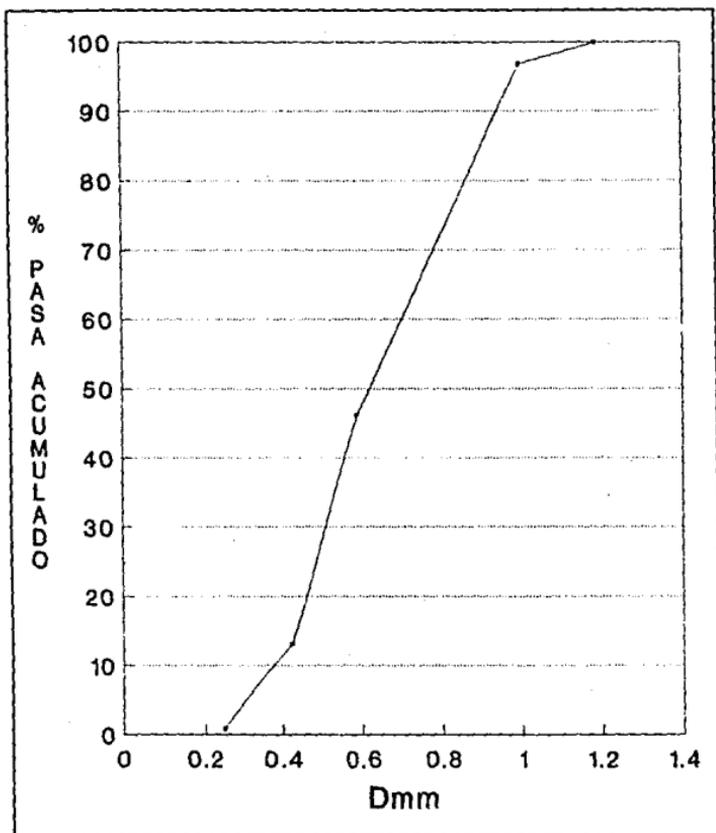


FIG. 3.9 Distribución granulométrica.

$$P^{\circ} = (V_T - V_s) / V_T \quad (3.5)$$

donde,

P_o es la porosidad promedio del lecho limpio

V_T es el volumen total del lecho

V_a es el volumen de arena. Igual a la relación entre el peso de la arena W_a y su densidad ρ_a .

Tomando como base los siguientes datos obtenidos para el medio empleado en un vaso de precipitados:

$$W_a = 0.2873 \text{ Kg}$$

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

$$V_a = 1.0843 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$A_T = 0.003117 \text{ m}^2 \text{ (área transversal del vaso de precipitados)}$$

$$h = 0.066 \text{ m (altura del medio filtrante en el vaso de pp.)}$$

$$V_T = 0.003117 \cdot 0.066 = 2.05738 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Por lo tanto, la porosidad es:

$$P_o = 0.47$$

3.3.5 Ejecución de experimentos

Las corridas de filtración o experimentos fueron llevadas a cabo al azar. Tomando en cuenta que para hacer las corridas de filtración por triplicado era necesario tener aproximadamente las mismas condiciones de operación (principalmente la concentración del influente). Para hacerlo de este modo se hicieron las corridas en horarios aproximadamente iguales, ya que se percató que las concentraciones del influente eran parecidas en los mismas horas en periodo Escolar Regular.

3.3.5.1 Toma de muestras

La toma de muestras se llevó a cabo en los puntos 1, 2 y 3 señalados del diagrama de flujo general de los sistemas de filtración presentado en la FIG. 3.10.

La toma de muestras fue determinada por corridas de prueba realizadas con los sistemas de filtración formados por un filtro cónico y un filtro cilíndrico. De estas corridas de prueba se observó principalmente la duración de las corridas de filtración, los cambios considerables de la ΔP respecto al tiempo y además el tiempo utilizado para el muestreo.

Tomando estos tres factores se decidió tener como máximo 9 muestreos durante las corridas de filtración. El muestreo en los puntos 2 y 3 se hizo a distinto tiempo

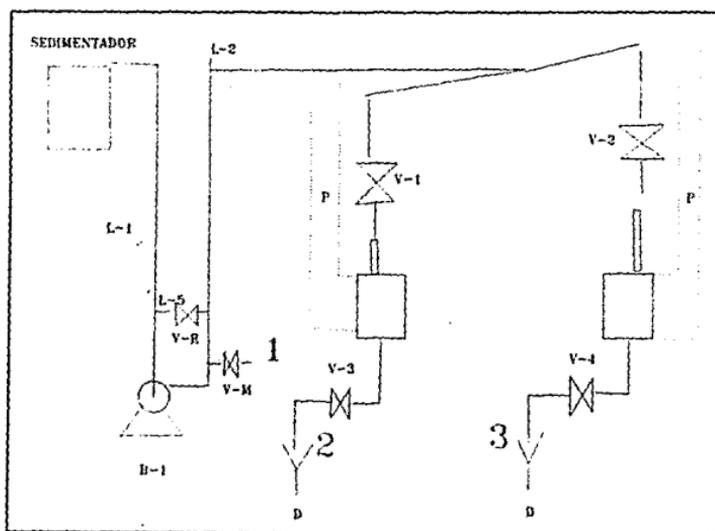


Fig. 3.10 Puntos de muestreo.

que en el punto 1. Primero fue tomada la muestra en el punto 1 y después se tomo en los puntos 2 y 3, cuando se cumplió el tiempo de residencia del agua a través del sistema de filtración. Esto se hizo con el objetivo de que el análisis por hacer, fuera para la misma agua, principalmente por los cambios de turbiedad en el influente.

A parte del muestreo de influente y efluente del agua manejada se muestreó arena de los filtros en algunas corridas con el objetivo de determinar los sólidos retenidos a través del medio filtrante a distintas profundidades. El muestreo de arena se hizo cuando los filtros habían terminado de operar a cada 5 cm de profundidad. En los filtros cónicos y cilíndricos se muestreó todo el medio filtrante.

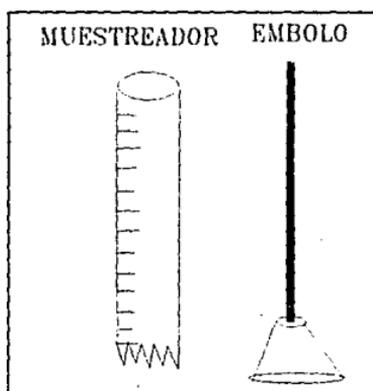


FIG. 3.11 Muestreador de arena.

El muestreo se realizó con un tubo de acrílico dentado por un extremo con un diámetro de 2.54 cm (1 in) y 60 cm de longitud. Dicho tubo fue graduado cada 5 cm. Para sacar las muestras del tubo se contó con un émbolo para empujar la arena y con ayuda de la escala se pudo ir sacando las muestras cada 5 cm.

En la FIG. 3.11 se presentan los accesorios utilizados para llevar a cabo este muestreo de arena.

3.3.5.2 Métodos analíticos empleados

Los métodos analíticos empleados en las experimentaciones son:

- a) Turbiedad
- b) SST (sólidos suspendidos totales)

3.3.5.2.1 Turbiedad

La turbiedad fue medida en las muestras de agua de influentes y efluentes obtenidas durante las corridas de filtración. El análisis fue realizado mediante un turbidímetro marca Cole-Parmer con una precisión de 0.01 UTN.

3.3.5.2.2 SST (sólidos suspendidos totales)

Esta técnica no fue aplicada al agua tratada debido a que por las bajas concentraciones manejadas, El Métodos Estándar (APHA, 1989) no recomienda esta técnica, por que se obtienen resultados con un error superior al 30%. Este análisis fue utilizado en la determinación de sólidos retenidos a través del medio filtrante.

Basado en la técnica de determinación de SST discutida en el Métodos Estándar (1989), la técnica utilizada para la determinación de sólidos retenidos en diferentes profundidades de la cama filtrante de los filtros es la siguiente:

- Tomar la muestra y poner a secar en la estufa a 103-105 °C durante 1 día.
- Pesar la muestra; así como también el papel filtro en el que se llevará a cabo la filtración.
- Lavar la muestra en un recipiente con 100 ml de agua limpia y decantar, hacer esto tres veces o las veces que sea necesario hasta dejar limpia la arena.

- Filtrar el agua decantada con el aparato correspondiente de filtración.
- Poner a secar durante dos horas la muestra filtrada y luego pesar.
- Para determinar la cantidad de sólidos retenidos por unidad de masa de arena, por una diferencia de los pesos de la muestra inicial y la cantidad de sólidos filtrados.

3.3.5.3 Procedimiento de Ensayes

La manera de realizar cada corrida de filtración corresponde a la siguiente metodología:

- a) Antes de empezar la corrida experimental, preparar los recipientes necesarios para la recolección de las muestras. Los recipientes fueron de vidrio con capacidad de 200 ml y en un total de 27 unidades.
- b) Verificar que las tapas de los filtros piloto estén completamente selladas, para evitar alguna posible fuga de agua.
- c) Verificar de manera general todo el equipo; así como el perfecto funcionamiento de la bomba B-1.
- d) Activar la bomba B-1 y mediante las válvulas V-1, V-2 y V-R fijar el gasto de alimentación a los filtros para tener la velocidad de filtración deseada. El gasto se fija mediante aforos.
- e) Asegurarse que las válvulas V-3 y V-4 estén completamente abiertas y empezar a alimentar a los filtros.
- f) Como los filtros empiezan a llenarse con el agua de alimentación, esperar a que se alcance una carga disponible estable para poder comenzar el muestreo.
- g) En los muestreos anotar la caída de presión de los filtros, tomar las muestras del

influyente y efluente de los filtros piloto y medir el flujo de salida de los filtros mediante aforos.

h) Tomar las muestras en función de los parámetros mencionados en la toma de muestras.

i) Llegado el fin de la corrida (cuando la carga disponible alcanza sus máximos valores) se toman las muestras y datos de campo finales. Se para el proceso mediante la desactivación de la bomba B-1.

j) Ya vacíos los filtros se les quita la tapa y se preparan para el retrolavado. O en algunos casos primero se toman las muestras de arena a través del lecho para la determinación del perfil de sólidos retenidos. Ya tomadas las muestras de arena se conectan los filtros a la toma de agua por medio de mangueras de 1/2 in y se abren o cierran V-3 y V-4 dependiendo del flujo de agua que se desee manejar en el lavado.

k) Al término del lavado de los filtros se prosigue a reponer la arena perdida (si es que la hay) y volver a poner las tapas a los filtros para dejarlos listos para la siguiente corrida.

l) Finalmente se colectan todas las muestras obtenidas para su posterior análisis.

3.3.5.4 Retrolavado

El lavado de los filtros fue llevado a contracorriente de la manera de operación de los mismos. El retrolavado fue llevado a cabo en el tiempo necesario hasta que a simple vista no se apreciaran sólidos suspendidos en el agua de lavado.

El retrolavado fue llevado a cabo solamente con agua y a velocidades con las que

se disponía de una toma de agua de la PTARCU.

En el caso de los filtros cilíndricos se utilizó una ayuda mecánica.

