

24/15



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**ESTUDIO DE LA OPERACION DE UN
SEDIMENTADOR DE ALTA TASA PILOTO**



**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
GERMAN BUITRON MENDEZ

México, D. F.

1987



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.

C O N T E N I D O

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABLAS	VII
NOMENCLATURA	VIII
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCION	3
3. EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS	6
3.1 <i>Objetivos del tratamiento de las aguas residuales</i>	6
3.2 <i>Evaluación de la contaminación</i>	7
3.3 <i>Principios generales de la depuración de las aguas residuales domésticas</i>	8
4. SEDIMENTACION	12
4.1 <i>Teoría de la sedimentación</i>	12
4.1.1 <i>Definiciones generales</i>	12
4.1.2 <i>Sedimentación tipo I</i>	13
4.1.3 <i>Sedimentación tipo II</i>	17
4.1.4 <i>Sedimentación tipo III</i>	19

	Pág.
4.1.5 Sedimentación tipo IV	19
4.2 Sedimentación de alta tasa	20
4.2.1 Fundamentos	22
4.2.2 Modelo de Yao	24
4.2.3 Parámetros de diseño	31
4.2.4 Optimización en el diseño de los sedimentadores de alta tasa	40
4.3 Características hidráulicas en los sedimentadores	49
4.3.1 Importancia de la descripción del comportamiento hidráulico	49
4.3.2 Tipos de flujo en los sedimentadores	49
4.3.3 Técnicas de trazado	50
4.4 Tipos de sedimentadores	53
4.4.1 Sedimentadores estáticos	53
4.4.2 Sedimentadores por contacto de lodos	59
4.4.3 Dispositivos de extracción de lodos	62
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL	64
5.1 Descripción del sedimentador piloto	64
5.2 Descripción de los estudios y métodos de análisis	68
5.2.1 Estudios preliminares de sedimentación	68
5.2.2 Pruebas de campo	70

	Pág.
6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	83
6.1 Estudios preliminares	83
6.2 Pruebas de campo	89
6.2.1 Influencia del módulo de alta tasa	90
6.2.2 Influencia de coagulantes en la operación del sedimentador	101
6.3 Evaluación del parámetro S para el sedimentador	103
6.4 Análisis general de resultados	105
7. INFLUENCIA DEL ANGULO DE INCLINACION EN LA EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS	110
7.1 Desarrollo experimental	110
7.2 Resultados y análisis de resultados	112
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
9. BIBLIOGRAFIA	122
ANEXO 1 - DESARROLLO DE LA ECUACION DEL MODELO DE YAO PARA FLUJO LAMINAR EN UN TUBO CIRCULAR.	131
ANEXO 2 - RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO	134
ANEXO 3 - OPERACION DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA	141
ANEXO 4 - RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS DE INFLUENCIA DEL ANGULO DE INCLINACION EN LA REMOCION DE TURBIDEZ	152
ANEXO 5 - DISEÑO DE SEDIMENTADORES SECUNDARIOS	154

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1. Coeficientes de resistencia C_D	16
2. Columna de sedimentación	18
3. Diagrama de sedimentación para sedimentación tipo II	18
4. Curva típica de sedimentación	20
5. Módulos de alta tasa	21
a) módulo de tubos cuadrados	
b) módulo de placas inclinadas	
6. Trayectoria idealizada para partículas discretas (modelo de Camp)	22
7. Sistema de coordenadas	25
8. Sistema de coordenadas para un sedimentador de alta tasa tubular	27
9. Trayectorias en diferentes tipos de sedimentadores	31
10. Influencia de la longitud l en el funcionamiento del sedimentador: $\theta = 20$ y 40°	33
11. Influencia de la longitud l en el funcionamiento del sedimentador: $\theta = 0^\circ$	33
12. Efecto del ángulo de inclinación en la eficiencia de remoción	35

13.	Esquema para estudiar la eficiencia de remoción en placas paralelas	Pág. 36
14.	Eficiencias de remoción en función del valor de S para $\theta = 0$	39
15.	Sedimentador de placas paralelas dentro de un tanque cilíndrico	42
16.	Valores óptimos de β , γ y ϵ en función de α para sedimentadores cilíndricos verticales con flujo ascendente	45
17.	Valores óptimos de α , β y ϵ en función de γ para tanques cilíndrico verticales con flujo ascendente	45
18.	Valores óptimos de β , γ y ϵ en función de α para tanques cilíndrico horizontales con flujo descendente	46
19.	Velocidad crítica de sedimentación (adimensional) ϵ en función de la separación de placas δ para un ángulo y longitud fijas en un tanque cilíndrico vertical	46
20.	Sedimentador de placas paralelas dentro de un tanque rectangular	47
21.	Valores óptimos de ϵ y γ en función de α para flujo ascendente y descendente en tanques verticales rectangulares	48
22.	Curvas de dispersión para diferentes tipos de flujo	52

	Pág.
23. Sedimentador cilíndrico-cónico	54
24. Decantador estático laminar	54
25. Sedimentador circular con rastras	57
26. Sedimentador longitudinal con sistema de cadenas	58
27. Clarificador con succión de lodos	59
28. Sedimentador laminar con recirculación de lodos	60
29. Sedimentador de recirculación de lodos	61
30. Sedimentador laminar por lecho de lodos	63
31. Sedimentador piloto de alta tasa	66
32. Canaletas de recolección	67
33. Equipo instalado durante los estudios preliminares	69
34. Instalación del sedimentador piloto en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de C.U.	71
35. Adaptación efectuada a la entrada cuadrada para los estudios de sedimentación	73
36. Puntos de muestreo durante las pruebas de campo dentro del sedimentador	73
37. Posición "alta y baja" de las canaletas de recolección	75

38.	Nivel de lodos mantenido durante los experimentos dentro del sedimentador	75
39.	Trayectoria de los flóculos en el sedimentador de alta tasa	84
40.	Trayectoria de las partículas dentro del módulo de alta tasa	85
41.	Localización de zonas muertas. Vista de planta del sedimentador	86
42.	Vista de perfil de la trayectoria de las corrientes de flujo dentro del sedimentador	86
43.	Zonas con mayor cantidad de sedimentos al usar la entrada cuadrada	87
44.	Zonas con mayor cantidad de sedimentos al usar la entrada con reducción atolvada	88
45.	Eficiencias de remoción de sólidos en el sedimentador. Módulo de tubos cuadrados	92
46.	Eficiencias de remoción de sólidos en el sedimentador. Módulo de placas paralelas	93
47.	Eficiencias de remoción de sólidos en el sedimentador. Sin módulo de alta tasa	93
48.	Influencia del tipo de módulo en la operación del sedimentador	95
49.	Influencia de la carga másica en la operación del sedimentador. Módulo de tubos cuadrados	97

	Pág.
50. Influencia de la carga másica en la operación del sedimentador. Módulo de placas paralelas	97
51. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de tubos cuadrados, cañaletas en posición baja	98
52. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de tubos cuadrados, cañaletas en posición alta	98
53. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de placas paralelas, cañaletas en posición baja	99
54. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de placas paralelas, cañaletas en posición alta	99
55. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Sin módulo de alta tasa	100
56. Influencia de coagulantes en la operación del sedimentador. Módulo de tubos cuadrados	101
57. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Adición de sulfato de aluminio como coagulante	102
58. Valores de S en función de la velocidad de flujo	104
59. Funcionamiento del sedimentador bajo diferentes condiciones de operación	107

60. Equipo utilizado para determinar la influencia del ángulo de inclinación 111
61. Influencia del ángulo de inclinación en la remoción de turbidez. Lodos activados 113
62. Influencia del ángulo de inclinación en la remoción de turbidez. Lodos provenientes de bio-disco 114
63. Influencia del ángulo de inclinación en la remoción de turbidez. Lodos provenientes de filtro percolador. 115

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1. Condiciones de operación para los estudios preliminares	70
2. Condiciones de operación utilizados para el módulo de tubos cuadrados, posición alta	76
3. Condiciones de operación utilizadas para el módulo de tubos cuadrados, posición baja	77
4. Condiciones de operación utilizadas para el módulo de placas paralelas, posición alta	78
5. Condiciones de operación utilizadas para el módulo de placas paralelas, posición baja	78
6. Condiciones de operación para los estudios sin módulos. Canaletas en posición baja	79
7. Resultados de las pruebas de jarras	81
8. Condiciones de operación para el módulo de tubos cuadrados en posición alta con coagulante	82
9. Porcentajes de zonas muertas	85
10. Equivalencias entre gasto y carga hidráulica para el sedimentador utilizado	91
11. Condiciones de operación utilizadas en el estudio de la influencia del ángulo de inclinación	112

NOMENCLATURA

- A_p : Area transversal o proyectada de la partícula en ángulo recto a v , (L^2)
- C_{Al} : Concentración de sulfato de aluminio alimentado ($M \cdot L^{-3}$)
- C_D : Coeficiente de resistencia
- C_i : Concentración de sólidos suspendidos en el influente ($M \cdot L^{-3}$)
- C_m : Concentración de sólidos suspendidos en el punto de muestreo ($M \cdot L^{-3}$)
- d : Diámetro de tubos o distancia entre placas (L)
- d_p : Diámetro de partículas (L)
- F_b : Fuerza de resistencia del fluido ($M \cdot L \cdot T^{-2}$)
- g : Aceleración de la gravedad ($L \cdot T^{-2}$)
- H : Altura de la columna de sedimentación (L)
- h_o : Altura total de un sedimentador de alta tasa (L)
- K : Constante de la ecuación de Yao
- ℓ : Longitud del sedimentador (L)
- ℓ_A : Altura del módulo de placas paralelas (L)
- L : Longitud relativa del sedimentador ($L = \ell/d$)
- L' : Longitud relativa para la región de transición
- m : Masa de la partícula (M)
- M : Concentración de sulfato de aluminio en el tanque ($M \cdot L^{-3}$)
- Q_i : Gasto de influente ($L^3 \cdot T^{-1}$)
- Q_c : Gasto de coagulante alimentado ($L^3 \cdot T^{-1}$)

- Q_p : Gasto de purga ($L^3 \cdot T^{-1}$)
 S : Parámetro que caracteriza el funcionamiento de un sedimentador de alta tasa
 S_c : Valor crítico de S
 t : Tiempo (T)
 u : Velocidad local del fluido en dirección X ($L \cdot T^{-1}$)
 v_o : Velocidad promedio del fluido a través del sedimentador de alta tasa ($L \cdot T^{-1}$)
 v_a : Velocidad ascendente en fondo del tanque ($L \cdot T^{-1}$)
 v_b : Velocidad ascendente en el área ocupada por el módulo ($L \cdot T^{-1}$)
 v_c : Velocidad ascendente en la entrada de las placas ($L \cdot T^{-1}$)
 v_p : Velocidad de la partícula ($L \cdot T^{-1}$)
 v_Δ : Velocidad de sedimentación ($L \cdot T^{-1}$)
 V : Volumen de partícula (L^3)
 Y : Profundidad relativa del sedimentador ($Y=y/d$)
 α : Angulo de inclinación con respecto a la vertical
 ϵ : Cantidad proporcional a la cantidad de partículas suspendidas ($=v_{\Delta c}/v_a$)
 η : Porcentaje de remoción de sólidos
 θ : Angulo de inclinación con respecto a la horizontal
 μ : Viscosidad dinámica del fluido ($M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$)
 ν : Viscosidad cinemática del fluido ($L^2 \cdot T^{-1}$)
 ρ : Densidad del fluido ($M \cdot L^{-3}$)
 ρ_Δ : Densidad de la partícula ($M \cdot L^{-3}$)

1. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar las condiciones de operación de un sedimentador de alta tasa piloto.

La parte experimental se dividió en dos etapas: a) estudios preliminares y b) estudios de campo. En la primera fase se estudió el comportamiento de los flóculos al pasar por el módulo de alta tasa. Las pruebas de campo se efectuaron en una planta de tratamiento de aguas residuales usando como material sedimentable lodos activados. El sedimentador se operó bajo las siguientes condiciones; con módulo de tubos cuadrados, con módulos de placas paralelas (ambos en dos posiciones dentro del tanque), con módulo de tubos cuadrados más sulfato de aluminio -como coagulante- y, sin módulo de alta tasa. La carga hidráulica empleada varió desde 27.3 hasta 108.0 m³/m²d. La concentración promedio del licor mezclado fue de 666 mg/l.

Además, se llevaron a cabo pruebas para determinar el ángulo -
óptimo de sedimentación para los efluentes de lodos activados,
sistema por biodisco y filtro percolador.

Con los resultados de los estudios preliminares se determinó -
la trayectoria de los flóculos a través del sedimentador y del
módulo de alta tasa. Las pruebas de campo mostraron que el -
funcionamiento del sedimentador se ve afectado favorablemente
por el módulo de alta tasa (el tiempo de retención disminuye de
3.5 a 6 veces); sin embargo, no se encontraron diferencias -
significativas por la posición o tipo de módulo.

Las mejores condiciones se encontraron al trabajar el sedimen-
tador con el módulo de tubos cuadrados y adición de coagulan-
te.

Por último, se determinó que el ángulo óptimo para los efluen-
tes estudiados se encuentra entre 35 y 45°.

2. INTRODUCCION

Durante los últimos años el crecimiento de la población ha sido tal que la necesidad de abastecimiento de agua para usos domésticos, industriales y agrícolas se ha incrementado considerablemente. El agua después de cumplir su propósito es desechada y si esta agua residual se vierte directamente al medio ambiente es muy probable que ocurran daños ecológicos. Por lo anterior surge la necesidad de llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales, el cual tiene como finalidad evitar la contaminación de los medios acuático y terrestre, así como proporcionar una agua tratada susceptible de volver a ser utilizada.

En el proceso de la depuración de las aguas residuales se lleva a cabo una operación unitaria de gran importancia: la sedimentación. Esta operación ha sido utilizada por generaciones

para clarificar líquidos y concentrar sólidos. Es por esto que se han llevado a cabo una gran cantidad de investigaciones acerca del tema. En los últimos años la sedimentación de alta tasa ha cobrado gran relevancia debido a sus características.

El presente estudio se realizó en un sedimentador de alta tasa piloto y su principal objetivo fué determinar las condiciones óptimas de operación al utilizarse en el proceso de tratamiento de las aguas residuales domésticas. Otros objetivos fueron: presentar los resultados de una investigación bibliográfica sobre el tema y evaluar la teoría de la sedimentación de alta tasa con los resultados experimentales.

El proyecto se realizó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM bajo el patrocinio de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

En los capítulos 3 y 4 se presentan la revisión bibliográfica efectuada sobre la sedimentación -particularmente sobre la sedimentación de alta tasa-, se hace especial hincapié sobre las teorías que prevalecen, un estudio teórico hecho por Yao en 1970 y, la optimización de los sedimentadores de alta tasa (Verhoff, 1979).

En el capítulo 5 se presenta la descripción de los métodos empleados, así como los análisis efectuados y condiciones de

operación.

En el capítulo 6 se encuentran los resultados y el análisis de los mismos por medio de los cuales se llegó a determinar las condiciones que favorecen el funcionamiento del sedimentador de alta tasa, así como la influencia del módulo y de la adición de coagulantes.

Por último, en el capítulo 7 se encuentra el estudio realizado para determinar el ángulo de inclinación óptimo para tres sistemas de tratamiento biológico: lodos activados, biodisco y filtro percolador.

3. EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

3.1 *Objetivos del tratamiento de las aguas residuales*

Las aguas residuales que se captan de las conducciones de desagüe (provenientes de lluvia, residuos domésticos e industriales) deben desembocar en una corriente de agua o cauce de evacuación. Si se quiere evitar el deterioro ecológico, o dar alguna utilidad a estas aguas residuales -por ejemplo para riego- deben someterse previamente a una depuración; sin embargo, la depuración no es forzosamente indispensable: todo depende de la importancia relativa del medio receptor de los desechos, así como del efluente evacuado.

3.2 Evaluación de la contaminación

Se denomina polución del agua a todo factor físico, químico o biológico vertido a un cauce o reserva de agua natural, superficial o profunda, con riesgo de perturbar el equilibrio biológico y susceptible de causar daño (Ministere de l'environnement et du cadre de vie, 1979).

La mayoría de las impurezas del agua residual se transforman; pero sólo una pequeña parte de éstas transformaciones son de naturaleza química, estando las demás relacionadas con procesos biológicos. En estos últimos, la relación entre las sustancias contenidas en el agua residual y el oxígeno es fundamental. Una parte considerable de las impurezas en las aguas residuales urbanas es de naturaleza orgánica y sólo una pequeña cantidad es de naturaleza inorgánica.

Los factores que pueden modificar la composición y el estado de las aguas se clasifican de acuerdo con sus características en:

I. FISICOS: a) Partículas en suspensión, b) temperatura, c) conductividad, d) color, e) radioactividad, etc.;

II. QUIMICOS: Aportes de materias solubles minerales u orgá-

nicos;

III. BIOLÓGICOS: a) Modificación de la flora y la fauna,
b) aporte de gérmenes patógenos;

IV. ORGANOLEPTICOS: Sabor, color, olor.

De acuerdo con su estado las sustancias presentes en las aguas residuales se clasifican en:

I. Partículas en suspensión: a) Sedimentables, flotables (> 50 micras), b) No sedimentables o coloidales (0.1 a 10 micras);

II. Partículas disueltas: Soluciones verdaderas (< 0.1 micras).

3.3 Principios generales de la depuración de las aguas residuales domésticas

La depuración de las aguas residuales se lleva a cabo por medio de: a) La separación y eliminación de las partículas en suspensión y, b) La eliminación de las partículas en solución (donde una parte de éstas se convierte en partículas en suspensión para removerse posteriormente). Los pasos anteriores se efectúan a través de los siguientes procesos y opera-

ciones:

- Pretratamiento;
- Tratamiento primario;
- Tratamiento secundario;
- Tratamiento y disposición de lodos;
- Y en ocasiones, tratamientos terciarios.

Pretratamiento

Tiene como objetivo separar los sólidos más grandes (arena, grava, etc.), elementos susceptibles de dañar las etapas posteriores del tratamiento; en especial el equipo de bombeo. Esta etapa comprende las rejillas, tamices, desmenuzadores, desarenadores y separadores de grasas.

Tratamiento primario

Es una separación física sólido-líquido cuyo objetivo es retener la mayoría de las partículas en suspensión presentes en el agua. Generalmente se efectúa por sedimentación, pero también se puede realizar por flotación.

En especial durante la sedimentación se consigue que se depositen las partículas que se encuentran en suspensión en el agua, tanto si se trata de partículas presentes en el agua

bruta, como si se deben a la acción de un reactivo químico añadido en el tratamiento (coagulación, eliminación de hierro, depuración química, etc.) e incluso de las que resultan de una floculación física ligada a una acción biológica (tratamiento de aguas residuales). Este tema será tratado ampliamente en el capítulo 4.

Tratamiento secundario

Este tratamiento se efectúa mediante procesos físico-químicos o biológicos. En estos últimos, se consume la mayor parte de materia orgánica presente en las aguas residuales, por medio de microorganismos. Estos procesos llevan consigo un crecimiento de la masa bacteriana o biomasa, la cual se comporta como material en suspensión y se separa del agua mediante un sedimentador secundario o clarificador.

Tratamientos terciarios

Este término indica un tratamiento complementario que permite obtener una calidad de efluente superior al obtenido en el tratamiento secundario. Puede tener dos objetivos: a) disminución de los sólidos suspendidos y materia orgánica residual y, b) eliminación de algún parámetro específico que no es afectado por los tratamientos clásicos. Para la disminución de sólidos se utiliza el microtamizado, filtración, adsorción con car

bón activado, etc. Entre los otros tratamientos se encuentran la desnitrificación, la desfosfatación, la decoloración, etc.

Tratamiento y disposición de lodos

Los procesos de depuración -tanto biológicos como fisicoquímicos- generan lodos provenientes de las partículas en suspensión preexistentes, así como los producidos por la depuración misma. Estos lodos contienen una gran cantidad de materia orgánica, son fermentables y susceptibles de causar daño a los ecosistemas. Los medios clásicos de disposición y tratamiento son: a) digestión, b) acondicionamiento, c) deshidratación, c) incineración y; d) compostage.

4. SEDIMENTACION

4.1 Teoría de la sedimentación

4.1.1 Definiciones generales

La sedimentación es una operación unitaria de separación sólido-líquido utilizada para remover sólidos suspendidos por asentamiento gravitacional. En Ingeniería Química se utilizan otros términos para denominar ciertos problemas particulares:

- Clarificación: obtención de un líquido completamente -o casi completamente- libre de partículas sólidas.
- Espesamiento: obtención de un lodo con la mínima cantidad posible de líquido (la clarificación y el espesamiento

to ocurren simultáneamente, en la práctica el término que se emplea es función del producto deseado).

- **Clasificación:** separación de una parte de los sólidos de una suspensión para obtener dos o más categorías de sólidos de densidad diferentes.

Kynch (1952) propuso una teoría basada en la concentración y la tendencia de las partículas a interactuar; así, pueden ocurrir cuatro tipos de sedimentación:

- a) Tipo I o de partículas discretas;
- b) Tipo II o de partículas floculantes;
- c) Tipo III o de partículas que se obstruyen y;
- d) Tipo IV o de partículas en compresión.

Los anteriores tipos de sedimentación pueden ocurrir en la práctica simultáneamente. A continuación se discute el análisis de cada una de ellas.

4.1.2 Sedimentación tipo I

La sedimentación del tipo I es la sedimentación de partículas

discretas y no floculantes en una suspensión diluida. Las partículas sedimentan como unidades independientes y no hay interacción entre ellas. Ejemplos de este tipo son la sedimentación de arena y arcilla en los desarenadores.

La sedimentación tipo I se puede analizar a través de las leyes de Newton y Stokes. Cuando una partícula se libera en un fluido estático, y si su densidad es mayor que la del fluido, ésta se moverá en línea recta hacia el fondo debido a la atracción de la fuerza de gravedad. La partícula se acelerará hasta que la resistencia debida a la fricción tienda al valor de la fuerza impulsora, después, la velocidad de caída de la partícula será constante. A esta velocidad terminal se le conoce como velocidad de sedimentación.

La fuerza gravitacional que actúa sobre la partícula está dada por:

$$F_g = (\rho_s - \rho) g v \quad (1)$$

donde

ρ_s : densidad de la partícula

ρ : densidad del fluido

g : aceleración debida a la gravedad

ψ : volumen de la partícula

Por otro lado, se tiene que la fuerza de resistencia por fricción (ley de Newton) es:

$$F_D = C_D A_p \frac{\rho v_p^2}{2} \quad (2)$$

donde

C_D : coeficiente de resistencia

A_p : área transversal o proyectada de la partícula en ángulo recto a v_p

v_p : velocidad de la partícula

Al igualar las ecuaciones 1 y 2 se obtiene la velocidad terminal de la partícula o sea la velocidad de sedimentación, v_s .

$$v_p = v_s = \sqrt{\frac{2g}{C_D} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \frac{\psi}{A_p}} \quad (3)$$

Para esferas de diámetro d_p y volumen ψ , v_s está dado por:

$$v_s = \sqrt{\frac{4g}{3C_D} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) d_p} \quad (4)$$

El valor numérico del coeficiente de resistencia depende del régimen de flujo en el que se encuentra la partícula. Este se puede obtener a partir de la figura 1.

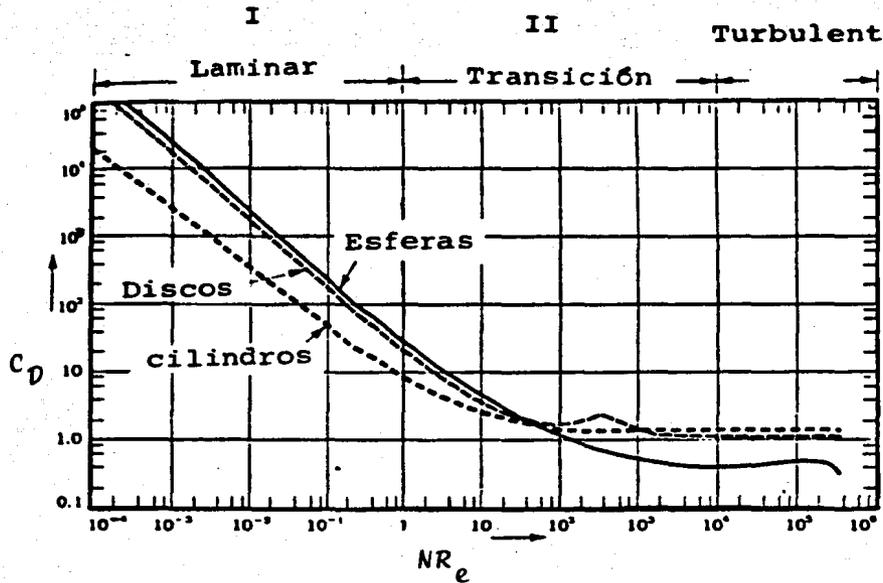


Figura 1. Coeficientes de resistencia C_D , (Reynolds, 1982)

Para condiciones de flujo laminar, Stokes encontró que la fuerza de resistencia está dada por:

$$F_D = 3 \pi \mu d_p v_s \quad (5)$$

donde, μ es la viscosidad dinámica del fluido.

En estas condiciones v_s se obtiene de las ecuaciones 5 y 1:

$$v_s = \frac{g (\rho_s - \rho) \mu}{3 \pi d_p \mu} \quad (6)$$

4.1.3 Sedimentación tipo II

La sedimentación tipo II es la sedimentación de partículas flocculantes en una suspensión diluida. Las partículas flocculan durante la sedimentación incrementando su tamaño y velocidad. Ejemplos de este tipo de sedimentación se presentan en los sedimentadores primarios, así como en la sedimentación de aguas coaguladas químicamente.

Para evaluar las características de sedimentación de una suspensión flocculante, se llevan a cabo pruebas en columnas como la mostrada en la figura 2. La columna debe tener un diámetro superior a 15 cm para minimizar los efectos de pared y, la altura debe ser al menos igual que la del sedimentador propuesto. Durante los ensayos se toman muestras a diferentes alturas e intervalos de tiempo y, posteriormente, se calcula el porcentaje de remoción de sólidos (η). Este porcentaje se traza en un diagrama altura-tiempo como en la figura 3.

La velocidad de sedimentación, v_s , para un porcentaje η_A de remoción de sólidos, se calcula a partir de:

$$v_s = H/t_A \quad (7)$$

donde, H es la altura de la columna y t_A es la intersección de la curva A con el eje X.