4.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos para la evaluación del funcionamiento del filtro cónico. Los parámetros de evaluación analizados son la duración de la corrida, la eficiencia de remoción de UTN, la pérdida de carga, los sólidos retenidos a través del medio filtrante, la eficiencia en el lavado de los filtros y la cantidad de agua tratada, los parámetros son analizados en forma conjunta, ya que uno solo no es suficiente para evaluar el funcionamiento de los filtros cónicos respecto a los filtros cilíndricos. En este capítulo se presentan los resultados típicos (la totalidad de los resultados se reportan en los anexos I y II), con base en los cuales se señalan las características del funcionamiento. Además es presentado el procedimiento estadístico mediante el cual se analizaron los resultados de los experimentos.

4.1 Duración de la corrida

En el capítulo anterior quedó establecido el momento en que se llegó al fin de las corridas de filtración. Al revisar los resultados de las 15 corridas de filtración hechas se encontró una influencia de la concentración del influente y la velocidad de filtración sobre la duración de la corrida.

Al aumentar la concentración del influente la corrida de filtración dura menos tiempo. Dicha tendencia concuerda con lo expuesto por Degremont (1973).

Esta tendencia se presentó para todos los filtros tanto cónicos como cilíndricos. Un ejemplo ilustrativo de lo mencionado es la gráfica de turbiedades del influente (UTNi) vs tiempo (t) entre las corridas 10 y 11 para el filtro cónico de 70° (ver FIG. 4.1) donde se ve que la corrida 11 a una misma velocidad que la corrida 10 manejó menores turbiedades en el influente, lo que trajo como consecuencia una mayor duración en tiempo de la corrida 11 sobre la corrida 10.

Degremont 1973, menciona que al aumentar la velocidad de filtración la duración

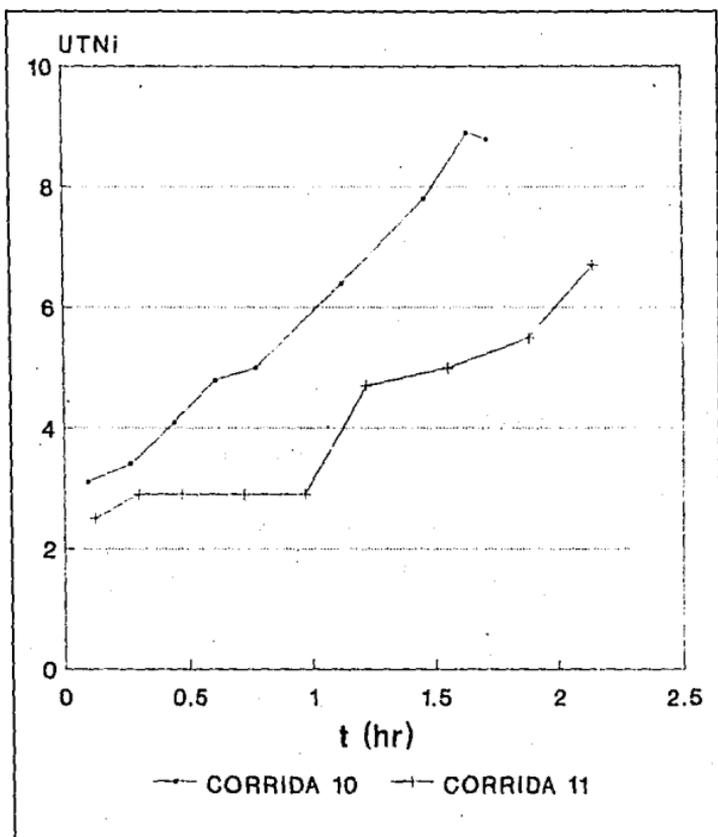


FIG. 4.1 Efecto de la turbiedad del influente en la duración de la corrida de filtración

de la corrida disminuye. En el caso en estudio se confirmó que dicha afirmación, es válida para los filtros cónicos y cilíndricos. Los resultados obtenidos para las corridas 13 y 15 permiten ejemplificar este comportamiento; para el filtro cónico de 70°. La corrida de filtración 13 llevada a cabo a una velocidad de filtración de 132

m/d con duración de 1.47 hr duró menos que la corrida 15 realizada a la velocidad de 120 m/d y con una duración de 2.45 hr. Entonces se tiene que a menor velocidad de filtración la corrida dura mayor tiempo.

En la TABLA 4.1 se presenta la duración de las corridas de filtración para los sistemas de filtración cono y cilindro; además se presenta la diferencia de tiempos de duración de las corridas entre los conos y cilindros. Se puede observar que en general los filtros cónicos presentan un menor tiempo de filtración, con excepción de las corridas 2,3 y 4.

De la TABLA 4.1 se obtiene que para el filtro cónico de 80° y el filtro cilíndrico correspondiente se tiene una $\Delta t_{prom} = 0.15$ hr y $\sigma = 0.1673$, y para el filtro cónico de 70° y el convencional correspondiente se tiene una $\Delta t_{prom} = 1.41$ hr y $\sigma = 0.27$.

TABLA 4.1 DURACIÓN DE LAS CORRIDAS DE FILTRACIÓN (hr)

Corrida	Cono	Cilindro	Δt
1	2.15	2.50	0.35
2	2.93	2.93	0.00
3	3.23	3.23	0.00
4	2.97	2.97	0.00
5	2.88	3.18	0.30
6	2.75	3.00	0.25
10	1.71	3.12	1.41
11	2.14	3.85	1.71
12	1.95	2.98	1.03
13	1.47	2.62	1.15
14	1.44	2.95	1.51
15	2.45	4.12	1.67

4.2 Eficiencia de remoción de UTN

Se hizo un análisis de la influencia de algunos parámetros; tales como, la tasa de filtración, geometría de los filtros y en el caso de los filtros cónicos la diferencia de ángulos sobre la eficiencia de remoción de UTN.

4.2.1 Eficiencia de remoción de UTN, como función de la tasa de filtración.

Algunos autores como Degrémont (1973) y Metcalf & Eddy(1977), señalan que la eficiencia de remoción de sólidos en los filtros aumenta conforme decrece la velocidad de filtración. Este fenómeno trató de analizarse para turbiedades de influente semejantes, aunque el sistema de biodiscos no dió un influente con concentraciones muy semejantes. Tomando de las corridas disponibles las más ilustrativas de este fenómeno (corridas 1 y 4), podemos observar en la FIG. 4.2, que la corrida 1 realizada a la velocidad de filtración de 152 m/d, reporta eficiencias del orden del 40 al 50 %, en cambio la corrida 4 llevada a cabo a la velocidad de 132 m/d da eficiencias mayores al 50% para el filtro cónico de 80°. Es importante mencionar que esto no ocurrió para todas las corridas, por lo que no hay un análisis estadístico que soporte lo afirmado; además de que los resultados que se les aplicaría el Análisis de Varianza no corresponden a mediciones hechas en las mismas condiciones de tiempo y concentración del influente principalmente.

4.2.2 Eficiencias de remoción de UTN en función de la geometría del filtro.

En esta parte se realiza el análisis aplicando el análisis de varianza (ANOVA) en cada uno de los sistemas experimentales.

4.2.2.1 Eficiencias de remoción de UTN para el cono de 80° y el filtro cilíndrico correspondiente.

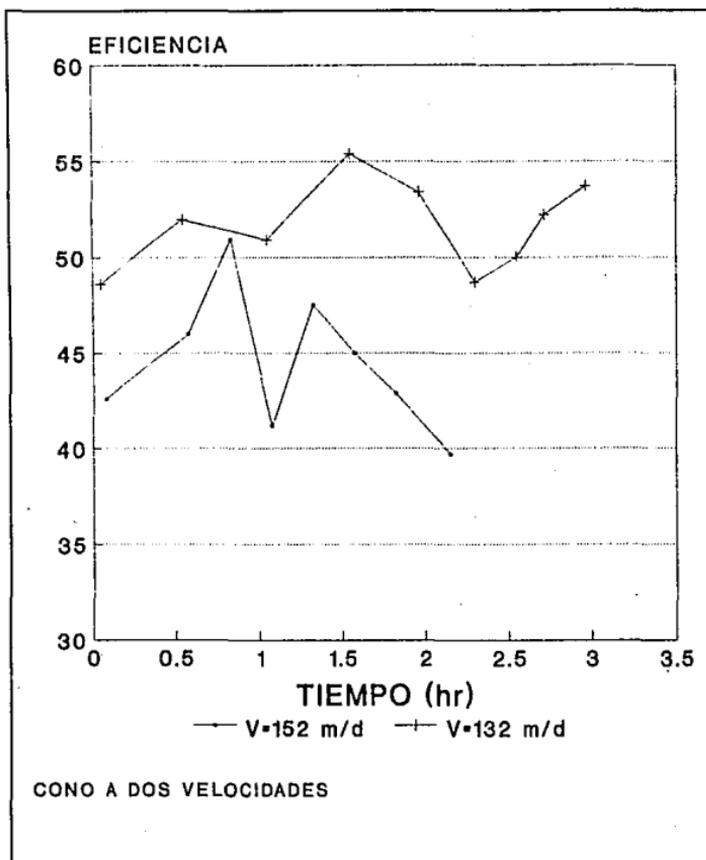


FIG. 4.2 Efecto de la velocidad de filtración en la eficiencia de remoción de UTN

Aplicando el Análisis de Varianza (ANOVA) a los resultados obtenidos (ver anexo III), para el caso del filtro cónico de 80° y el filtro convencional correspondiente se determinó, que no existen diferencias significativas entre las eficiencias de remoción que se obtienen en cada uno de los filtros (aún cuando en el filtro cónico se

observan mejores resultados).

A continuación se muestra el ANOVA aplicado a la corrida 1, el cual fue aplicado a todas las demás corridas de igual forma.

En la TABLA 4.2 se presentan las eficiencias de remoción de UTN para dos filtros de distinta geometría.

De acuerdo con las ecuaciones dadas por Sánchez (1992), para el ANOVA, tenemos que:

TABLA 4.2 EFICIENCIAS PARA FILTROS DE DISTINTA GEOMETRÍA

η_{UTN}	1	2	3	4	5	6	7	8	Ti
GEOMETRÍA									
CONO 80°	42.55	46	50.85	41.18	47.46	45	42.86	39.71	355.61
CILINDRO	40.43	44	49.15	37.25	38.98	45	41.27	39.71	335.79

Como el número de geometrías son dos, $K = 2$ y el número de mediciones es $N = 8$.

La suma de cuadrados total es $SST = 220.6175$

Luego, la suma de cuadrados de diferencias $SS_{(TR)} = 24.5520$ y la suma de cuadrados de errores casuales $SS_{(EI)} = 196.0655$,

por otra parte, las variancias son $S^2_{(TR)} = 24.5520$ y $S^2_{(EI)} = 14.0046$

por lo tanto, la prueba de Fisher $F_c = 1.75$

Ahora bien, como la $F_{0.05}$ teórica, para $v_1 = 1$ y $v_2 = 14$, de 4.60, con un nivel de confianza del 95 %, es mayor que la $F_{0.05}$ calculada, no puede concluirse que el cono vaya siempre a dar mayores valores de eficiencias; es decir, entre las eficiencias del cono de 80° y el cilindro, las diferencias no son significativas.

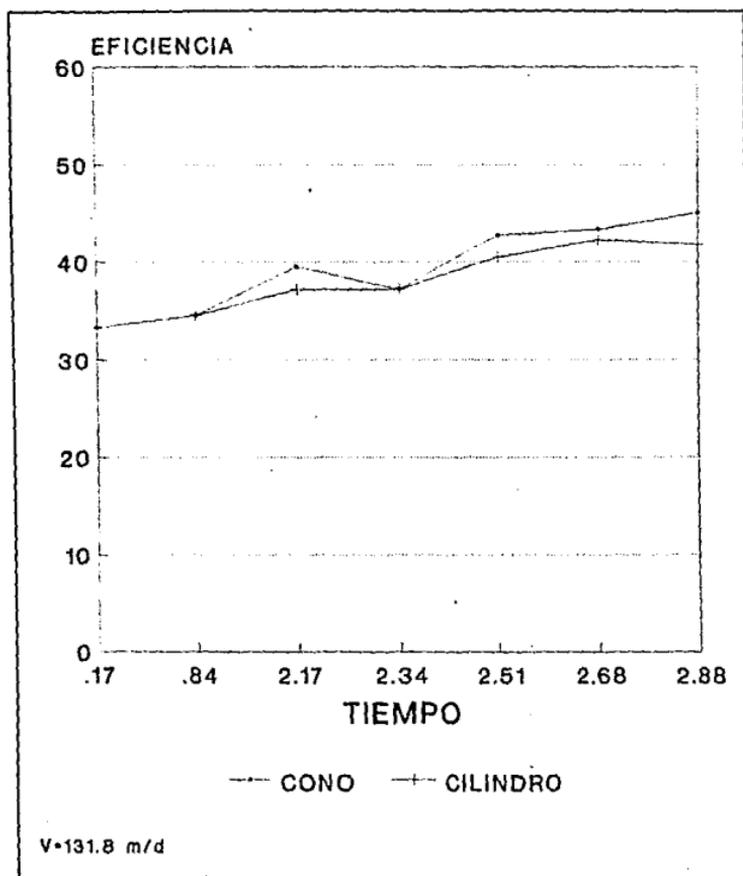


FIG. 4.3 Eficiencias de remoción de turbiedad del filtro cónico de 80° y del cilíndrico correspondiente (corrida 5).

Se hicieron las corridas por triplicado para confirmar los resultados obtenidos, resultando que al aplicar el Anova a todas las corridas de estos filtros, se obtuvo el mismo resultado de que no hay diferencias entre las eficiencias obtenidas con el filtro cónico y el cilíndrico. Este resultado fue el mismo para las corridas hechas a

las dos distintas velocidades de filtración. En la figura 4.3 se presentan las eficiencias obtenidas en la corrida 5 para el filtro cónico y el filtro cilíndrico. En el anexo II se encuentran todas las demás gráficas para ejemplificar la eficiencia vs tiempo de todas las corridas de filtración.

4.2.2.2 Eficiencias de remoción de UTN para el filtro cónico de 70° y el filtro cilíndrico correspondiente.

En las gráficas de η_{UTN} vs tiempo resultantes de las corridas hechas con estos filtros se observa que en todos los casos el filtro cónico de 70° da mejores eficiencias que el filtro convencional. Aplicando el ANOVA (ver anexo III) se obtuvo que el filtro cónico da mejores eficiencias que el filtro convencional con un 95 % de confianza. Los resultados fueron los mismos para las corridas hechas a las dos diferentes velocidades. Los resultados obtenidos en la corrida 14 son graficados en la figura 4.4.

4.2.2.3 Eficiencias de remoción de UTN de los filtros cónicos de 70° y 80°.

Se hicieron tres corridas a la misma velocidad de filtración y con las mismas concentraciones del influente con los dos filtros cónicos. De estas tres corridas hechas se obtuvieron siempre mejores eficiencias del filtro cónico de 70° sobre el filtro de 80°. Con la finalidad de confirmarlo estadísticamente, se aplicó también el ANOVA (ver anexo III) dando el mismo resultado la corrida 7. Las corridas 8 y 9 no dieron este resultado, pero es debido a la falta de mayor número de mediciones, ya que al tomar las tres corridas al mismo tiempo para aplicarles el anova, da el resultado de ser mejor el filtro de 70°, en lo que respecta a la eficiencia de remoción de UTN.

En la FIG. 4.5 se presentan las eficiencias desarrolladas por los dos conos respecto al tiempo en la corrida 7.

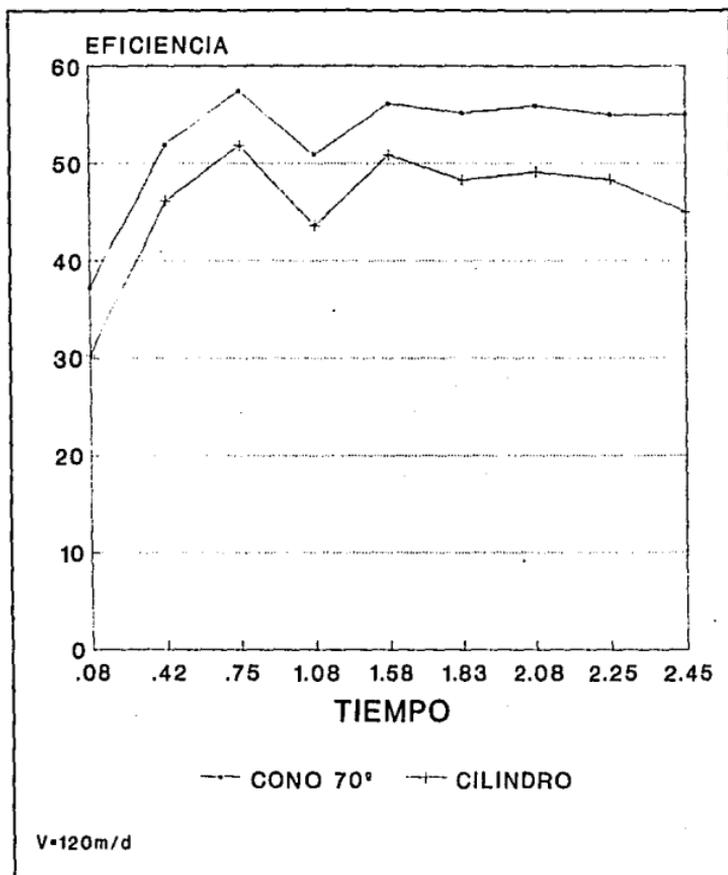


FIG. 4.4 Eficiencias de remoción de turbiedad del filtro cónico de 70° y el cilíndrico correspondiente (corrida 15).

4.3 Pérdida de Carga

En la FIG. 4.6 se presenta la relación entre la pérdida de carga y la η_{UTN} del filtro cónico de la corrida 4.

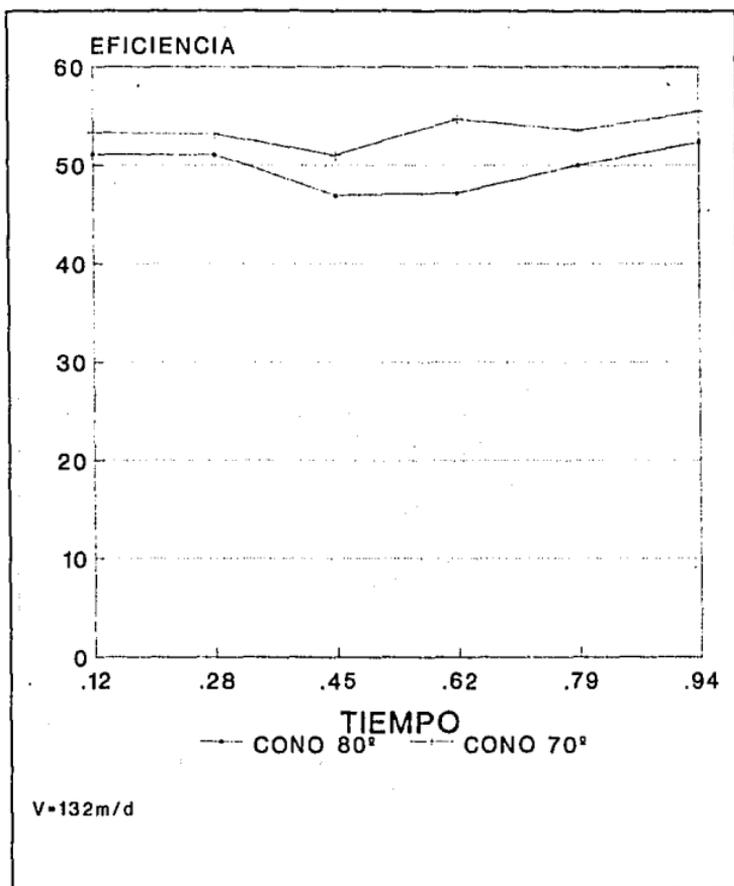


FIG. 4.5 Eficiencias de remoción de turbiedad del filtro cónico de 70° y 80° durante la corrida No. 7.

El comportamiento observado en esta figura es el mismo para todas las corridas tanto de los filtros cónicos como cilíndricos.

La pérdida de carga tiene un crecimiento exponencial respecto del tiempo, mientras

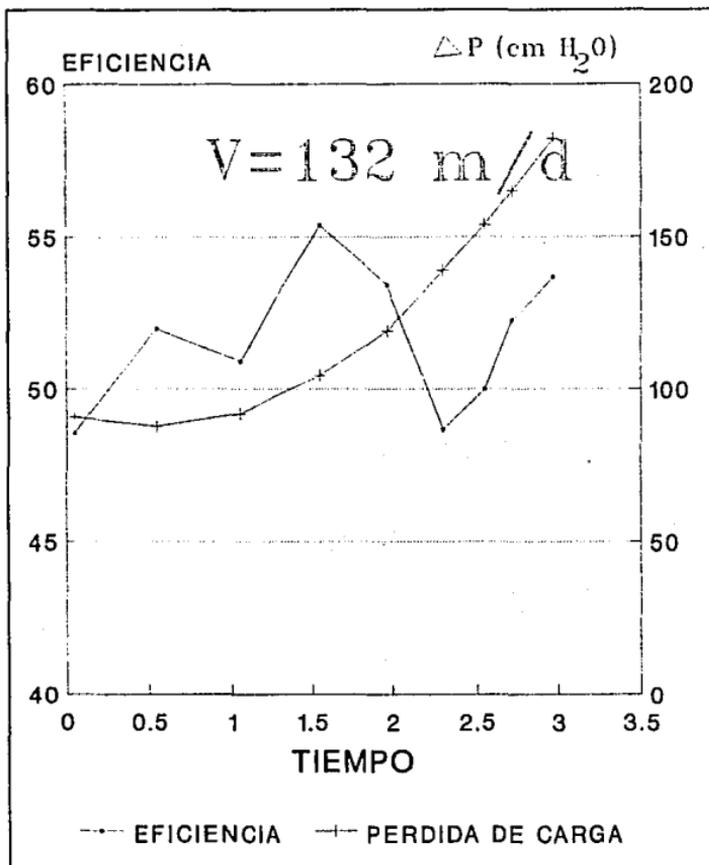


FIG. 4.6 Relación de la eficiencia de remoción de turbiedad y la pérdida de carga del filtro cónico 80° durante la corrida No. 4.

que la eficiencia se mantiene aproximadamente constante.