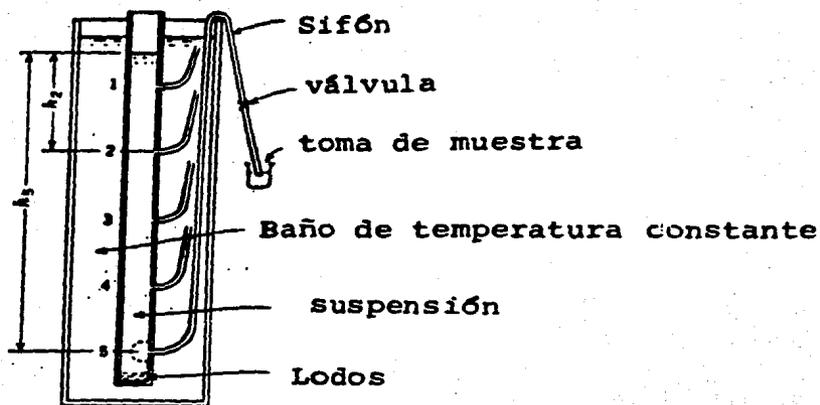


Figura 2. Columna de sedimentación

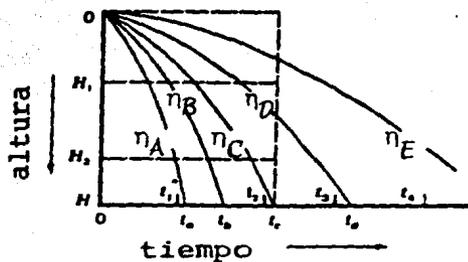


Figura 3. Diagrama de sedimentación para la sedimentación tipo II.

4.1.4 Sedimentación tipo III

La sedimentación tipo III o zona de sedimentación obstruida, es la sedimentación de partículas de una concentración intermedia. En este caso, las partículas están tan próximas que las fuerzas de cohesión obstaculizan la sedimentación, de tal forma que permanecen en una posición fija relativa a las otras y todas sedimentan a una velocidad constante. Físicamente se distingue una interfase sólido-líquido entre la masa de partículas y el líquido clarificado. Un ejemplo de la sedimentación tipo III es la que ocurre a profundidades intermedias en un clarificador secundario para el proceso por lodos activados.

4.1.5 Sedimentación tipo IV

En la sedimentación por compresión o tipo IV la concentración de las partículas es tan alta que estas se tocan entre sí y, la sedimentación ocurre por compresión o compactación de la masa. Un ejemplo de este tipo de sedimentación es la que ocurre en el fondo de los clarificadores usados en el proceso por lodos activados para tratamiento de aguas residuales. Tanto las partículas floculantes como las discretas pueden sedimentar por compresión; sin embargo, es un proceso más común para las primeras.

Los tipos de sedimentación antes mencionados se pueden observar si se coloca en una probeta de vidrio una suspensión (por ejemplo lodos activados). Al cabo de cierto tiempo aparece una interfase, de tal manera que se puede medir la altura de ésta a intervalos de tiempo y después construir un diagrama como el de la figura 4.

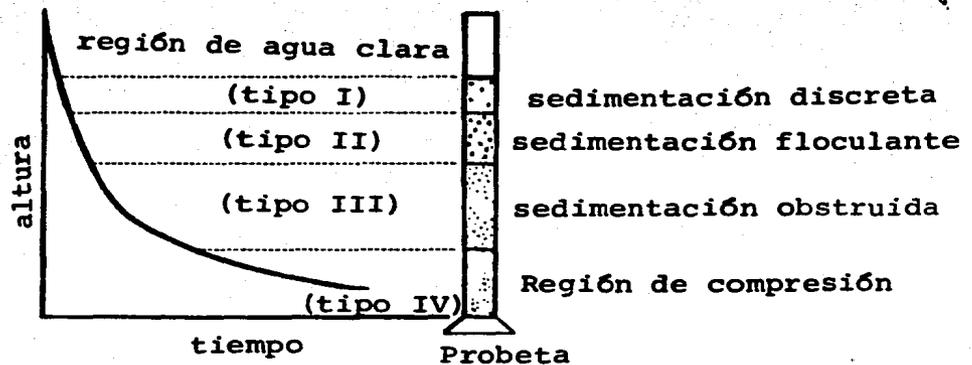


Figura 4. Curva típica de sedimentación

4.2 Sedimentación de alta tasa

El término sedimentación de alta tasa se utiliza para designar los sedimentadores poco profundos en los cuales se disminuye el tiempo de retención debido a una reducción de la distancia

necesaria para que la partícula floculada caiga al fondo, así como a un incremento del área de sedimentación. Las eficiencias de remoción obtenidas son similares o mejores a las de un sedimentador convencional, en el cual, el tiempo de retención es hasta cuatro veces mayor.

Los sedimentadores de alta tasa están constituidos esencialmente por módulos de tubos -circulares, cuadrados, hexagonales- o por láminas planas o corrugadas. Estos se colocan en determinado ángulo de inclinación dentro de un tanque que permite una adecuada entrada y salida del flujo, al mismo tiempo que una buena extracción y recolección de lodos (figura 5).

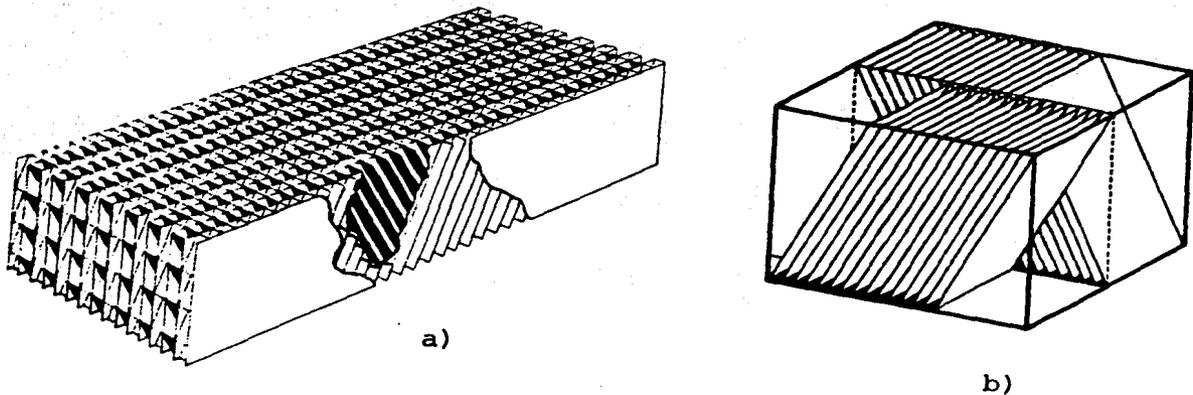


Figura 5. Módulos de alta tasa
a) Módulo de tubos cuadrados
b) Módulo de placas inclinadas

4.2.1 Fundamentos

En 1904 Hazen demostró que la cantidad de sedimentos removidos en un sedimentador es independiente de la profundidad del tanque, además, propuso que se introdujeran placas al tanque para mejorar la capacidad de sedimentación. Camp (1945) exploró estas ideas e introdujo el concepto de sedimentador ideal. En este modelo las partículas son discretas, su trayectoria es en línea recta y, todas tienen la misma velocidad de sedimentación. En la figura 6 se muestra un ejemplo de la trayectoria de las partículas para este modelo.

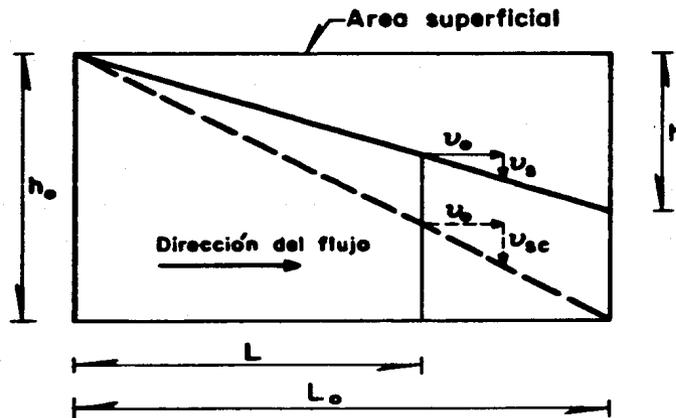


Figura 6. Trayectoria idealizada para partículas discretas (Modelo de Camp).

Todas las partículas que tengan velocidades de sedimentación v_s mayores que v_{sc} , velocidad crítica de sedimentación, caerán a través de la profundidad total h_0 y, serán removidas.

Como se puede observar en la figura 6, las partículas con v_s menor que $v_{s,c}$, se eliminarán si se colocan placas a intervalos h . También se deduce que si el intervalo h se reduce, el tamaño del tanque requerido para remover un porcentaje dado de sedimentos, decrece. De acuerdo con Camp, la carga hidráulica -que para un sedimentador se expresa en gasto volumétrico por unidad de área de tanque- representa la velocidad crítica de sedimentación de las partículas suspendidas. Teóricamente, las partículas con velocidades de sedimentación mayores o iguales a este valor crítico sedimentan completamente en el tanque.

En la práctica, para evitar que se arrastren los sedimentos es conveniente mantener un régimen laminar. De tal forma que la distribución de velocidades en los sedimentadores de alta tasa no corresponde con la supuesta en el modelo de Camp. La presencia de un flujo laminar provoca que las trayectorias de las partículas no sean líneas rectas y, en consecuencia la carga hidráulica no corresponde con la velocidad crítica de sedimentación. Estos hechos llevaron a Yao (1970) a formular una relación para calcular los parámetros de diseño en los sedimentadores de alta tasa.

4.2.2 Modelo de Yao

4.2.2.1 Ecuación general

El desarrollo de la ecuación general para sedimentadores de alta tasa hecho por Yao, está basado en la relación que proporciona la velocidad de sedimentación para flujo laminar y partículas discretas (ecuación 6). Así, se tiene que:

$$\vec{v}_p - \vec{u} = \frac{(\rho_p - \rho) \psi g}{3 \pi \mu d_p} = \vec{v}_\Delta \quad (8)$$

donde

\vec{v}_p : velocidad de la partícula

\vec{u} : velocidad local del fluido

ρ_p y ρ : densidades de la partícula y el fluido

μ : viscosidad dinámica del fluido

ψ : volumen de la partícula

g : aceleración gravitacional

d_p : diámetro de partículas

\vec{v}_Δ : velocidad de sedimentación de la partícula (con dirección vertical hacia abajo).

La figura 7 representa el sistema de coordenadas usado. El eje X es paralelo a la dirección del flujo y el eje Y es normal al flujo y θ es el ángulo de inclinación entre el eje X y la horizontal.

Las componentes de la ecuación 11 en los ejes cartesianos son:

$$v_{px} = u - v_{\Delta} \operatorname{sen} \theta \quad (9)$$

$$v_{py} = -v_{\Delta} \operatorname{cos} \theta \quad (10)$$

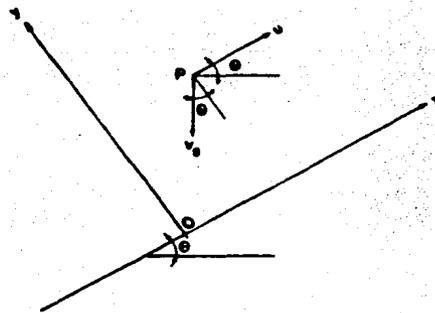


Figura 7. Sistema de coordenadas

Por definición:

$$v_{px} = \frac{dx}{dt} \quad y, \quad (11)$$

$$v_{py} = \frac{dy}{dt} \quad (12)$$

Al combinar 9, 10, 11 y 12 se tiene que:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-v_{\Delta} \cos \theta}{u - v_{\Delta} \operatorname{sen} \theta} \quad (13)$$

La ecuación 13 es la ecuación diferencial de la trayectoria de una partícula afectada por los efectos de la resistencia del fluido y por la sedimentación, su integración conduce a:

$$\int u dy - v_{\Delta} y \operatorname{sen} \theta + v_{\Delta} x \cos \theta = C_0 \quad (14)$$

donde C_0 es la constante de integración.

Al dividir la ecuación 14 entre v_0 , la velocidad promedio del fluido, y d , la profundidad del fluido normal a su dirección, se obtiene:

$$\int \frac{u}{v_0} dy - \frac{v_{\Delta}}{v_0} y \operatorname{sen} \theta + \frac{v_{\Delta}}{v_0} x \cos \theta = C_1 \quad (15)$$

donde $y = y/d$ y $x = x/d$

C_1 y $\int u/v_0 dy$ se evalúan para una trayectoria y un sedimentador de alta tasa particulares.

4.2.2.2. Sedimentadores de tubos circulares

En la figura 8 se representa un sistema de sedimentación de alta tasa con tubos circulares. El eje X coincide con el fondo del tubo y d y l son, respectivamente, el diámetro y la

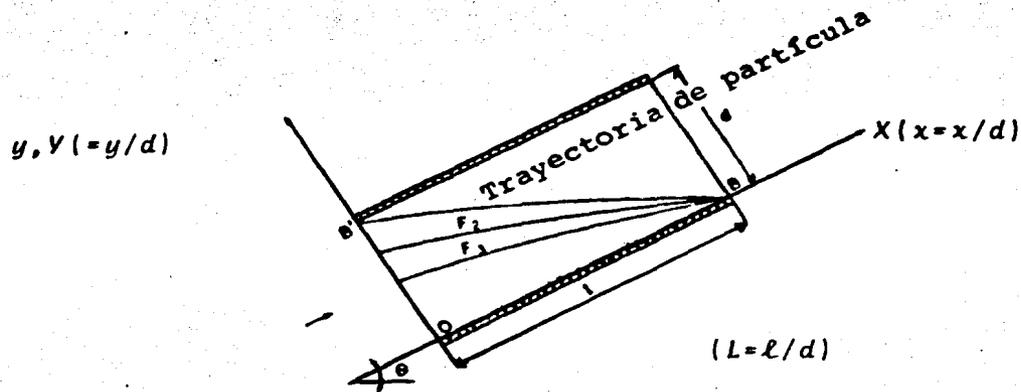


Figura 8. Sistema de coordenadas para un sedimentador de alta tasa tubular

longitud del sedimentador. Para flujo laminar dentro de un tubo circular se tiene que:

$$\frac{u}{v_0} = \delta [y - y^2] \quad (16)$$

El desarrollo de esta ecuación se presenta en el anexo 1.