4.3.1 Relación de la pérdida de carga de los filtros cónicos y cilíndricos.

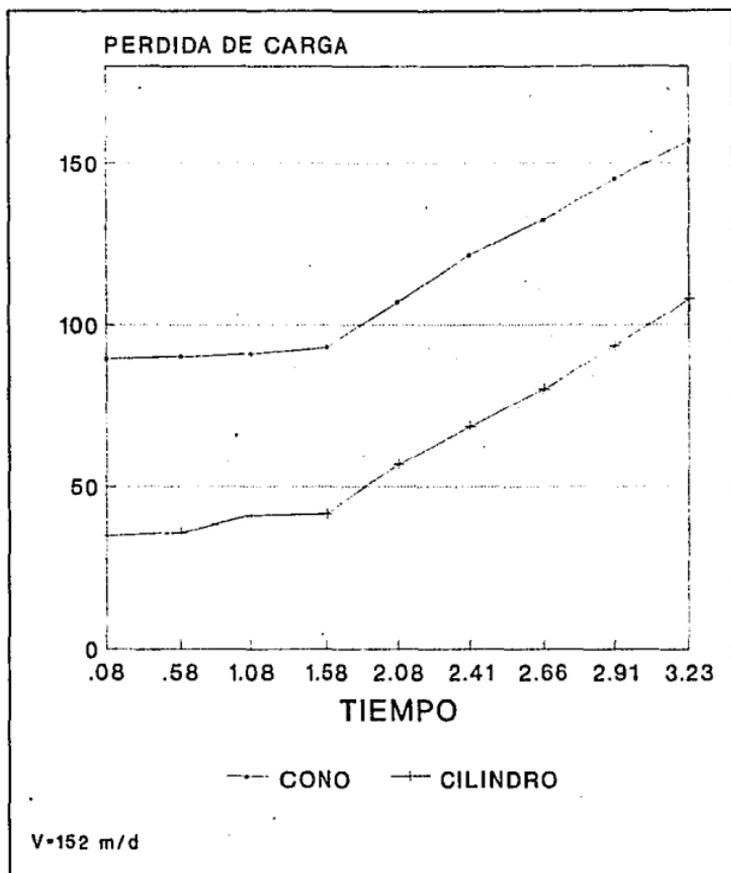


FIG. 4.7 Relación de la pérdida de carga entre el filtro cónico 80° y el cilíndrico correspondiente en la corrida 3.

Al observar la FIG. 4.7 que nos presenta la pérdida de carga del filtro cónico de 80° y el convencional respectivo, correspondiente a la corrida 3 podemos ver que la pérdida de carga desarrollada por el filtro cónico siempre es mayor. Este mismo resultado se obtuvo para la totalidad de las corridas hechas (ver anexo II).

4.4 Sólidos retenidos a través del medio filtrante

Camp (1964), considera que la mayor parte de los sólidos son retenidos en las capas superiores del lecho, aún si se utilizan velocidades de filtración elevadas. Por otra parte Young (1977) propone que a mayor velocidad de filtración, el depósito de sólidos ocurre a una mayor profundidad del lecho. De acuerdo con las determinaciones hechas de sólidos retenidos a través del medio filtrante (resultados presentados en el anexo IV) se encontró que los sólidos son retenidos entre los 5-10 cm primeros del lecho para los filtros cilíndricos y para los filtros cónicos se alcanzaron profundidades de hasta 25-30 cm.

Se encontró el mismo resultado aplicando dos velocidades en las corridas de filtración.

Los filtros fueron empacados con arena de la misma granulometría y el volumen de la arena utilizada para cada filtro fue el mismo, sólo que por la geometría del cono se tuvo una mayor altura del medio en este, que en el cilindro.

En la FIG. 4.8 se presenta el perfil de sólidos retenidos a través de los filtros cónico y cilíndrico para la corrida número 15.

Con lo visto estamos de acuerdo con Camp en lo que se refiere al filtro cilíndrico y con Young para el filtro cónico, ya que en el filtro cónico va aumentando la velocidad de filtración gradualmente que es lo que genera que los sólidos vayan penetrando a mayor profundidad y por lo tanto, se está utilizando en gran cantidad el medio filtrante y no lo que ocurre con los filtros cilíndricos que desperdician mucho medio filtrante; esto es, no lo utilizan en gran parte.

Al sumar los g de sólidos / Kg de arena retenidos a través de todo el medio filtrante, para el caso del filtro cónico de 70° y el cilindro correspondiente se encontró que en promedio que el filtro cónico retiene el 39.7% más que el filtro cilíndrico. Así como, el volumen de medio filtrante ocupado por el filtro cónico es en promedio el

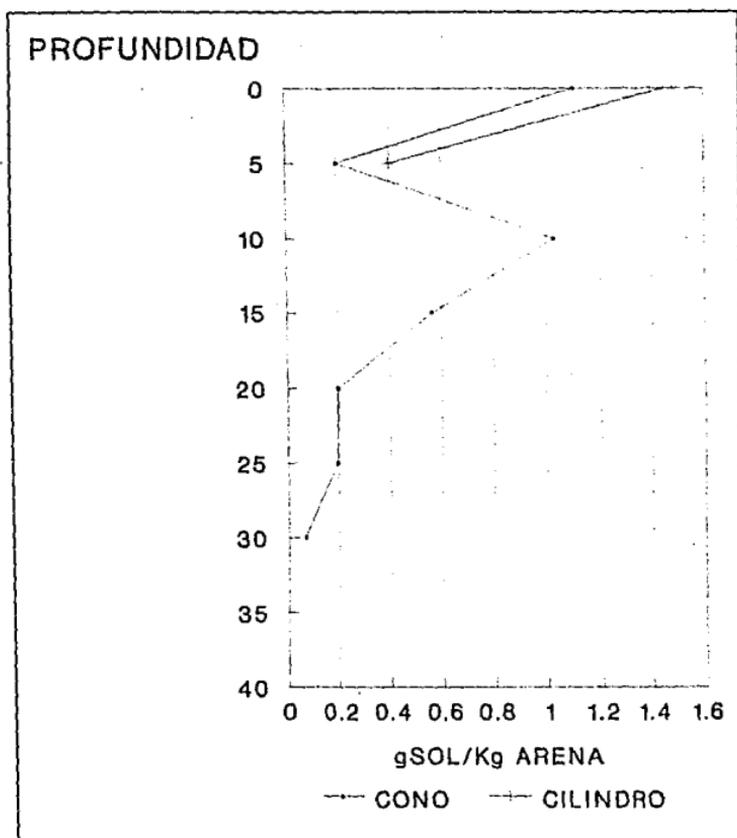


FIG. 4.8 Perfil de sólidos retenidos en el medio de los filtros cónico 70° y cilíndrico correspondiente a la corrida No. 15 con tasa de filtración de 120 m/d.

43% más que el del filtro cilíndrico.

4.5 Lavado

La eliminación de los sólidos retenidos se realizó por retrolavado de los filtros. El lavado en nuestro caso para todos los filtros, tanto cónicos como cilíndricos, se dió por terminado cuando a simple vista ya no se vieran salir sólidos del medio. De aquí se observó que los filtros cónicos se pueden retrolavar solamente con agua de una manera muy eficiente. En el lavado de estos filtros se genera un movimiento continuo del medio filtrante que permite, que en su totalidad los sólidos retenidos puedan ser eliminados sin la necesidad de utilizar algún agente externo que ayude en el lavado del medio.

Por otra parte, en los filtros convencionales se tuvo que utilizar un agente externo que ayudara en el lavado del medio filtrante, ello consistió en la agitación del medio filtrante con un palo, lo que equivaldría a tener algún agitador mecánico que moviera el medio. Si no se hubiera utilizado esta agente externo la arena se hubiera lavado con toda el agua tratada y con una mala eficiencia.

La cantidad de agua utilizada para el lavado del filtro cilíndrico no es equiparable a la usada en los filtros cónicos, ya que se usó otro agente para la limpieza de la arena. Debe quedar claro que sin este agente la cantidad de agua de lavado de los filtros cilíndricos sería muy superior que la de los filtros cónicos. La cantidad de agua de lavado está reportada en la TABLA 4.3.

La agua utilizada para el lavado de los filtros cónicos de 70° fue en promedio el 26.35% del total de agua tratada, para darnos un rendimiento del 73.65%. El filtro convencional correspondiente a este filtro cónico en promedio utilizó para su lavado el 16.1% del total de agua tratada, dándonos un rendimiento del 83.9%.

4.5.1 Pérdida de arena durante el lavado

Durante el lavado de los filtros se observó que los filtros cónicos no perdían arena, mientras que los filtros cilíndricos si pierden en promedio 1.7% del total de arena del medio. El que no se pierda arena en los filtros cónicos es debido a su geometría,

se tiene una mayor velocidad en el fondo de los filtros que va disminuyendo con la altura de los mismos, lo cual permite que se expanda el lecho para poder separar los sólidos retenidos que por ser más ligeros que la arena estos sigan el sentido del flujo, mientras que la arena alcanza cierta altura y por ser más densa se sedimenta debido a la disminución gradual de la velocidad que ya no es suficiente para lograr arrastrar la arena junto con los sólidos.

TABLA 4.3 CANTIDAD DE AGUA DE LAVADO

Corrida	Agua de lavado (l)		Volumen Producido (l)		% empleado en el lavado	
	Cono	Cilindro	Cono	Cilindro	Cono	Cilindro
1	259.20	206.50	967.5	1125.0	26.8	18.4
2	214.00	244.80	1318.5	1318.5	16.2	18.6
3	261.46	198.05	1453.5	1453.5	18.0	13.6
4	288.42	273.84	1579.5	1579.5	18.3	17.3
5	267.67	272.50	1123.2	1240.2	23.8	22.0
6	393.30	393.75	1072.5	1170.0	36.7	33.7
10	633.60	1008.0	2586.3	4361.8	24.5	23.1
11	492.80	488.40	3098.9	5382.3	15.9	9.10
12	559.20	546.48	2463.8	3797.7	22.7	14.4
13	586.52	709.02	2050.4	3662.8	28.6	19.4
14	760.32	720.00	1805.4	3759.5	42.1	19.2
15	759.19	594.36	3122.3	5246.3	24.3	11.30

4.6 Cantidad de agua tratada

En la TABLA 4.4 se encuentran las cantidades de agua tratada tanto para los filtros cónicos y los cilíndricos para cada corrida.

En el caso del cono de 80° y el cilindro correspondiente trataron la misma cantidad

de agua las corridas 2, 3, y 4 debido a que las corridas de filtración duraron lo mismo para ambos filtros. Duraron lo mismo debido a que el filtro cilíndrico a pesar de tener al principio de la corrida menor carga disponible que el filtro cónico al ir avanzando la corrida empezó a tirar carga más rápidamente que el filtro cónico llegando a igualarlo.

TABLA 4.4 CANTIDAD DE AGUA TRATADA

Corrida	Duración		l tratados	
	Cono	Cilindro	Cono	Cilindro
1	2.15	2.50	967.50	1125.00
2	2.93	2.93	1318.50	1318.50
3	3.23	3.23	1453.50	1453.50
4	2.97	2.97	1579.50	1579.50
5	2.88	3.18	1123.20	1240.20
6	2.75	3.00	1072.50	1170.00
10	1.71	3.12	2586.30	4361.76
11	2.14	3.85	3098.90	5382.30
12	1.95	2.98	2463.84	3797.71
13	1.47	2.62	2050.40	3662.76
14	1.44	2.95	1805.40	3759.48
15	2.45	4.12	3122.28	5246.28

Para el filtro cónico de 70° y el convencional correspondiente siempre trató mayor cantidad de agua el filtro cilíndrico (en promedio el 41.8% más), debido al mayor tiempo de operación que tuvo sobre el filtro cónico.