Al sustituir la ecuación 16 en la 15 e integrar se obtiene:

$$\delta \left[\frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{3} \right] - \frac{v_\delta}{v_0} y \operatorname{sen} \theta + \frac{v_\delta}{v_0} X \cos \theta = C_1 \quad (17)$$

La ecuación 17 representa la trayectoria de partículas suspendidas a través de un tubo circular con flujo laminar. La constante C_1 se evalúa si se conocen las coordenadas de cualquier punto en una trayectoria dada.

Se observa en la figura 8 que el conjunto de trayectorias F_1 , F_2 y F_3 pasa por el punto B, en la orilla final del tubo y que, las coordenadas de este punto son:

$$X = L \quad y \quad Y = 0 \quad (18)$$

donde

L : es la longitud relativa del sedimentador l/d

Al sustituir las condiciones 18 en la ecuación 17 se establece que:

$$C_1 = \frac{v_\delta}{v_0} L \cos \theta \quad (19)$$

Al combinar las ecuaciones 19 y 17:

$$g \left(\frac{y^2}{2} - \frac{y^3}{3} \right) - \frac{v_\delta}{v_0} y \sin \theta + \frac{v_\delta}{v_0} (X - L) \cos \theta = 0 \quad (20)$$

La inspección de la figura 8 indica que existe una trayectoria límite la cual empieza en B' y que define la velocidad crítica de sedimentación $v_{\delta c}$; al usar las coordenadas de B':

$$X = 0 \quad , \quad Y = 1 \quad (21)$$

Y sustituir en la ecuación 20 se obtiene

$$\frac{v_{\Delta c}}{v_0} (\text{sen } \theta + L \text{ cos } \theta) = \frac{4}{3} \quad (22)$$

La ecuación 22 indica que el funcionamiento de un sistema de sedimentación de alta tasa se puede caracterizar por el parámetro S definido como:

$$S = \frac{v_{\Delta c}}{v_0} (\text{sen } \theta + L \text{ cos } \theta) \quad (23)$$

El valor crítico de S , S_c , para tubos circulares es $4/3$. En teoría, cualquier partícula suspendida en tal sistema con un valor de S mayor o igual a $4/3$ será removida completamente.

4.2.2.3 Otros tipos de sedimentadores

Con el propósito de comparar, a continuación se muestran los valores de S_c (obtenidos de una manera similar a la de los tubos circulares) para diferentes geometrías:

a) Flujo entre placas paralelas

$$\frac{u}{v_0} = 6 (y - y^2) \quad (24)$$

$$S_c = 1 \quad (25)$$

b) Tubos cuadrados

$$\frac{u}{v_0} = \frac{-1/8 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n^3 \pi^3} (\cos n\pi - 1) \operatorname{sen} \frac{n\pi}{2} \left(\cosh n\pi y - \frac{\cos hn\pi - 1}{\operatorname{sen} hn\pi} \operatorname{sen} hn\pi y \right)}{-\frac{1}{12} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n^5 \pi^5} (\cos n\pi - 1)^2 \left[\operatorname{sen} hn\pi - \frac{(\cosh n\pi - 1)^2}{\operatorname{sen} hn\pi} \right]} \quad (26)$$

$$S_c = 11/8 \quad (27)$$

c) Charolas abiertas

$$\frac{u}{v_0} = \frac{3}{2} (2y - y^2) \quad (28)$$

$$S_c = 1 \quad (29)$$

d) Flujo uniforme

$$\frac{u}{v_0} = 1 \quad (30)$$

$$S_c = 1 \quad (31)$$

Es importante mencionar que valores iguales de S_c no significan comportamientos idénticos del sistema, ya que la trayectoria de las partículas difiere. Esto se puede observar en la figura 9.

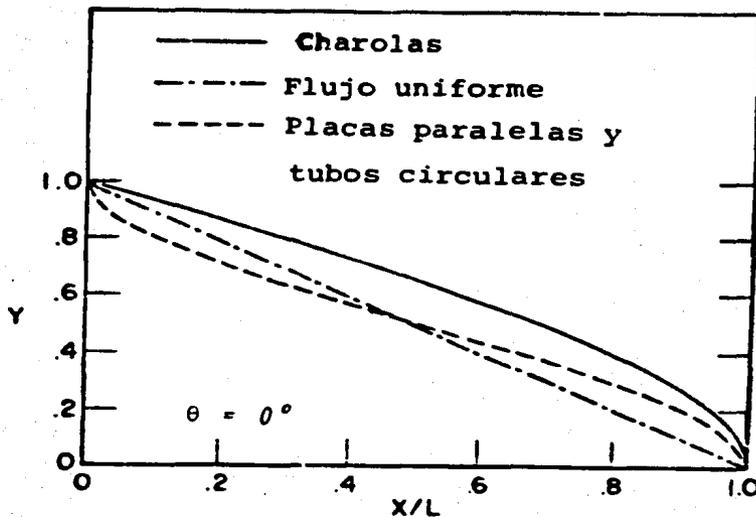


Figura 9. Trayectorias en diferentes tipos de sedimentadores

4.2.3 Parámetros de diseño

Usualmente, el diseño de sedimentadores para potabilización y tratamiento de aguas residuales se basa en el concepto de carga hidráulica. Este mismo concepto se puede adaptar a sistemas de sedimentación de alta tasa, puesto que la velocidad de sedimentación crítica puede ser estimada a partir del valor de S_c . Yao (1970) propone la siguiente ecuación para el cálculo de la carga hidráulica:

$$\text{Carga hidráulica } (= v_{sc}) = K v_0 \quad (32)$$

donde

$$K = \frac{S_c}{\text{sen } \theta + L \text{ cos } \theta} \quad (33)$$

Con la ecuación 32 se puede diseñar un sistema de sedimentación de alta tasa a partir de la selección de una velocidad de sedimentación apropiada (carga hidráulica).

4.2.3.1 Influencia de L en el funcionamiento del sedimentador

La velocidad crítica de sedimentación para un sistema de alta tasa determinado se puede expresar como:

$$\frac{v_{\Delta c}}{v_0} = \frac{S_c}{\text{sen } \theta + L \text{ cos } \theta} \quad (34)$$

Para un valor fijo de v_0 , $v_{\Delta c}$ decrece rápidamente al aumentar la longitud relativa, L , (como se puede observar en las figuras 10 y 11), lo que indica que partículas suspendidas con velocidades de sedimentación muy pequeñas, sólo serán removidas si se incrementa L . También se puede observar en las mismas figuras que $v_{\Delta c}$ decrece considerablemente después de que L llega a 20 y su valor es despreciable para valores de mayores a 40. Por lo anterior es recomendable mantener L debajo de 40 y preferiblemente alrededor de 20.

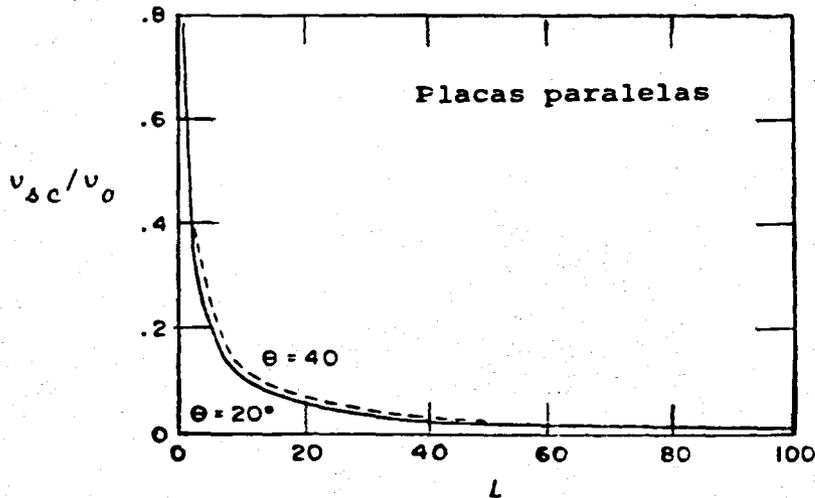


Figura 10. Influencia de la longitud L en el funcionamiento del sedimentador: $\theta = 20$ y 40° (Yao, 1970)

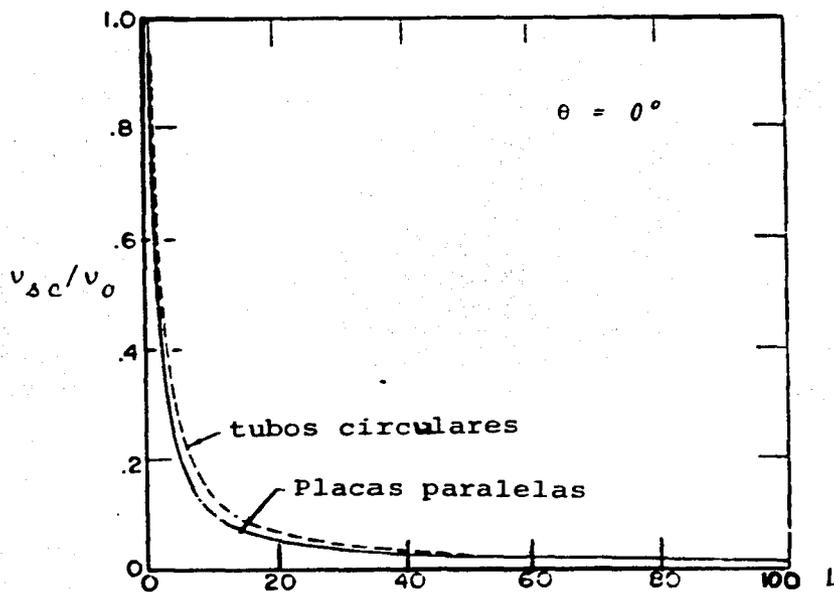


Figura 11. Influencia de la longitud L en el funcionamiento del sedimentador: $\theta = 0$ (Yao, 1970).

4.2.3.2 Influencia de θ en el funcionamiento del sedimentador.

Al diferenciar la ecuación 34 con respecto a θ e igualar a ce ro, se obtiene:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{L} \quad (35)$$

La segunda derivada de la ecuación 34 con respecto a θ es

$$\frac{d^2 v_{\Delta c} / v_o}{d\theta^2} = \frac{2S_c (\cos \theta - L \operatorname{sen} \theta)^2}{(\operatorname{sen} \theta + L \cos \theta)^3} + \frac{S_c}{(\operatorname{sen} \theta + L \cos \theta)} \quad (36)$$

Puesto que el ángulo de inclinación, θ , no puede ser mayor de 90° , el lado derecho de la ecuación 36 es siempre positivo; por lo tanto, la relación expresada en la ecuación 35 da un mínimo para $v_{\Delta c}$.

La figura 12 representa el funcionamiento del sedimentador en función de θ . Se puede notar que la eficiencia disminuye rápidamente después de que θ alcanza los 40° , $v_{\Delta c}^{\theta=0} / v_{\Delta c}^{\theta=0}$ mayores. Asimismo, Culp et al (1968) al trabajar con un sedimentador de tubos circulares, encontraron que con una inclinación de 40 a 60° se presenta la autolimpieza de los tubos, fenómeno que no existe y que ocasiona obstrucciones al trabajar con ángulos de inclinación menores.

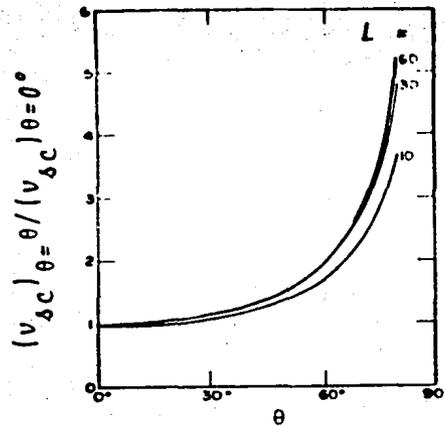


Figura 12. Efecto del ángulo de inclinación en la eficiencia de remoción. (Yao, 1970).

4.2.3.3 Eficiencia de remoción

En un sistema de sedimentación de alta tasa con partículas suspendidas con valores de S menores al valor crítico S_c , solamente se remueve una fracción de sólidos del sistema. A esto se le conoce como eficiencia de remoción.

La figura 13 muestra un sistema de placas paralelas utilizadas como dispositivo de sedimentación. Se asume que todas las partículas suspendidas tienen la misma velocidad de sedimentación y el valor correspondiente de S es menor que el valor para el sistema S_c .

Se considerará la trayectoria de la partícula J , la cual inicia su recorrido en el sistema en E_0 , a la entrada, y termina en E_2 , al final del dispositivo. La porción del flujo total, Q , que entra al dispositivo abajo de E_0 , es q_1 y q_2 es la porción remanente (figura 13). Las partículas suspendidas en q_1 serán removidas completamente en el sedimentador ya que sus trayectorias terminan entre E_1 y E_2 ; pero, las partículas suspendidas en q_2 permanecerán suspendidas en el flujo. La eficiencia de remoción (η) es:

$$\eta = \frac{\int_0^y u \, dy}{v_0 d} = \int_0^y \frac{u}{v_0} \, dy \quad (37)$$

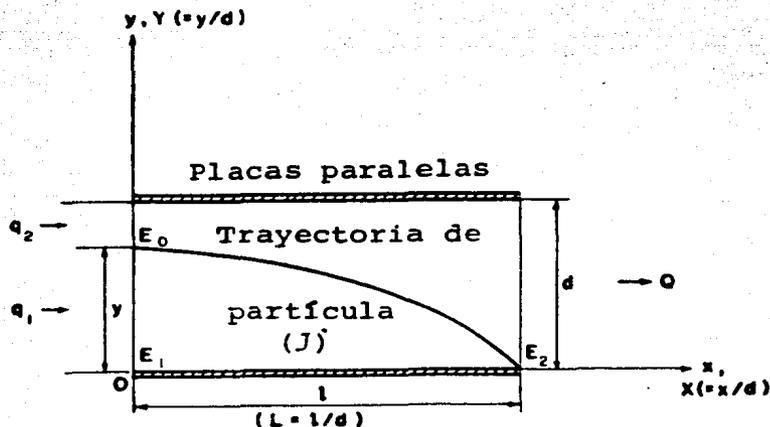


Figura 13. Esquema para estudiar la eficiencia de remoción en placas paralelas.

Al combinar la ecuación 24 con la ecuación 37 e integrar se obtiene:

$$\eta = 3 y^2 - 2 y^3 \quad (38)$$

Al sustituir las siguientes condiciones límites para la trayectoria J (figura 13) en la ecuación 15:

$$X = 0 \quad , \quad Y = y \quad (39)$$

$$X = L \quad , \quad Y = 0 \quad (40)$$

se obtiene:

$$3 y^2 - 2 y^3 = \frac{v_{\Delta}}{v_0} L \quad (41)$$

Por lo tanto, para placas paralelas horizontales:

$$\eta = \frac{v_{\Delta}}{v_0} L = S \quad (42)$$

La ecuación 42 indica que la fracción removida es igual al valor de S de la partícula suspendida.

El valor de la eficiencia de remoción para tubos circulares horizontales se puede encontrar mediante la siguiente relación:

$$\eta = \frac{\int_0^A u \, dA}{v_0 A_1} = \int_0^{\bar{A}} \frac{u}{v_0} \, d\bar{A} \quad (43)$$

donde

A : es el área transversal del tubo sedimentador (es proporcional a V , la altura de la entrada de la partícula límite de la cual se quiere saber su eficiencia de remoción)

A_1 : área transversal total del tubo

\bar{A} : está dada por la relación A/A_1

Yao (1970) presenta el resultado de este desarrollo matemático:

$$\eta = 1 + \frac{2}{\pi} (2\alpha^3 \beta - \alpha\beta - \text{sen}^{-1} \beta) \quad (44)$$

donde

$$\alpha = (3/4 S)^{1/3}$$

$$\beta = \sqrt{1 - \alpha^2}$$

$$S = \frac{v_s}{v_0} L \quad (\text{puesto que } \theta = 0)$$

En la figura 14 se encuentran graficadas las ecuaciones 42 y 44. En esta figura se observa que los sedimentadores con tubos circulares tienen -teóricamente- mejor eficiencia de remoción que las placas paralelas para partículas suspendidas pe-

queñas y ligeras; sin embargo, se puede apreciar que las diferencias no son muy importantes.

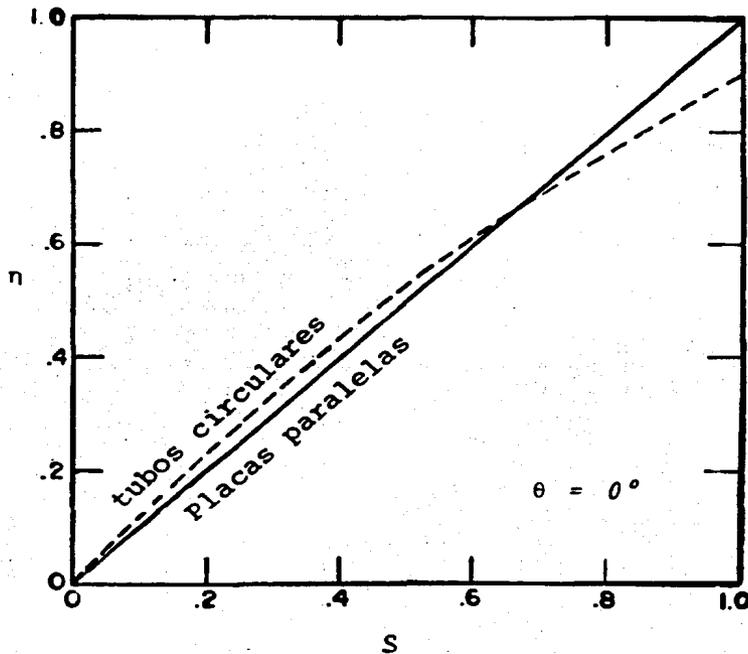


Figura 14. Eficiencia de remoción en función del valor de S para $\theta = 0$ (Yao, 1970)

4.2.3.4 Establecimiento del flujo laminar

En la discusión anterior se asumió que el flujo era laminar en todo el sedimentador; sin embargo, en la práctica no siempre es el caso ya que por lo regular a la entrada del sedimentador existe una región de transición. Para un tubo circular, en esta región, la longitud relativa L' se puede estimar con

la siguiente ecuación:

$$L' = 0.058 \frac{v_0 d}{\nu} \quad (45)$$

donde

ν : es la viscosidad cinemática del fluido

4.2.4 Optimización en el diseño de los sedimentadores de alta tasa

En 1979 Verhoff desarrolló las ecuaciones para optimizar el diseño de los sedimentadores de alta tasa con placas paralelas en tanques cilíndricos y rectangulares. En el desarrollo se asumieron las siguientes condiciones:

- a) El flujo del fluido es laminar y unidimensional
- b) No ocurre agregación de las partículas;
- c) La velocidad de sedimentación permanece constante;
- d) No se consideran los efectos de entrada de tubo y;
- e) La concentración de los sólidos suspendidos es pequeña de tal forma que, los efectos de pared se pueden despreciar.

De acuerdo con lo anterior y si se considera α como el ángulo de inclinación de la placa con respecto a la vertical

($\theta = 90^\circ - \alpha$), la ecuación 33 se transforma en:

$$\frac{v_{dc}}{v_0} = \frac{i}{\cos \alpha + \left(\frac{l}{d}\right) \sin \alpha} \quad (46)$$

donde

l : longitud de la placa

d : separación entre placa y placa

Los parámetros de diseño a optimizar para sedimentadores de placas paralelas son: la distancia entre placas, d ; la longitud de la placa, l ; el ángulo de inclinación, α y; la velocidad promedio entre placas, v_0 .

El ángulo óptimo está dado por la ecuación 35, la cual también se puede escribir como:

$$\tan \alpha = \frac{l}{d} \quad (47)$$

Al colocar un módulo de alta tasa dentro de un tanque circular o rectangular la velocidad promedio (v_0) que pasa por éste depende del ángulo de inclinación, así como de la longitud de las placas (ecuación 45). A continuación se presenta el desarrollo para el cálculo de estas velocidades.

4.2.4.1 Tanques cilíndricos

En la figura 15 se muestran las dimensiones principales para el diseño de un módulo de placas paralelas que se insertará en un tanque circular. Las condiciones geométricas son independientes de si el tanque es horizontal o vertical, o si el flujo es ascendente o descendente.

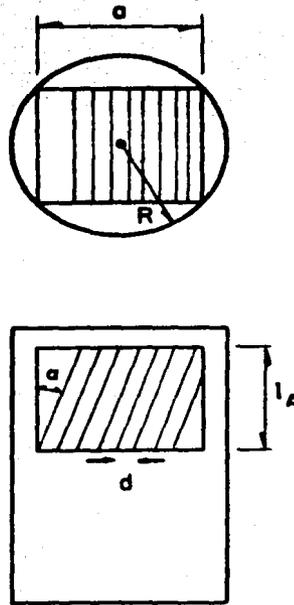


Figura 15. Sedimentador de placas paralelas dentro de un tanque cilíndrico.

La velocidad ascendente, v_b , en el área rectangular ocupada por el módulo se relaciona con la velocidad ascendente del fondo del tanque circular, v_a , por medio de:

$$v_b = \left[\frac{\pi R^2}{a (4R^2 - a^2)^{1/2}} \right] v_a \quad (48)$$

La velocidad ascendente que penetra por el área libre entre placa y placa, v_c , se relaciona con v_b por medio de:

$$v_c = \left(\frac{a}{a - l_A \tan \alpha} \right) v_b \quad (49)$$

donde

l_A : es la altura del módulo de placas paralelas.

Finalmente, la velocidad promedio paralela a las placas, v_0 , se relaciona con v_c por la ecuación:

$$v_0 = \frac{v_c}{\cos \alpha} \quad (50)$$

Al combinar las ecuaciones 47, 48 y 49 se encuentra la relación entre la velocidad ascendente del fondo del tanque circular y la velocidad promedio paralela a las placas:

$$v_0 = \frac{\pi v_a}{\left(4 - \left(\frac{a}{R}\right)^2\right)^{1/2} \left(\frac{a}{R} - \frac{l_A}{R} \tan \alpha\right) \cos \alpha} \quad (51)$$

A partir de la ecuación 50 se puede determinar la dependencia de la velocidad crítica de sedimentación sobre otros parámetros. Este hecho matemático se representa al combinar la ecuación 46 con la ecuación 51:

$$\frac{l_A}{\cos \alpha} = \frac{\pi v_a d}{v_{sc} \left(4 - \left(\frac{a}{R}\right)^2\right)^{1/2} \left(\frac{a}{R} - \frac{l_A}{R} \tan \alpha\right) \cos \alpha \sin \alpha \tan \alpha} - \frac{d}{\tan \alpha} \quad (52)$$

Si se definen las siguientes variables adimensionales:

$$\beta = \frac{a}{R} \quad ; \quad \delta = \frac{d}{R} \quad , \quad \gamma = \frac{l_A}{R} \quad (53)$$

y sustituyen en la ecuación 52, se obtiene:

$$\epsilon = \frac{v_{sc}}{v_a} = \frac{\pi \delta}{\left(4 - \beta^2\right)^{1/2} (\beta - \gamma \tan \alpha) (\gamma \sin \alpha + \delta \cos^2 \alpha)} \quad (54)$$

La variable ϵ es proporcional a la cantidad de partículas suspendidas; la minimización de ϵ con respecto a α , β , γ y δ para obtener la optimización del diseño resulta al derivar ϵ con respecto a esas variables. Nótese que no se incluye la separación entre las placas ya que, al derivar la ecuación 54 con respecto a δ , se encuentra que no depende de ella. La diferenciación da los siguientes resultados:

$$\frac{d\epsilon}{d\beta} = 0 \text{ implica: } 2\beta^2 - (\beta\gamma \cdot \tan \alpha) - 4 = 0 \quad (55)$$

$$\frac{d\epsilon}{d\gamma} = 0 \text{ implica: } \beta \sin \alpha - \delta \sin \alpha \cos \alpha - \frac{2\gamma \sin^2 \alpha}{\cos \alpha} = 0 \quad (56)$$

$$\frac{d\epsilon}{d\alpha} = 0 \text{ implica:}$$

$$\beta\gamma \cos \alpha - 2\beta \delta \cos \alpha \sin \alpha - \gamma^2 \sin \alpha + 2\gamma \delta \sin^2 \alpha - \gamma^2 \tan \alpha - \gamma\delta = 0 \quad (57)$$

La solución de las ecuaciones 54, 55, 56 proporciona los valores de los parámetros α , β y γ para un diseño óptimo. Verhoff (1979) desarrolló gráficamente la solución de estas ecuaciones (figuras 16, 17, 18 y 19).

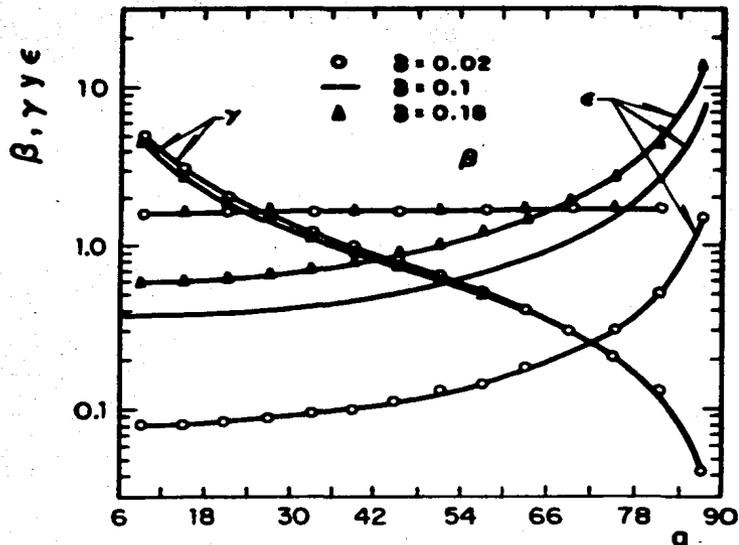


Figura 16. Valores óptimos de β , γ y ϵ en función de α para sedimentadores cilindrico-verticales con flujo ascendente (Verhoff, 1979)

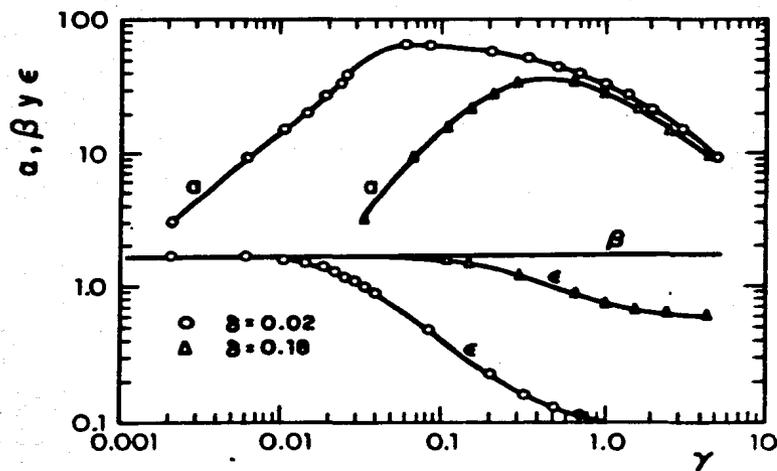


Figura 17. Valores óptimos de α , β y ϵ en función de γ para tanques cilindrico-verticales con flujo ascendente (Verhoff, 1979).