5. CONCLUSIONES

Los filtros cónicos difieren en su funcionamiento de los filtros cilíndricos en los siguientes aspectos: la eficiencia de remoción de los filtros, la pérdida de carga, la duración de las corridas de filtración, la penetración de sólidos en el medio filtrante y la pérdida de arena durante el lavado.

Las eficiencias de remoción de turbiedad se ven afectadas por la geometría de los filtros. El filtro cónico de 70° da mejores eficiencias de remoción de UTN que el filtro cilíndrico debido al incremento de velocidad que experimenta el fluido durante la filtración, favoreciendo la acción de los mecanismos de transporte y fijación.

La concentración de sólidos en el influente influye en la duración de la corrida de filtración de los filtros cónicos y cilíndricos. Para mayores turbiedades del influente la duración de la corrida disminuye.

A mayor velocidad de filtración la duración de la corrida disminuye en los filtros cónicos y cilíndricos.

El ángulo de inclinación en el filtro cónico influye en la eficiencia de remoción de UTN, a causa de que en el filtro de menor ángulo (70°), pero mayor inclinación, los cambios de velocidad en su interior son más bruscos que en el filtro de mayor ángulo.

El filtro cónico de 80° de inclinación no mejoró las eficiencias de remoción de UTN del filtro cilíndrico, debido a que el ángulo de inclinación no fue suficiente para poder favorecer los mecanismos de transporte y fijación en la filtración.

La pérdida de carga inicial de los filtros cónicos es muy superior a la de los filtros cilíndricos. Esta superioridad es debida a la reducción de área a través de los filtros cónicos.

La pérdida de carga tiene un crecimiento exponencial en todos los filtros, tanto cónicos, como cilíndricos.

Los filtros cónicos aprovechan en mayor cantidad el espesor del medio filtrante que los filtros cilíndricos. Al reducirse el área en los filtros cónicos, la velocidad de filtración aumenta provocando un mayor penetramiento de los sólidos en el medio filtrante.

El lavado de los filtros cónicos es suficiente con agua a contracorriente, mientras que los filtros cilíndricos requieren de un agente externo para el mejor lavado del medio filtrante.

La pérdida de arena en los filtros cónicos es nula, a diferencia de los filtros cilíndricos que pierden aproximadamente el 1.7 % del total del lecho. En el lavado, el flujo es ascendente y, por tanto, las velocidades decrecen al aumentar el área, esto favorece la separación de los flóculos retenidos y evita la pérdida de arena. En general, el agua tratada por los filtros cónicos es menor que la tratada por los filtros cilíndricos, debido al mayor requerimiento de carga disponible de los filtros cónicos sobre los cilíndricos.

El rendimiento de los filtros cónicos respecto a los cilíndricos es menor en un 10% cuando los filtros cilíndricos son lavados con agitación mecánica. Cuando no hay agitación mecánica el rendimiento de los filtros cilíndricos es nulo.

6. RECOMENDACIONES

Es recomendable experimentar con filtros cónicos con varios ángulos de inclinación con el objetivo de encontrar el ángulo con el que se obtengan las mejores eficiencias de remoción de UTN.

Es deseable seguir experimentando sobre otras variables de filtración como: la velocidad de filtración, granulometrías del medio diferentes, características de las partículas suspendidas (tamaño, densidad, forma, etc.); temperatura, etc., con el objeto de mejorar el filtro cónico.

Dar un mayor volumen de la carga disponible que pueda hacer durar las corridas de filtración un mayor tiempo.

Evaluar y profundizar en el estudio de técnicas de lavado de los filtros cónicos. Mejorar la técnica de determinación de sólidos retenidos en el medio filtrante.

Se recomienda hacer el estudio económico de factibilidad del filtro cónico.

Se recomienda utilizar filtros cónicos en vez de los convencionales debido a la gran cantidad de ventajas que presenta sobre los convencionales.

7. BIBLIOGRAFÍA

Adin A., Baumann, R. and Cleasby, J.L. (1979). The application of theory to pilot-plant design. *Journal AWWA*. January.

Amirtharajah, A. (1985). The interface between filtration and backwashing. *Wat. Res.* May.

Amirtharajah, A. (1988). Some theoretical and conceptual views of filtration. *Journal AWWA*. December.

Arboleda, V. J. (1969). Manual de tratamiento de aguas potables. Programa de educación de Ingeniería Sanitaria. Caracas, Venezuela.

AWWA, ASCE, CSSE (1969). *Water Treatment Plant*. Publicado por AWWA Inc. New York. N. Y.

AWWA. (1989). *Standard methods for examination of water and wastewater*. American Water Work Association, 16th. ed. U.S.A.

Camp, F. Thomas R. (1964). *Theory of water filtration*. ASCE. August.

Cleasby, J. L., Williamson, M.M., and Baumann, E. R. (1963). Effect of filtration rate changes on quality. *Journal AWWA*. July.

Cleasby, J. L. (1969). Filter rate control without rate controllers. Journal AWWA. April.

Dahab M. & Young J. (1977). Unstratified-bed filtration of wastewater. Journal ASCE. February.

Deb A. (1969). Theory of sand filtration. Journal ASCE. June.

Degrémont (1973). Manual técnico del agua.

Francois, R. J. and Van Haute A. A. (1985). Backwashing and Conditioning of a deep filter. Wat. Res. November.

Ives, K. J. (1965). Research on variables affecting filtration. Journal ASCE. August.

Jiménez B. (1988). Determinación de los principales parámetros de diseño para la filtración de efluentes secundarios. Vol. I. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D. F.

Mata, R. M. (1988). Filtración rápida sobre lechos de arena. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM. México, D.F.

McCabe & Smith, (1981). Operaciones básicas de Ingeniería Química. Vol. II. Ed. Reverté, S. A.

Metcalf & Eddy, (1977). Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Ed. Labor, S. A.

Montgomery, J. M. (1985). Water treatment, principles and design. Inc. A. Wiley Interscience Publications.

Ramalho, R. S. (1977). Introduction to waste water treatment process. Laval University Quebec, Canadá. Academic Press.

Sánchez J. L. y Fuentes O. A. (1992). Problemas de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Series del Instituto de Ingeniería. No. D-33.

Tchobanoglous G. (1970). Filtration techniques in tertiary treatment. Journal WPCF, Vol. 42. No. 4.

Tchobanoglous G. & Schoeder, E. (1987). Water Quality. Adisson-Wesley, U.S.A.

Tebbutt T. H. Y. (1990). Fundamentos de Control de la Calidad del Agua. Ed. Limusa. México.

Valiente B. (1973). Prácticas de laboratorio de momentum y calor. Facultad de Química, UNAM. 5a reimpresión (1985).

Weber, W. J. (1972). Physicochemical process for water quality control. Wiley-

Interscience. New York, U.S.A.

Weber, W. J. (1979). Control de calidad del agua. Procesos fisicoquímicos. Ed. Reverté, S. A. México.

ANEXOS

ANEXO 1.
RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 1 $v_{filtración}$: 152 m/día

Duración: 2.15 hr Fecha: 4/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.1183	103.0	4.7	2.7	42.6
2	0.58	0.1176	104.5	5.0	2.7	46.0
3	0.83	0.1176	109.5	5.9	2.9	50.9
4	1.08	0.1169	117.5	5.1	3.0	41.2
5	1.33	0.1163	128.0	5.9	3.1	47.5
6	1.58	0.1156	139.0	6.0	3.3	45.0
7	1.83	0.1130	152.0	6.3	3.6	42.9
8	2.15	0.1123	167.0	6.8	4.1	39.7
9						

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 1 $v_{filtración}$: 152 m/día

Duración: 2.5 hr Fecha: 4/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr.	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.1183	41.5	4.7	2.8	40.4
2	0.58	0.1183	44.0	5.0	2.8	44.0
3	0.83	0.1176	49.0	5.9	3.0	49.1
4	1.08	0.1176	57.0	5.1	3.2	37.2
5	1.33	0.1163	68.0	5.9	3.6	39.0
6	1.58	0.1163	78.0	6.0	3.3	45.0
7	1.83	0.1149	91.0	6.3	3.7	41.3
8	2.15	0.1130	104.0	6.8	4.1	39.7
9						

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 2 $V_{filtración}$: 152 m/día

Duración: 2.93 hr Fecha: 5/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.13	0.1198	101.5	3.4	1.6	52.9
2	0.8	0.1198	104.0	4.7	3.0	36.2
3	1.13	0.1190	104.0	5.3	3.3	37.7
4	1.38	0.1183	110.0	5.6	3.2	42.9
5	1.88	0.1190	111.5	5.7	3.6	36.8
6	2.21	0.1183	116.5	6.3	3.8	39.7
7	2.46	0.1183	126.5	7.1	4.1	42.3
8	2.71	0.1169	140.5	6.9	4.2	39.1
9	2.93	0.1156	153.0	7.6	4.3	43.4

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 2 $v_{filtración}$: 152 m/día

Duración: 2.93 hr Fecha: 5/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.13	0.1198	38.0	3.4	1.8	47.1
2	0.8	0.1198	42.0	4.7	3.1	34.0
3	1.13	0.1190	42.5	5.3	3.3	37.7
4	1.38	0.1183	43.0	5.6	3.4	39.3
5	1.88	0.1183	52.5	5.7	3.6	36.8
6	2.21	0.1176	65.0	6.3	3.9	38.1
7	2.46	0.1176	76.0	7.1	4.2	40.9
8	2.71	0.1176	90.0	6.9	4.3	37.7
9	2.93	0.1176	105.0	7.6	4.4	42.1

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 3 Velocidad: 152 m/día

Duración: 3,23 hr Fecha: 6/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.1205	89.5	2.7	1.5	44.4
2	0.58	0.1205	90.0	3.3	1.9	42.4
3	1.08	0.1205	91.0	4.4	2.7	38.6
4	1.58	0.1205	93.0	5.5	3.3	40.0
5	2.08	0.1183	107.0	6.2	3.4	45.2
6	2.41	0.1183	121.5	6.5	3.9	40.0
7	2.66	0.1163	132.5	6.9	3.9	43.5
8	2.91	0.1163	145.0	7.1	3.9	45.1
9	3.23	0.1163	157.0	7.4	4.1	44.6

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 3 $v_{filtración}$: 152 m/día

Duración: 3.23 hr Fecha: 6/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.1205	35.0	2.7	1.6	40.7
2	0.58	0.1205	36.0	3.3	1.9	42.4
3	1.08	0.1205	41.0	4.4	2.8	36.4
4	1.58	0.1205	41.5	5.5	3.3	40.0
5	2.08	0.1205	57.0	6.2	3.4	45.2
6	2.41	0.1198	68.5	6.5	3.9	40.0
7	2.66	0.1190	80.0	6.9	4.0	42.0
8	2.91	0.1183	93.5	7.1	4.0	43.7
9	3.23	0.1176	108.0	7.4	4.3	41.9

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 4 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 2.97 hr Fecha: 23/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.05	0.1053	91.0	3.5	1.8	48.6
2	0.55	0.1047	88.0	5.0	2.4	52.0
3	1.05	0.1036	92.0	5.5	2.7	50.9
4	1.55	0.1031	104.5	6.5	2.9	55.4
5	1.97	0.1010	119.0	7.3	3.4	53.4
6	2.3	0.1010	139.0	7.6	3.9	48.7
7	2.55	0.1005	154.0	8.6	4.3	50.0
8	2.72	0.0990	165.0	9.0	4.3	52.2
9	2.97	0.0976	182.0	9.5	4.4	53.7

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 4 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 2.97 hr Fecha: 23/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.05	0.1064	33.0	3.5	1.8	48.6
2	0.55	0.1058	39.0	5.0	2.4	52.0
3	1.05	0.1042	49.0	5.5	2.7	50.9
4	1.55	0.1036	61.0	6.5	3.0	53.8
5	1.97	0.1010	75.0	7.3	3.5	52.0
6	2.3	0.1000	89.0	7.6	4.0	47.4
7	2.55	0.0990	101.0	8.6	4.5	47.7
8	2.72	0.0980	117.0	9.0	4.4	51.1
9	2.97	0.0966	131.5	9.5	4.5	52.6

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 5 $v_{filtración}$: 132 m/dfa

Duración: 2.88 hr Fecha: 7/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.17	0.1053	95.0	7.8	5.2	33.3
2	0.84	0.1042	108.0	8.1	5.3	34.6
3	2.17	0.1036	158.0	8.6	5.2	39.5
4	2.34	0.1031	169.0	8.6	5.4	37.2
5	2.51	0.1020	179.0	8.9	5.1	42.7
6	2.68	0.0976	190.0	9.0	5.1	43.3
7	2.88	0.0971	200.0	9.1	5.0	45.1
8						
9						

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 5 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 3.18 hr Fecha: 7/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.17	0.1036	35.0	7.8	5.2	33.3
2	0.84	0.1036	36.0	8.1	5.3	34.6
3	2.17	0.1036	89.0	8.6	5.4	37.2
4	2.34	0.1031	99.0	8.6	5.4	37.2
5	2.51	0.1031	109.0	8.9	5.3	40.4
6	2.68	0.1026	119.5	9.0	5.2	42.2
7	2.88	0.1020	132.0	9.1	5.3	41.8
8						
9						

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 6 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 2.75 hr Fecha: 11/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.13	0.1053	94.0	3.2	1.9	40.6
2	1.13	0.1047	106.5	5.0	2.7	46.0
3	1.63	0.1036	118.5	5.4	3.7	31.5
4	1.88	0.1026	136.5	7.0	3.7	47.1
5	2.13	0.1020	153.0	7.2	3.9	45.8
6	2.38	0.1015	171.5	7.7	4.5	41.6
7	2.63	0.1015	187.5	8.4	4.8	42.9
8	2.75	0.0976	190.5	8.6	4.7	45.4
9						

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 6 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 3.0 hr Fecha: 11/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.13	0.1053	36.0	3.2	1.9	40.6
2	1.13	0.1053	41.0	5.0	2.8	44.0
3	1.63	0.1053	70.0	5.4	3.7	31.5
4	1.88	0.1053	85.0	7.0	3.7	47.1
5	2.13	0.1053	98.0	7.2	4.0	44.4
6	2.38	0.1036	117.0	7.7	4.5	41.6
7	2.63	0.1015	135.5	8.4	4.9	41.7
8	2.75	0.1000	144.0	8.6	5.2	39.5
9						

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 7 $v_{filtración}$: 132 m/día
 Duración: 0.94 hr Fecha: 29/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.12	0.1042	90.0	4.5	2.2	51.1
2	0.28	0.1042	93.0	4.7	2.3	51.1
3	0.45	0.1042	95.0	4.9	2.6	46.9
4	0.62	0.1042	98.0	5.3	2.8	47.2
5	0.79	0.1036	101.5	5.6	2.8	50.0
6	0.94	0.1036	104.0	6.3	3.0	52.4
7						
8						
9						

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 7 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 0.94 hr Fecha: 29/10/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.12	0.3361	186.5	4.5	2.1	53.3
2	0.28	0.3361	189.0	4.7	2.2	53.2
3	0.45	0.3306	196.0	4.9	2.4	51.0
4	0.62	0.3306	207.0	5.3	2.4	54.7
5	0.79	0.3279	211.0	5.6	2.6	53.6
6	0.94	0.3226	213.5	6.3	2.8	55.6
7						
8						
9						

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 8 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 0.92 hr Fecha: 4/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.12	0.1053	91.0	6.5	4.3	33.9
2	0.29	0.1053	93.0	6.5	4.0	38.5
3	0.46	0.1053	94.5	7.3	3.9	46.6
4	0.63	0.1047	97.0	7.5	4.0	46.7
5	0.80	0.1042	100.5	7.4	4.0	45.9
6	0.92	0.1042	103.5	7.3	3.9	46.6
7						
8						
9						

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 8 $v_{filtración}$: 132 m/d/a

Duración: 0.92 hr Fecha: 4/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.12	0.3306	192.0	6.5	3.9	40.0
2	0.29	0.3279	200.0	6.5	3.7	43.1
3	0.46	0.3226	207.0	7.3	3.6	50.7
4	0.63	0.3175	219.5	7.5	3.7	50.7
5	0.80	0.3150	226.0	7.4	3.6	51.4
6	0.92	0.3150	234.5	7.3	3.7	49.3
7						
8						
9						

FILTRO CÓNICO 80°

Corrida No: 9 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 0.93 hr Fecha: 5/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.1053	94.0	3.4	2.0	41.2
2	0.25	0.1053	96.0	3.6	2.1	41.7
3	0.42	0.1053	98.5	4.2	2.4	42.9
4	0.59	0.1053	102.0	5.1	2.5	51.0
5	0.76	0.1047	105.5	5.2	2.5	51.9
6	0.93	0.1042	107.0	4.9	2.6	46.9
7						
8						
9						

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 9 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 0.93 hr Fecha: 5/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.3540	186.0	3.4	1.9	44.1
2	0.25	0.3478	188.5	3.6	2.0	44.4
3	0.42	0.3448	190.0	4.2	2.2	47.6
4	0.59	0.3419	195.5	5.1	2.2	56.9
5	0.76	0.3419	201.0	5.2	2.3	55.8
6	0.93	0.3390	204.0	4.9	2.3	53.1
7						
8						
9						

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 10 $v_{filtración}$: 132 m/dfa

Duración: 1.71 hr. Fecha: 8/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		Q_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.10	0.3738	166.0	3.1	1.8	41.9
2	0.27	0.3704	167.5	3.4	1.9	44.1
3	0.44	0.3636	173.0	4.1	2.0	51.2
4	0.61	0.3604	176.5	4.8	2.4	50.0
5	0.77	0.3604	179.0	5.0	2.4	52.0
6	1.12	0.3604	182.0	6.4	3.2	50.0
7	1.46	0.3571	183.5	7.8	3.9	50.0
8	1.63	0.3571	184.5	8.9	4.1	53.9
9	1.71	0.3571	187.0	8.8	4.1	53.4

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 10 $V_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 3.12 hr Fecha: 8/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.10	0.3738	23.0	3.1	1.9	38.7
2	0.27	0.3670	23.0	3.4	2.0	41.2
3	0.44	0.3670	23.0	4.1	2.4	41.5
4	0.61	0.3636	23.0	4.8	2.7	43.7
5	0.77	0.3636	26.0	5.0	2.6	48.0
6	1.12	0.3604	34.0	6.4	3.4	46.9
7	1.46	0.3604	42.0	7.8	4.2	46.2
8	1.63	0.3571	56.5	8.9	4.4	50.6
9	1.71	0.3571	64.0	8.8	4.3	51.1

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 11 $V_{filtración}$: 132 m/dfa

Duración: 2.14 hr Fecha: 9/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.13	0.3636	168.0	2.5	1.3	48.0
2	0.30	0.3704	170.0	2.9	1.4	51.7
3	0.47	0.3636	173.0	2.9	1.4	51.7
4	0.72	0.3636	176.0	2.9	1.3	55.2
5	0.97	0.3604	179.5	2.9	1.3	55.2
6	1.22	0.3571	182.0	4.7	1.8	61.7
7	1.55	0.3571	186.0	5.0	2.4	52.0
8	1.88	0.3509	190.0	5.5	3.1	43.6
9	2.14	0.3509	201.0	6.7	3.3	50.8

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 11 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 3.85 hr Fecha: 9/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.13	0.3809	28.0	2.5	1.6	36.0
2	0.30	0.3738	28.0	2.9	1.6	44.8
3	0.47	0.3704	29.0	2.9	1.5	48.3
4	0.72	0.3636	29.0	2.9	1.6	44.8
5	0.97	0.3636	29.0	2.9	1.5	48.3
6	1.22	0.3636	31.0	4.7	2.0	57.4
7	1.55	0.3636	39.0	5.0	2.6	48.0
8	1.88	0.3604	49.0	5.5	3.5	36.4
9	2.14	0.3509	61.0	6.7	3.5	47.8

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 12 $V_{filtración}$: 120 m/día

Duración: 1.95 hr Fecha: 9/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.15	0.3306	175.5	7.0	4.6	34.3
2	0.65	0.3279	181.0	7.8	4.5	42.3
3	0.98	0.3279	187.5	8.2	4.5	45.1
4	1.32	0.3226	197.5	8.3	4.4	47.0
5	1.66	0.3200	213.0	8.5	4.3	49.4
6	1.83	0.3149	217.5	8.4	4.3	48.8
7	1.95	0.3101	222.0	8.5	4.4	48.2
8						
9						

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 12 $v_{filtración}$: 120 m/día

Duración: 2,98 hr Fecha: 9/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.15	0.3448	39.0	7.0	4.8	31.4
2	0.65	0.3478	45.0	7.8	4.6	41.0
3	0.98	0.3419	60.0	8.2	4.6	43.9
4	1.32	0.3361	79.0	8.3	4.6	44.6
5	1.66	0.3333	98.0	8.5	4.7	44.7
6	1.83	0.3200	108.0	8.4	4.6	45.2
7	1.95	0.3200	114.0	8.5	4.6	45.9
8						
9						

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 13 $V_{filtración}$: 132 m/dfa

Duración: 1.47 hr Fecha: 10/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.3571	182.0	3.1	1.8	41.9
2	0.33	0.3540	183.0	3.9	2.1	46.2
3	0.58	0.3540	185.0	4.3	2.1	51.2
4	0.75	0.3540	185.0	5.6	2.3	58.9
5	1.00	0.3540	186.0	6.7	2.7	59.7
6	1.25	0.3509	187.0	9.4	4.2	55.3
7	1.42	0.3478	192.5	9.8	4.6	53.1
8	1.47	0.3448	195.5	10.0	4.6	54.0
9						

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 13 $v_{filtración}$: 132 m/día

Duración: 2.62 hr Fecha: 10/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.3809	37.0	3.1	1.9	38.7
2	0.33	0.3774	42.0	3.9	2.2	43.6
3	0.58	0.3774	42.0	4.3	2.3	46.5
4	0.75	0.3774	44.0	5.6	2.4	57.1
5	1.00	0.3774	49.0	6.7	2.8	58.2
6	1.25	0.3774	61.0	9.4	4.5	52.1
7	1.42	0.3704	76.0	9.8	4.7	52.0
8	1.47	0.3571	82.0	10.0	4.7	53.0
9						

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 14 $v_{filtración}$: 120 m/d/a