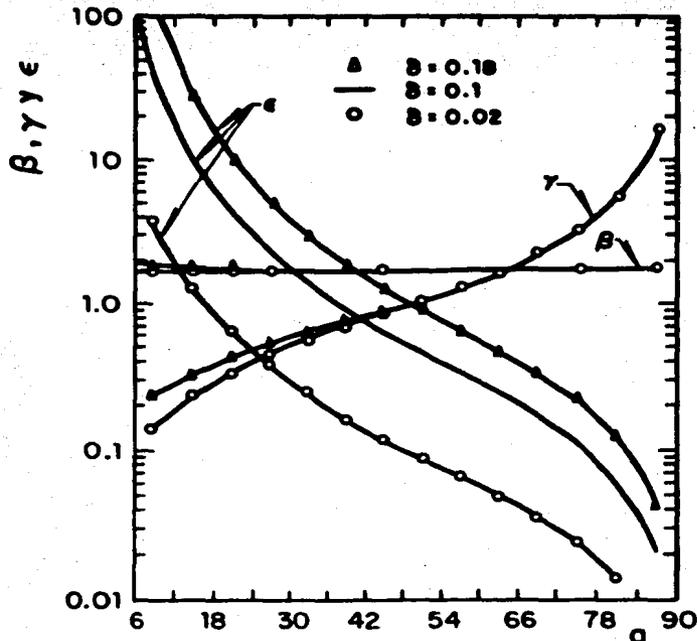


Figura 18. Valores óptimos de β , γ y ϵ en función de α para tanques cilíndrico-horizontales con flujo descendente. (Verhoff, 1979).

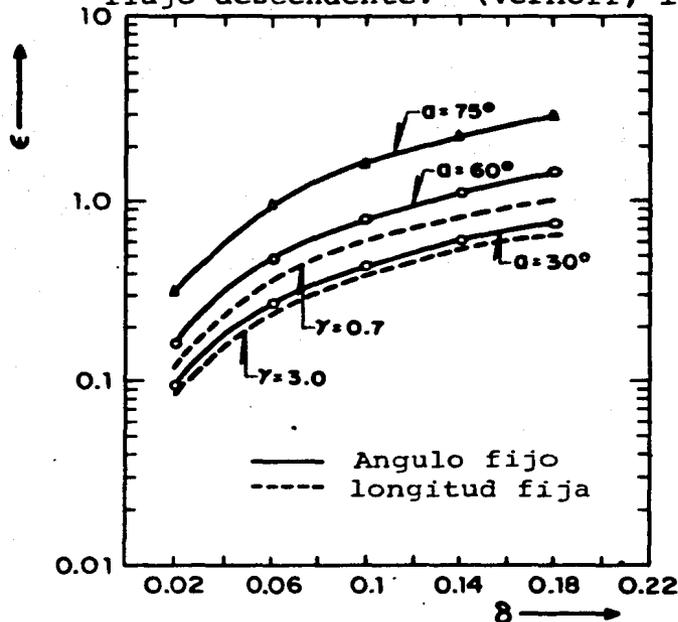


Figura 19. Velocidad crítica de sedimentación adimensional ϵ en función de la separación de placas δ para un ángulo y longitud fijas en un tanque cilíndrico-vertical (Verhoff, 1979).

4.2.4.2. Tanques rectangulares

La figura 20 muestra las dimensiones para el diseño de placas paralelas en tanques rectangulares

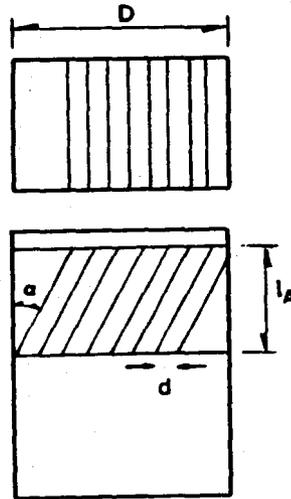


Figura 20. Sedimentador de placas paralelas dentro de un tanque rectangular.

Al igual que en el caso anterior, la minimización de la velocidad crítica de sedimentación se lleva a cabo para un valor fijo de D (largo del módulo de placas) y con el ángulo de inclinación y la longitud de la placa como variables. En esta ocasión se definen las siguientes variables adimensionales:

$$\gamma = \frac{\ell_A}{D} \quad \text{y} \quad \delta = \frac{d}{D} \quad (58)$$

La velocidad de sedimentación crítica adimensional, ϵ , para

tanques verticales con flujo ascendente y descendente es:

Flujo ascendente

$$\epsilon = \frac{\delta}{(\cos \alpha - \gamma \operatorname{sen} \alpha)(\gamma \tan \alpha + \delta \cos \alpha)} \quad (59)$$

Flujo descendente

$$\epsilon = \frac{\delta}{(\cos \alpha - \gamma \operatorname{sen} \alpha)(\gamma \tan \alpha - \delta \cos \alpha)} \quad (60)$$

En la figura 21 se encuentran graficados los valores óptimos de las variables adimensionales para tanques verticales rectangulares.

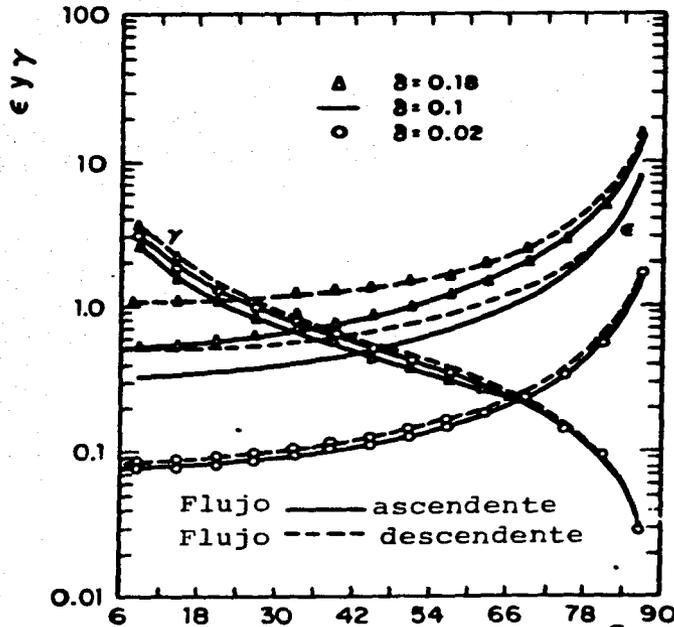


Figura 21. Valores óptimos de ϵ y γ en función de α para flujo ascendente y descendente en tanques verticales rectangulares (Verhoff (1979)).

4.3 Características hidráulicas en los sedimentadores

4.3.1 Importancia de la descripción del comportamiento hidráulico

La eficiencia de la mayoría de los procesos y operaciones unitarias llevados a cabo en Ingeniería Química, es función de las características hidráulicas del sistema.

La sedimentación es un ejemplo típico en el cual, la eficiencia hidráulica ejerce una influencia considerable en la eficiencia de la operación.

Para caracterizar hidráulicamente un tanque se deberían conocer las trayectorias de velocidad y su magnitud en todo el recipiente; pero, el cálculo preciso de las velocidades locales del flujo, necesarias para formar el flujo neto, no sólo es impráctico, sino casi siempre imposible. Por ello se han desarrollado técnicas de trazado que proporcionan información sobre la cinemática del tanque. Estas técnicas permiten el desarrollo de curvas de dispersión, a partir de las cuales se pueden evaluar las características hidráulicas.

4.3.2 Tipos de flujo en los sedimentadores

Existen dos tipos de flujo que deben ser considerados: el flujo pistón y el perfectamente mezclado. Se llama flujo pis

tón cuando cada parte del fluido permanece en el sistema por un periodo igual al tiempo teórico de retención - volumen del tanque dividido por el gasto. Dentro de un reactor perfectamente mezclado, la composición interna se mantiene uniforme en todo el volumen por una agitación intensa. Existe una distribución de tiempo de retención desde cero hasta infinito.

En un sedimentador el flujo deseado es el pistón, pero en la práctica esto no ocurre ya que existe cierto grado de mezclado e incidencia de zonas muertas. En un tanque real el tiempo de retención de los elementos del flujo se distribuye sobre un amplio intervalo. Las perturbaciones del flujo en las zonas de entrada y salida, corrientes de densidad y convección y la existencia de zonas muertas, determinan la distribución del tiempo de retención y así, la eficiencia hidráulica de la unidad. Como consecuencia de lo anterior, en un sedimentador real existe una mezcla entre flujo pistón y perfectamente mezclado.

4.3.3 Técnicas de trazado

En estas técnicas se emplea un trazador (el cual puede ser un colorante, electrolito, isótopo radioactivo, etc.) que tiene como características fundamentales la de no perturbar al sistema y no aportar modificación alguna a las propiedades químicas y físicas de los fluidos presentes (Pineault, 1972).

Para realizar los ensayos se inyecta el trazador en el influente del tanque y su concentración se determina en el efluente como función del tiempo. Los resultados de las pruebas de trazado se grafican como valores adimensionales de concentración contra tiempo, a saber: C/C_0 vs t/T , donde C es la concentración del trazador a la salida al tiempo t ; C_0 es la concentración inicial del tanque y; T es el tiempo teórico de retención.

La curva obtenida al graficar los valores anteriores se puede ver como una curva de distribución del tiempo de retención del flujo en el tanque, en el cual los valores C/C_0 representan frecuencias relativas. Una curva típica de dispersión para un sedimentador real se observa en la figura 22, curva C. Para un sedimentador ideal (con flujo pistón) la curva de dispersión es una línea recta representada por $t/T = 1$ (figura 22, curva B). Por el contrario un tanque perfectamente mezclado se puede describir por la curva A de la figura 22, representado por:

$$C/C_0 = e^{-t/T} \quad (61)$$

Villemonte (1966) expuso que las curvas reales de dispersión se ven afectadas por las siguientes condiciones:

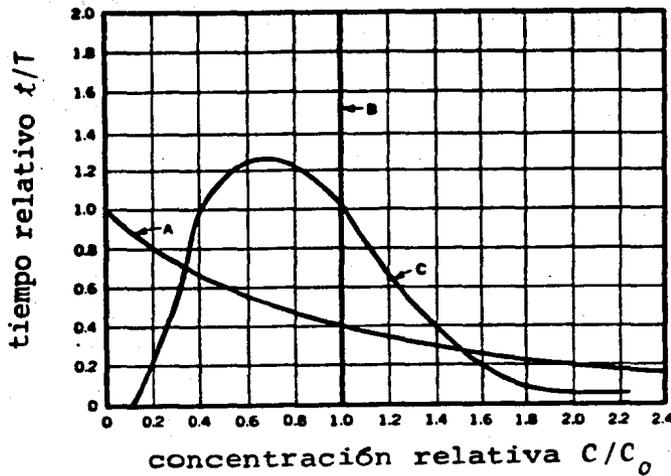


Figura 22. Curva de dispersión para diferentes tipos de flujo.

1. Zonas muertas. Si un tanque tiene regiones en las cuales no hay movimiento del fluido el volumen efectivo y el tiempo de retención decrecen. Por lo tanto una curva de dispersión ideal se desvía hacia el tiempo cero, puesto que el trazador sale en el efluente prematuramente.
2. Remolinos. Como resultado de los remolinos existe una continua dilución del trazador y la curva se ensancha.
3. Cortos circuitos. Se definen como cortos circuitos aquella parte del flujo con velocidad infinita y tiempo de retención igual a cero (Rebhun 1965). Los cortos circui

tos producen efectos similares a los de la condición 1 y además, producen asimetría en la curva.

Como ya se mencionó anteriormente en un tanque real se va a presentar una mezcla de flujo pistón y perfectamente mezclado, además de las condiciones 1, 2 y 3.

4.4 Tipos de sedimentadores

Básicamente existen dos tipos de sedimentadores usados en potabilización y tratamiento de aguas: estáticos y por contacto de lodos. La diferencia estriba en el hecho de que en los estáticos se lleva a cabo la sedimentación de una manera simple, mientras que en los de contacto de lodos existe una recirculación de las partículas floculadas hacia el agua bruta.

4.4.1 Sedimentadores estáticos

Los sedimentadores estáticos se clasifican de acuerdo con la manera en que se colectan los lodos en: sistemas sin rastras, con rastras y por succión de lodos.

4.4.1.1 Sedimentadores estáticos sin sistemas de rastras

Dentro de este tipo de sedimentadores se encuentran los cilíndricos-cónicos normales, los estáticos de flujo horizontal y los

estáticos laminares (o de alta tasa).

Decantadores cilindro-cónicos normales

Este sedimentador de flujo vertical (figura 23), se utiliza especialmente en el caso de la depuración por vía química para instalaciones pequeñas de hasta 6 l/s. Para el tratamiento de aguas residuales se utiliza en poblaciones inferiores 1000 ó 2000 habitantes. La pendiente de la parte cónica varía de 45 a 65° dependiendo de la naturaleza del agua tratada.

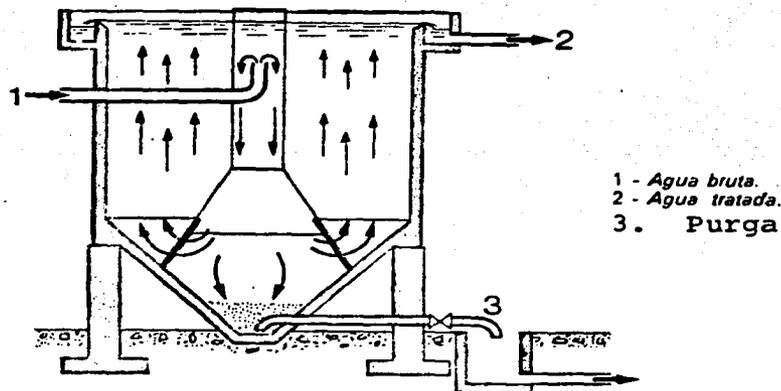


Figura 23. Sedimentador cilindrico-cónico

Sedimentadores estáticos de flujo horizontal

Este tipo de sedimentadores exige grandes superficies y por otra parte, cuando se requieren evacuar los lodos, debe procederse al vaciado total. Fué usado ampliamente en estaciones de potabilización de agua.