Duración: 1.44 hr Fecha: 10/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.12	0.3279	169.0	11.0	7.9	28.2
2	0.46	0.3252	174.0	11.5	7.4	35.7
3	0.80	0.3175	181.0	11.5	7.2	37.4
4	1.14	0.3175	196.0	11.8	7.4	37.3
5	1.27	0.3150	206.5	12.0	7.0	41.7
6	1.39	0.3125	216.0	12.0	7.2	40.0
7	1.44	0.3101	220.0	12.0	7.3	39.2
8						
9						

FILTRO CILÍNDRICO

Corrida No: 14 $V_{filtración}$: 120 m/día

Duración: 2.95 hr Fecha: 10/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.12	0.3448	39.0	11.0	8.1	26.4
2	0.46	0.3448	45.0	11.5	8.2	28.7
3	0.80	0.3448	50.0	11.5	7.7	33.0
4	1.14	0.3448	58.5	11.8	8.0	32.2
5	1.27	0.3419	68.0	12.0	8.0	33.3
6	1.39	0.3419	77.0	12.0	7.6	36.7
7	1.44	0.3390	83.0	12.0	7.9	34.2
8						
9						

FILTRO CÓNICO 70°

Corrida No: 15 $v_{filtración}$: 120 m/día

Duración: 2.45 hr Fecha: 18/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.3306	170.0	4.3	2.7	37.2
2	0.42	0.3279	170.0	5.2	2.5	51.9
3	0.75	0.3279	173.5	5.4	2.3	57.4
4	1.08	0.3279	177.0	5.5	2.7	50.9
5	1.58	0.3279	180.0	5.7	2.5	56.1
6	1.83	0.3252	190.0	5.8	2.6	55.2
7	2.08	0.3226	199.0	5.9	2.6	55.9
8	2.25	0.3200	206.0	6.0	2.7	55.0
9	2.45	0.3175	217.0	6.0	2.7	55.0

FILTRO CILÍNDRICO

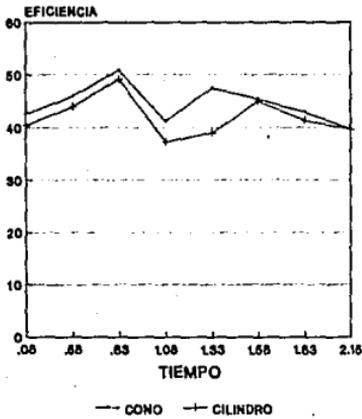
Corrida No: 15 $v_{filtración}$: 120 m/día

Duración: 4.12 hr. Fecha: 18/11/93

MUESTRA	TIEMPO hr	Q l/s	Δp cm H ₂ O	UTN		η_{UTN}
				INF	EFL	
1	0.08	0.3419	34.5	4.3	3.0	30.2
2	0.42	0.3389	35.0	5.2	2.8	46.1
3	0.75	0.3389	36.5	5.4	2.6	51.8
4	1.08	0.3389	41.0	5.5	3.1	43.6
5	1.58	0.3389	45.0	5.7	2.8	50.9
6	1.83	0.3389	56.0	5.8	3.0	48.3
7	2.08	0.3389	64.0	5.9	3.0	49.1
8	2.25	0.3361	70.0	6.0	3.1	48.3
9	2.45	0.3361	78.0	6.0	3.3	45.0

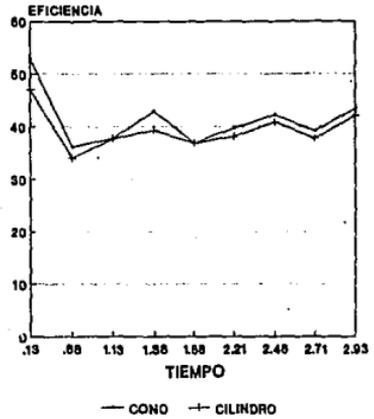
ANEXO 2. Resultados de eficiencias y pérdidas de carga

CORRIDA 1



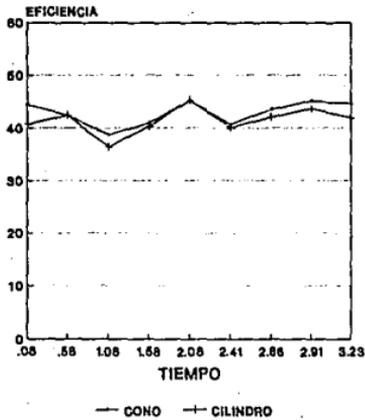
V=62 m/d

CORRIDA 2



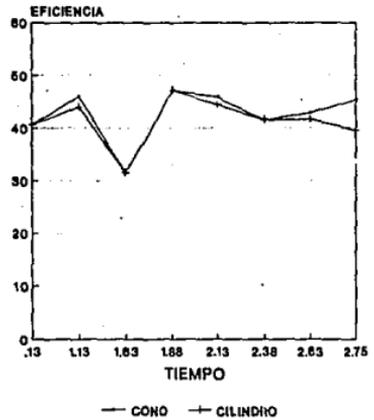
V=62 m/d

CORRIDA 3



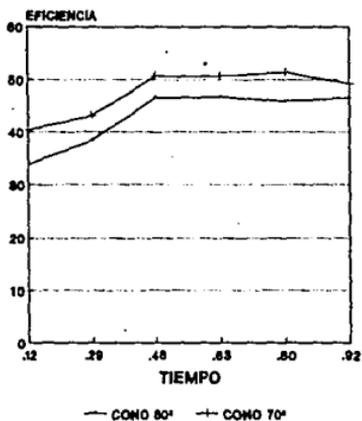
V=62 m/d

CORRIDA 6



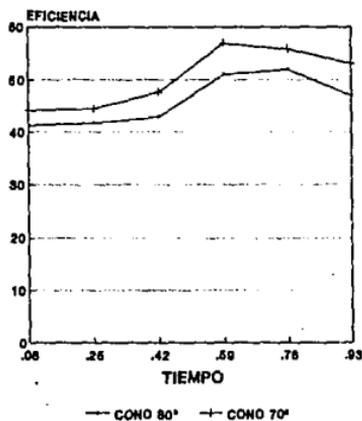
V=151.8 m/d

CORRIDA 8



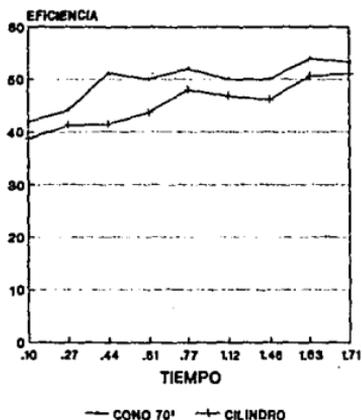
V=132m/d

CORRIDA 9



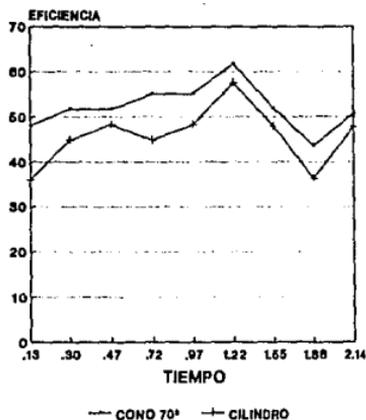
V=132m/d

CORRIDA 10



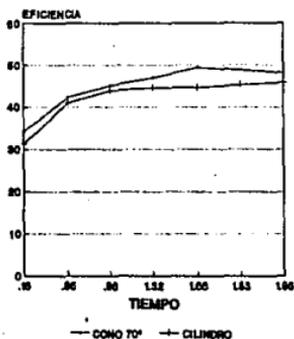
V=132m/d

CORRIDA 11



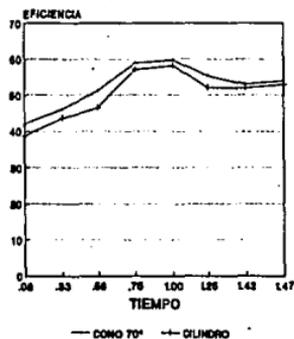
V=132m/d

CORRIDA 12



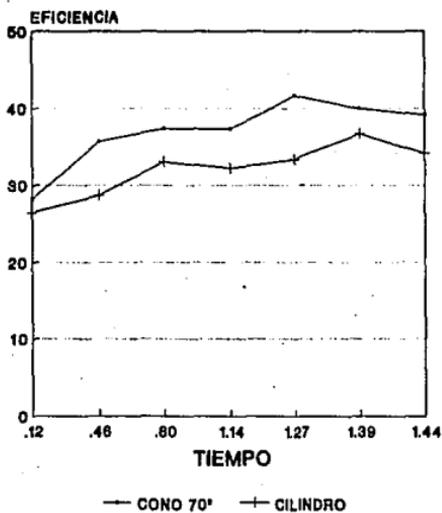
V=120m/d

CORRIDA 13



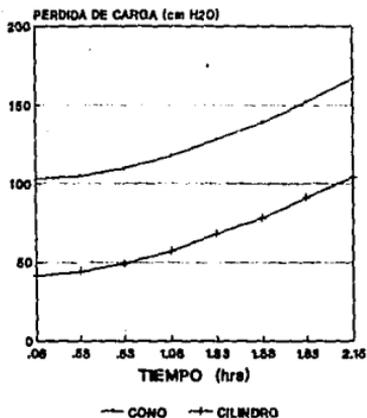
V=120m/d

CORRIDA 14



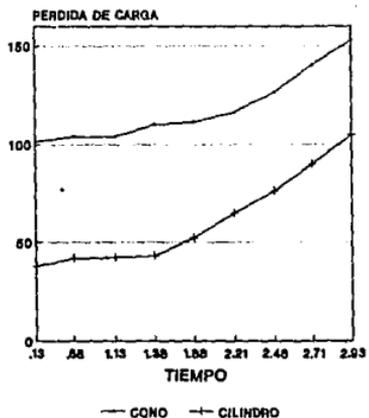
V=120m/d

CORRIDA 1



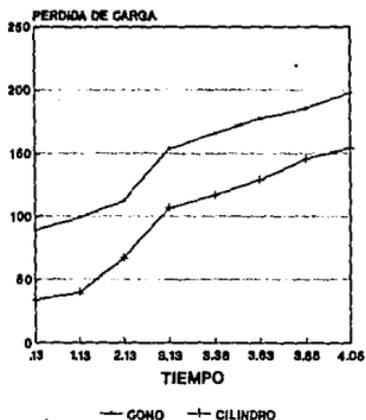
V=162 m/d

CORRIDA 2



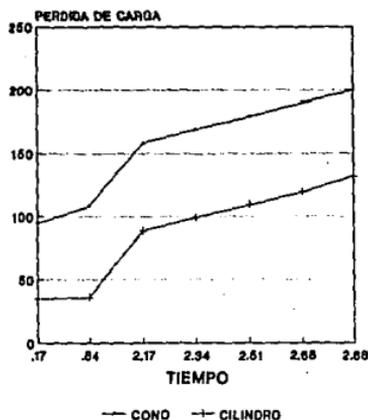
V=162 m/d

CORRIDA 4



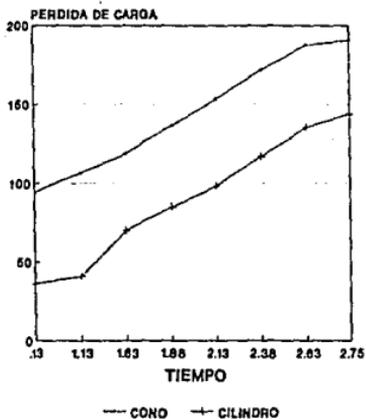
V=1318 m/d

CORRIDA 5



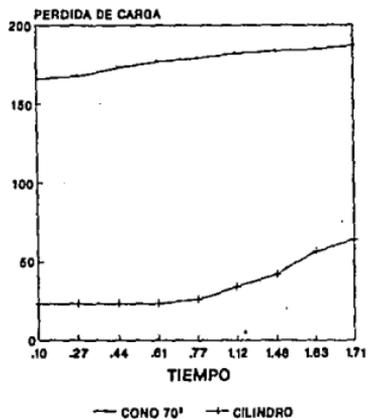
V=1318 m/d

CORRIDA 6



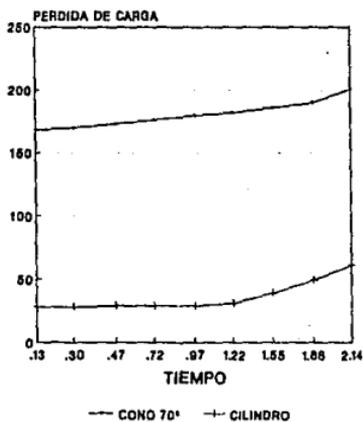
V=131.8 m/d

CORRIDA 10



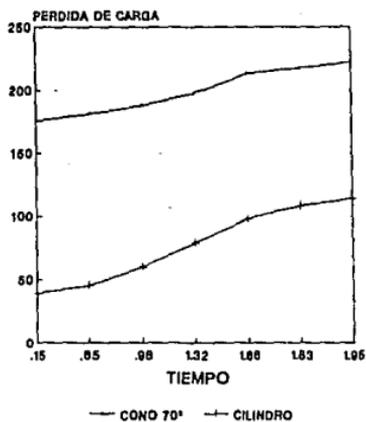
V=132 m/d

CORRIDA 11



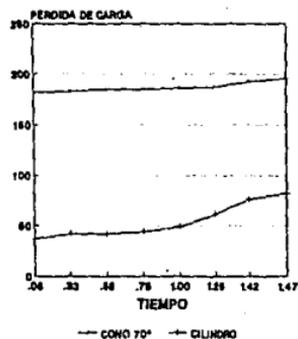
V=132 m/d

CORRIDA 12



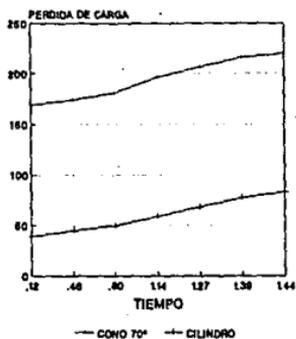
V=120 m/d

CORRIDA 13



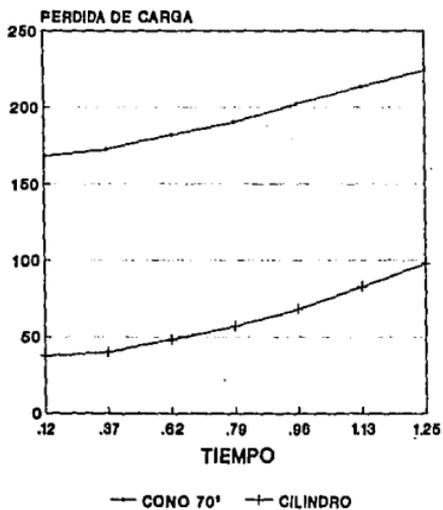
V=120m/d

CORRIDA 14



V=120m/d

CORRIDA 15



V=120m/d

ANEXO 3. Resultados del ANOVA

CORRIDA 2.

η_{UTM}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	52.9	36.2	37.7	42.9	36.8	39.7	42.3	39.1	43.4
Cilindro	47.1	34.0	37.7	39.3	36.8	38.1	40.8	37.7	42.1

SST = 336.9, $SS_{(TR)} = 16.7$ y $SS_{(E)} = 320.2$, $S^{2(TR)} = 16.7$ y $S^{2(E)} = 20.0$

ENTONCES $F_C = 0.83$ y $F_{0.05, 1, 18} = 4.44$

CORRIDA 3.

η_{UTM}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	44.4	42.4	38.6	40.0	45.2	40.0	43.5	45.1	44.6
Cilindro	40.7	42.4	36.4	40.0	45.2	40.0	42.0	43.7	41.9

SST = 108.1, $SS_{(TR)} = 7.4$ y $SS_{(E)} = 100.6$, $S^{2(TR)} = 7.4$ y $S^{2(E)} = 6.3$

ENTONCES $F_C = 1.17$ y $F_{0.05, 1, 18} = 4.44$

CORRIDA 4.

η_{UTN}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	48.6	52.0	50.9	55.4	53.4	48.7	50.0	52.2	53.7
Cilindro	48.6	52.0	50.9	53.8	52.0	47.4	47.7	51.1	52.6

$$SST = 89.6, SS_{(TR)} = 4.2 \text{ y } SS_{(E)} = 85.37, S^{2(TR)} = 4.2 \text{ y } S^{2(E)} = 5.33$$

$$\text{ENTONCES } F_C = 0.79 \text{ y } F_{0.05, 1, 16} = 4.44$$

CORRIDA 5.

η_{UTN}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	33.3	34.6	39.5	37.2	42.7	43.3	45.1		
Cilindro	33.3	34.6	37.2	37.2	40.4	42.2	41.8		

$$SST = 201.7, SS_{(TR)} = 5.74 \text{ y } SS_{(E)} = 195.93, S^{2(TR)} = 5.74 \text{ y } S^{2(E)} = 16.33$$

$$\text{ENTONCES } F_C = 0.35 \text{ y } F_{0.05, 1, 12} = 4.75$$

CORRIDA 6.

η_{ijk}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	40.6	46.0	31.5	47.1	45.8	41.6	42.9	45.4	
Cilindro	40.6	44.0	31.5	47.1	44.4	41.6	41.7	39.5	

$SST = 337.11$, $SS_{(TR)} = 6.76$ y $SS_{(E)} = 330.35$, $S^{2(TR)} = 6.76$ y $S^{2(E)} = 23.60$

ENTONCES $F_C = 0.29$ y $F_{0.05, 1, 14} = 4.60$

CORRIDA 7.

η_{ijk}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono 80	51.1	51.1	46.9	47.2	50.0	52.4			
Cono 70	53.3	53.2	51.0	54.7	53.6	55.6			

$SST = 80.06$, $SS_{(TR)} = 43.02$ y $SS_{(E)} = 37.04$, $S^{2(TR)} = 43.02$ y $S^{2(E)} = 3.70$

ENTONCES $F_C = 11.61$ y $F_{0.05, 1, 10} = 4.96$

CORRIDA 8.

η_{LTM}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono 80	33.9	38.5	46.6	46.7	45.9	46.6			
Cono 70	40.0	43.1	50.7	50.7	51.4	49.3			

$SST = 326.86$, $SS_{(LTM)} = 60.89$ y $SS_{(E)} = 265.98$, $S^{2(LTM)} = 60.89$ y $S^{2(E)} = 26.60$
 ENTONCES $F_c = 2.3$ y $F_{0.05, 1, 10} = 4.96$

CORRIDA 9.

η_{LTM}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono 80	41.2	41.7	42.9	51.0	51.95	46.9			
Cono 70	44.1	44.4	47.6	56.9	5.8	53.1			

$SST = 330.55$, $SS_{(LTM)} = 57.73$ y $SS_{(E)} = 272.82$, $S^{2(LTM)} = 57.73$ y $S^{2(E)} = 27.28$
 ENTONCES $F_c = 2.12$ y $F_{0.05, 1, 10} = 4.96$

CORRIDA 10.

η_{ijk}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	41.9	44.1	51.2	50.0	52.04	50.0	50.0	53.9	53.4
Cilindro	38.7	41.2	41.5	43.7	8.0	46.9	46.1	50.6	51.1

SST = 364.25, $SS_{(TR)} = 83.59$ y $SS_{(E)} = 280.66$, $S^{2(TR)} = 83.59$ y $S^{2(E)} = 17.54$

ENTONCES $F_c = 4.76$ y $F_{0.05, 1, 16} = 4.44$

CORRIDA 11.

η_{ijk}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	48.0	51.7	51.7	55.2	55.24	61.7	52.0	43.6	50.8
Cilindro	36.0	44.8	48.3	44.8	8.3	57.4	48.0	36.4	47.8

SST = 732.53, $SS_{(TR)} = 187.40$ y $SS_{(E)} = 545.13$, $S^{2(TR)} = 187.40$ y $S^{2(E)} = 34.07$

ENTONCES $F_c = 5.5$ y $F_{0.05, 1, 16} = 4.44$

CORRIDA 12.

η_{ijk}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	34.3	42.3	45.1	47.0	49.44	48.8	48.2		
Cilindro	31.4	41.0	43.9	44.6	4.7	45.2	45.9		

$$SST = 349.29, SS_{(TR)} = 24.18 \text{ y } SS_{(E)} = 325.10, S^{2(TR)} = 24.18 \text{ y } S^{2(E)} = 27.09$$

$$\text{ENTONCES } F_c = 0.89 \text{ y } F_{0.05, 1, 12} = 4.75$$

CORRIDA 13.

η_{ijk}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	41.9	46.2	51.2	58.9	59.7	55.3	53.1	54.0	
Cilindro	38.7	43.6	46.5	57.1	58.2	52.1	52.0	53.0	

$$SST = 596.31, SS_{(TR)} = 22.40 \text{ y } SS_{(E)} = 573.92, S^{2(TR)} = 22.40 \text{ y } S^{2(E)} = 40.99$$

$$\text{ENTONCES } F_c = 0.55 \text{ y } F_{0.05, 1, 14} = 4.60$$

CORRIDA 14.

η_{UTN}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	28.2	35.7	37.4	37.3	41.7	40.0	39.2		
Cilindro	28.4	28.7	33.0	32.2	33.3	36.7	34.2		

SST = 274.46, $SS_{(TR)} = 86.95$ y $SS_{(E)} = 187.51$, $S^{2(TR)} = 86.95$ y $S^{2(E)} = 15.61$

ENTONCES $F_C = 5.5$ y $F_{0.05, 1, 12} = 4.75$

CORRIDA 15.

η_{UTN}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Geometría									
Cono	37.2	51.9	57.4	50.9	56.1	55.2	55.9	55.0	55.0
Cilindro	30.2	46.1	51.8	43.6	50.9	48.3	49.1	48.3	45.0

SST = 846.66, $SS_{(TR)} = 207.95$ y $SS_{(E)} = 638.71$, $S^{2(TR)} = 207.95$ y $S^{2(E)} = 39.92$

ENTONCES $F_C = 5.21$ y $F_{0.05, 1, 18} = 4.44$

ANEXO 4. Resultados de sólidos retenidos

SÓLIDOS RETENIDOS

Corrida 2

Corrida 4

Profundidad (cm)	gSOL/Kg ARENA		gSol/Kg ARENA	
	Cono	Cilindro	Cono	Cilindro
0	1.07	1.02	2.40	1.03
5	0.88	0.86	1.10	0.69
10	0.62	0.43	1.58	0.00
15	0.48	0.00	0.93	0.00
20	0.59	0.00	0.89	0.00
25	0.14	0.00	0.57	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00
40				
69	0.00	0.00	0.00	0.00