Sedimentadores estáticos laminares

Existen diversos tipos de sedimentadores estáticos laminares los cuales están provistos de placas paralelas o tubos. En la figura 24 se representa un ejemplo. En este sedimentador

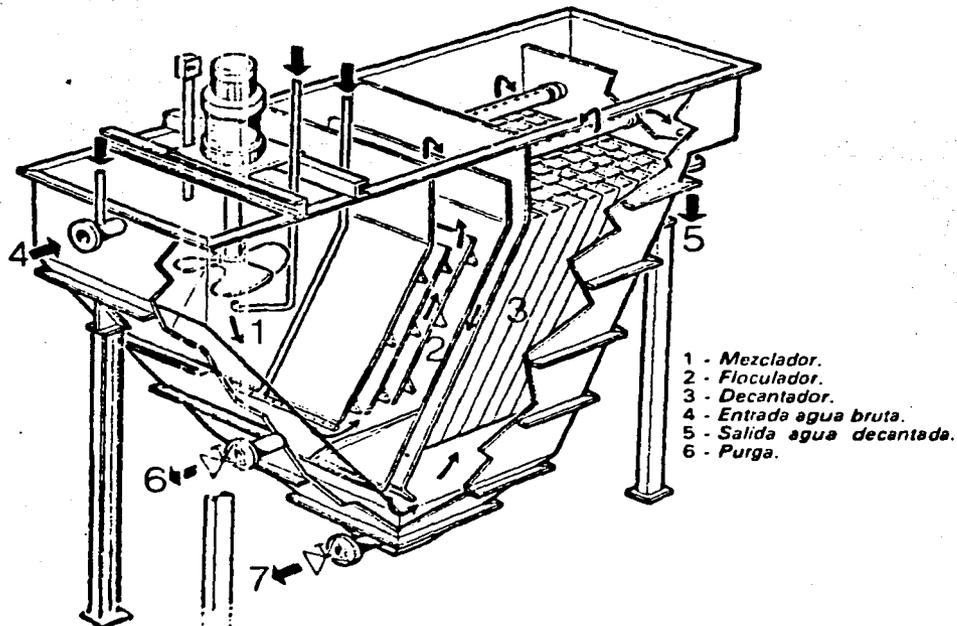


Figura 24. Decantador estático laminar

se encuentra dentro del mismo tanque la zona de mezcla del agua y los reactivos de tratamiento, el floculador y el dispositivo de sedimentación de placas paralelas. Los lodos producidos pasan por gravedad al fondo y se concentran en la tolva del aparato.

4.4.1.2 Sedimentadores estáticos equipados con rastras

Las rastras son dispositivos que llevan a cabo un barrido mecánico de los lodos con velocidades de desplazamiento del orden de 1 a 5 cm/s. Los sedimentadores con rastras se utilizan en tratamientos primarios, clarificación, depuración química y biológica de aguas residuales y, en general, en cualquier tipo de agua que contenga materias pesadas que puedan sedimentar espontáneamente. Existen dos tipos: los circulares y los rectangulares.

Sedimentadores circulares

En los sedimentadores circulares (figura 25) el sistema de rastras va sujeto a una estructura que gira alrededor del eje del depósito. Puede llevar una sola lámina o bien una serie de rastras montadas en "celosía" y puede contar con un sistema de eliminación de espumas en la superficie. Un motoreductor, montado sobre el puente, acciona una rueda matriz que se desplaza sobre el muro de coronación del sedimentador.

La pendiente del fondo, en la que se efectúa el barrido de los lodos, es del 4 al 10% (Degremont 1979). Los lodos concentrados en una fosa central, son evacuados por un sistema automático de extracción.

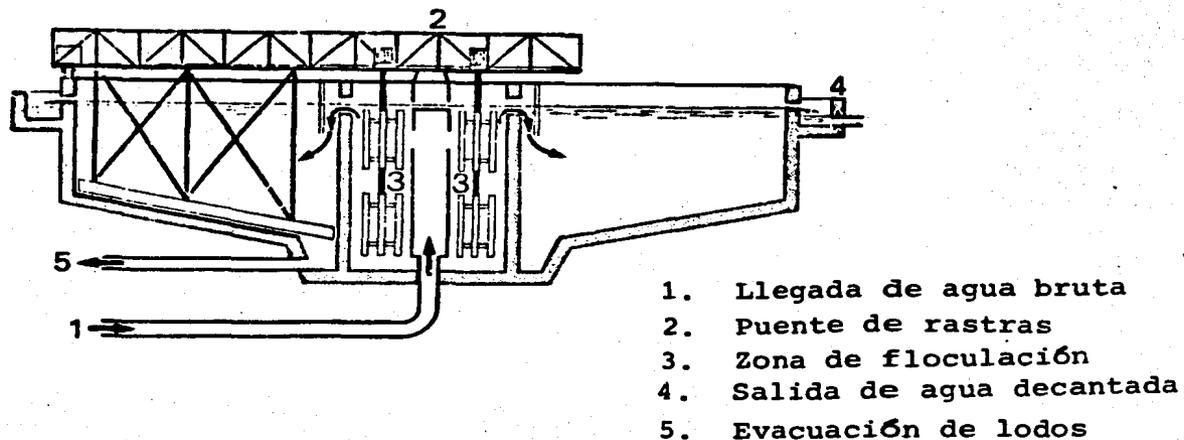
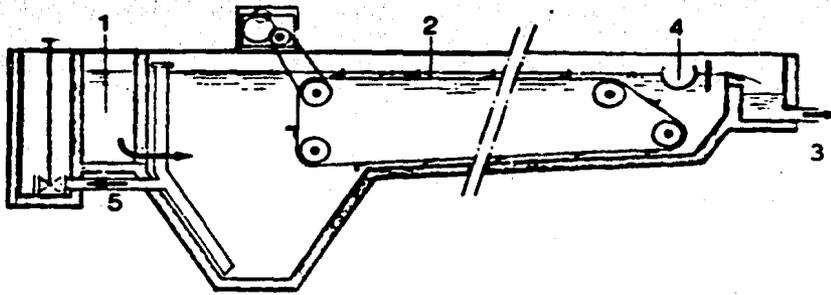


Figura 25. Sedimentador circular con rastras

Sedimentadores longitudinales rectangulares

Los sedimentadores rectangulares (figura 26) presentan la ventaja con respecto a las circulares, de que permiten una instalación más compacta de los diferentes equipos en la planta, pero su costo es más elevado. Normalmente se adopta una relación longitud-ancho, comprendida entre 3 y 6. Tienen una pendiente en el fondo del 1%. El sistema de rastras puede ser accionado mediante cadenas sin fin sumergidas.

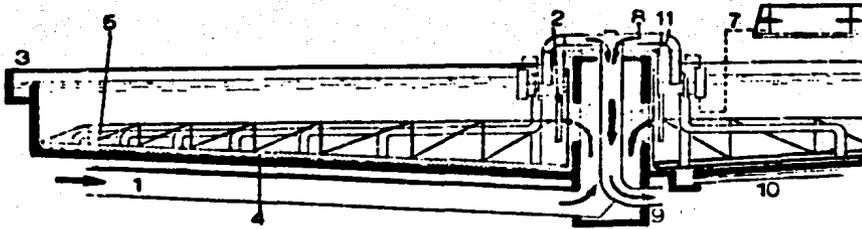


- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. Llegada de agua bruta | 4. Recolección de flotantes |
| 2. Cadena sin fin | 5. Evacuación de lodos |
| 3. Salida de agua decantada | |

Figura 26. Sedimentador longitudinal con sistema de cadenas

4.4.1.3 Sedimentadores estáticos con succión de lodos

Este tipo de sedimentadores (figura 27) se utilizan principalmente, en el tratamiento de aguas residuales mediante el proceso de lodos activados, en el que es importante que se reduzca el tiempo de permanencia de los lodos, con el fin de evitar su biodegradación. Generalmente, se utiliza un puente de ras-tras periférico. El efecto de succión se consigue por diferen-cias de presión hidrostática (sifones). La evacuación de los lodos, recogidos en una canaleta móvil, se efectúa por el cen-tro del aparato mediante un sifón.



- | | |
|---------------------|-----------------------------------|
| 1. Alimentación | 7. Alimentación de aire a presión |
| 2. Deflector | 8. Sifón |
| 3. Vertedero | 9. Lodos |
| 4. Rastras | 10. Vaciado |
| 5. Tubos de succión | 11. Cabeza de arrastre |

Figura 27. Clarificador con succión de lodos

4.4.2 Sedimentadores por contacto de lodos

La finalidad de estos sedimentadores es conseguir que se mejoren los fenómenos de floculación y obtener un rendimiento máximo de la cantidad de reactivo introducida al floculador. Se utilizan en todos los procesos de depuración fisicoquímica como por ejemplo: coagulación de materias coloidales, decoloración, precipitación de sales alcalinotérreas (descarbonatación, ablandamiento), eliminación de hierro y manganeso, tratamiento de aguas residuales por vía química, etc. Existen dos tipos: sedimentadores con circulación de lodos y de lecho de lodos.

4.4.2.1 Sedimentadores con circulación de lodos

Los lodos se separan del agua clara en una zona de sedimentación y se recirculan haciéndoles pasar por una zona de mezcla donde llega el agua bruta, a la cual se añadió los reactivos. De esta forma se recuperan los reactivos que no se consumieron (figura 29).

Existen también sedimentadores de alta tasa por recirculación de lodos como el mostrado en la figura 28.

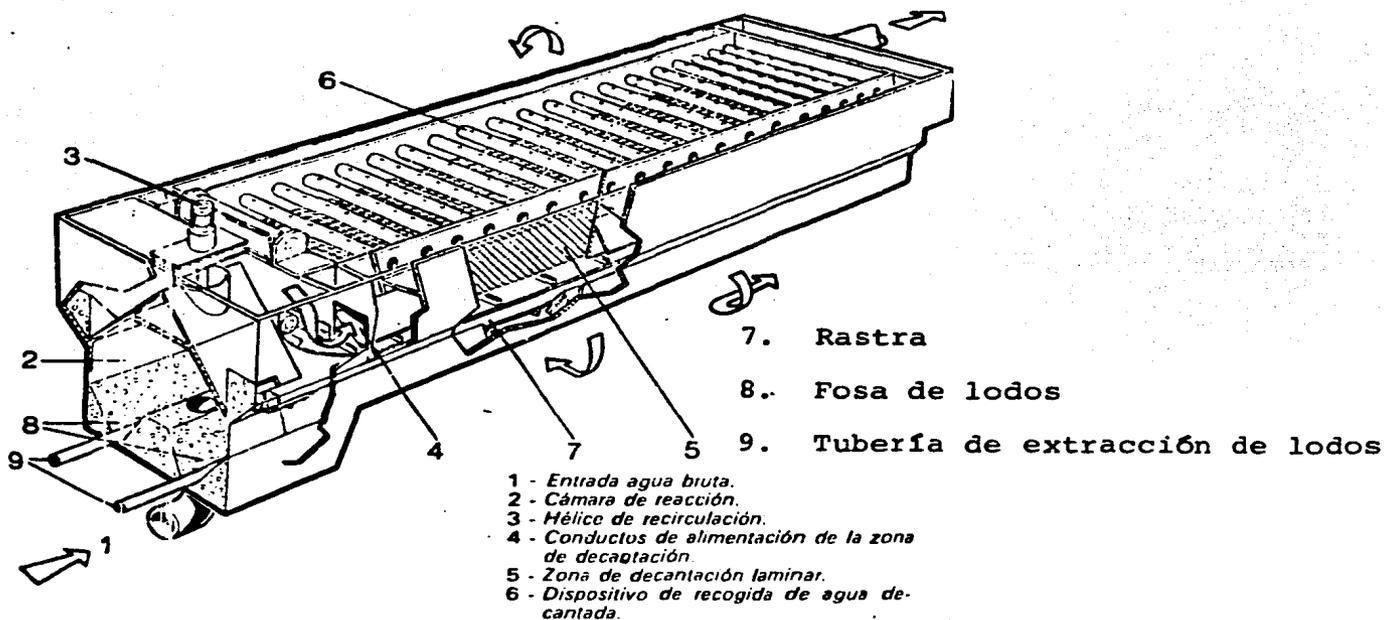
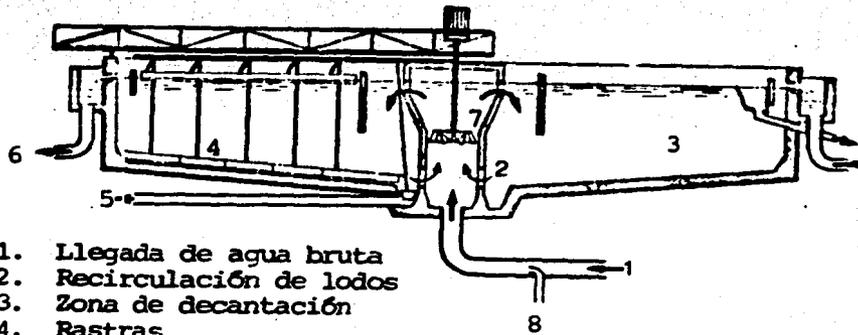
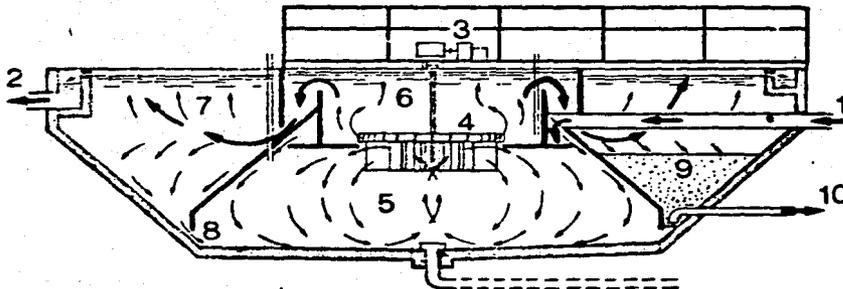


Figura 28. Sedimentador laminar con recirculación de lodos



1. Llegada de agua bruta
 2. Recirculación de lodos
 3. Zona de decantación
 4. Rastras
 5. Lodos en exceso
 6. Salida de agua tratada
 7. Hélice
 8. Introducción de reactivos
- 29a



1. Llegada agua bruta
2. Salida agua tratada.
3. Grupo de arrastre.
4. Turbina.
5. Zona de mezcla primaria.
6. Zona de mezcla secundaria.
7. Agua clarificada.
8. Recirculación de lodos
9. Concentrador de lodos
10. Lodos en exceso

29b

Figura. 29. Sedimentadores de recirculación de lodos
 a) Turbocirculator
 b) Accelerator

4.4.2.2 Sedimentadores con formación de lecho de lodos

En estos equipos, se trata de mantener al lodo en forma de una masa en expansión al hacer circular agua de abajo hacia arriba de una manera regular y uniforme. Existe una agitación muy lenta en el punto de introducción del agua (figura 30).

4.4.3 Dispositivos de extracción de lodos

La extracción de lodos de los sedimentadores puede hacerse mediante un dispositivo de purga continua o de manera intermitente. La frecuencia y duración de las purgas se regula mediante aparatos de relojería. Los accesorios de extracción pueden ser válvulas automáticas, sifones o incluso bombas. Las válvulas automáticas, generalmente son válvulas de membrana, cuyo cierre se consigue aplicando una presión de agua o aire al exterior de la membrana. Por otro lado, cuando los lodos son muy concentrados, su extracción se realiza por medio de bombas de desplazamiento positivo.

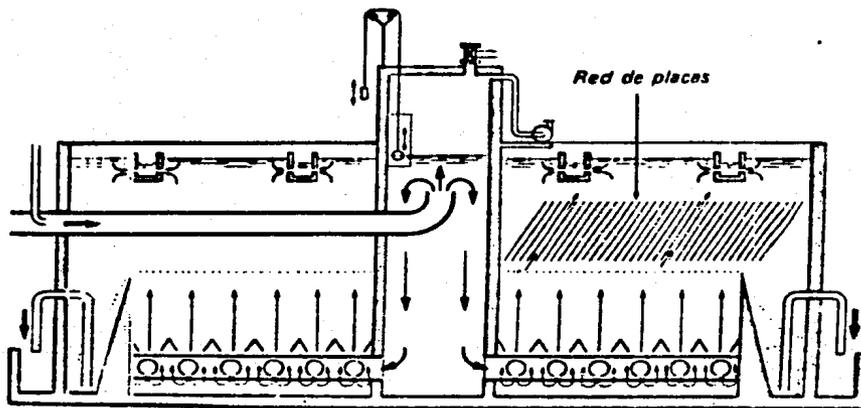


Figura 30. Sedimentador laminar por lecho de lodos.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El objetivo de los estudios que a continuación se describen fué determinar las condiciones de operación de un sedimentador de alta tasa. Para ello se llevaron a cabo estudios preliminares en laboratorio y, posteriormente, pruebas de campo en una planta de tratamiento de aguas residuales.

5.1 Descripción del sedimentador piloto

El sedimentador piloto con el cual se trabajó es un diseño a escala de un sedimentador que opera normalmente con un flujo de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. El escalamiento se realizó con base en los principios de similitud -geométrica, cinemática y dinámica- (Ríos et al, 1984) y dió como resultado el sedimentador que a continuación se describe.

El sedimentador piloto está construido con placas de acrílico transparente de un centímetro de espesor. Se encuentra colocado sobre un soporte hecho con ángulos y soleras de acero (figura 31).

El piloto consiste en un tanque de fondo atolvado en el que se pueden distinguir tres partes: la superior tiene una sección cuadrada de 94 x 94 centímetros y 64 centímetros de altura; la media que es una pirámide truncada invertida de 62 centímetros de altura y, la inferior consistente en un cubo de 10 cm por lado. En la figura 31 se indican las zonas de entrada, salida, y de acumulación de lodos para el decantador. Como se puede observar, el módulo de alta tasa y las canaletas de recolección se encuentran situados en la parte superior del modelo.

El sedimentador cuenta con dos módulos intercambiables: uno construido a base de tubos cuadrados y otro con placas paralelas. El de tubos cuadrados está formado por hileras de tubos de 5 x 5 centímetros de sección transversal y 27.7 cm de profundidad, éstos tubos se encuentran inclinados 60° con respecto a la horizontal. La inclinación de las hileras de tubos es alternada: hacia la izquierda y luego a la derecha. El módulo cuenta con un área superficial de 2.78 m^2 . El otro módulo está formado por placas paralelas separadas 5 cm entre una y otra y, consta de dos secciones, cada una de 42.5 cm de largo

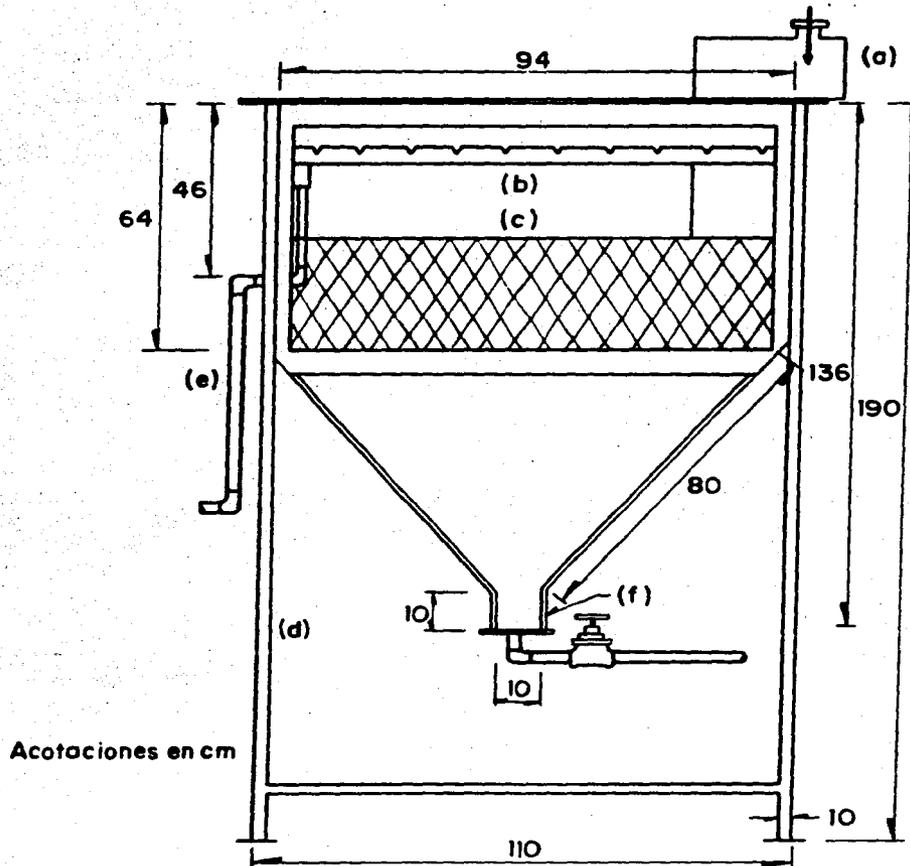


Figura 31. Sedimentador piloto de alta tasa
 a) entrada; b) canaletas; c) módulo de alta
 tasa; d) soporte; e) salida de agua clarifi-
 cada; f) zona de acumulación de lodos.

por 27.7 cm de profundidad. Las placas están inclinadas 60° con respecto a la horizontal y, al igual que el módulo de tubos cuadrados, tienen 3 mm de espesor.

El sistema de recolección del efluente clarificado está formado por seis canaletas de lámina de acero, dobladas y unidas entre sí. Todas tienen 5.0 cm de ancho y 5.0 cm de altura. Cinco de ellas tienen 88.0 cm de largo y la sexta 74.0 centímetros (figura 32). La descarga de las canaletas se efectúa a una tubería común. El volumen útil del tanque, medido con las canaletas en la posición baja es de 660 l, 746 l con la posición alta y 700 l sin módulo.

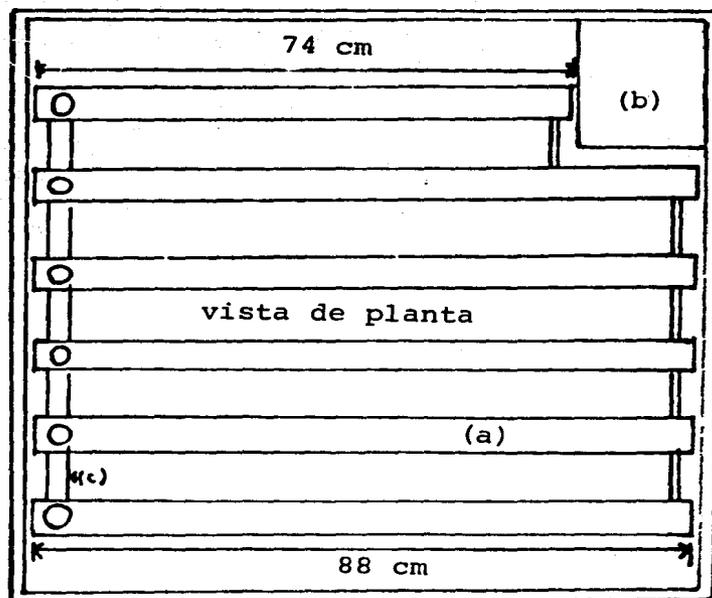


Figura 32. Canaletas de recolección: a) canaletas; b) entrada; c) tubería de descarga.

Es interesante hacer notar que tanto los módulos de alta tasa como las canaletas, se pueden subir y bajar dentro del piloto para trabajar a diferentes condiciones de operación.

En el fondo de la sección atolvada se encuentra instalada una tubería para la extracción de lodos. El control del gasto de purga se hace por medio de una válvula de compuerta.

El sedimentador cuenta con cuatro entradas intercambiables para la alimentación: a) canal de sección cuadrada; b) canal con reducción atolvada; c) canal con deflector paralelo a las paredes de la tolva y; d) canal de sección triangular.

5.2 Descripción de los estudios y métodos de análisis

5.2.1 Estudios preliminares de sedimentación

Estos estudios se llevaron a cabo en los laboratorios del Instituto de Ingeniería de la UNAM, introduciendo al sedimentador flóculos con objeto de tener una idea del funcionamiento del piloto.

El equipo se instaló como se observa en la figura 33. Como partículas sedimentables se emplearon lodos secundarios provenientes de un sistema de biodiscos alimentado con un efluente industrial. Los lodos fueron introducidos en el influente del

sedimentador al mismo tiempo que agua potable con ayuda de una bomba dosificadora.

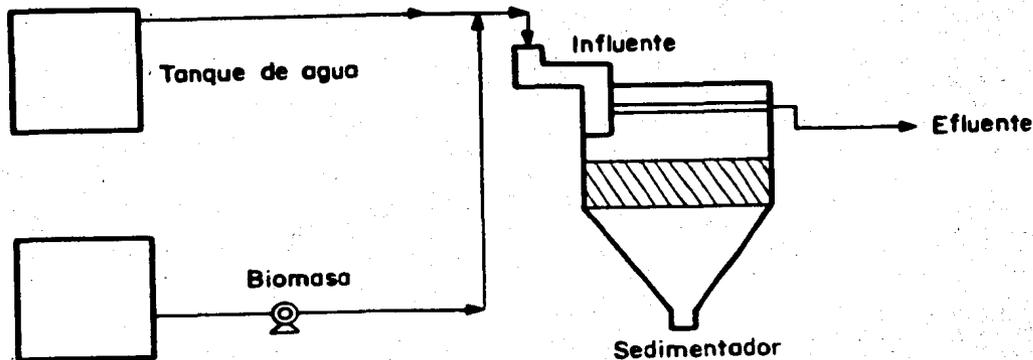


Figura 33. Equipo instalado durante los estudios preliminares.

La toma de agua se hizo de un tanque de carga constante de 1.5 m^3 situado a 10 m sobre el nivel del piso. El gasto de agua manejada se calculó mediante aforos volumétricos. La medición de éste se efectuó en la tubería de descarga.

Jiménez et al (1986) encontraron, a partir de estudios de trazado, que la entrada cuadrada presentó el mejor funcionamiento hidráulico, mientras que la entrada con reducción atollada produjo los peores resultados.

Con base en esos resultados los estudios preliminares de sedimentación se efectuaron con las entradas cuadrada y con reducción atolvada, y, usando el módulo de tubos cuadrados en posición baja. Se variaron los gastos de alimentación usando 0.12, 0.26 y 1.02 l/s. En la Tabla 1 se pueden apreciar las condiciones de operación. En todas las corridas el gasto de purga fué cero.

TABLA 1. CONDICIONES DE OPERACION PARA LOS ESTUDIOS PRELIMINARES

Entrada cuadrada	Entrada con reducción atolvada
$Q = 0.26 \text{ l/s}$	$Q = 0.12 \text{ l/s}$
$Q = 1.02 \text{ l/s}$	$Q = 1.02 \text{ l/s}$

El análisis experimental consistió en observar el comportamiento de los flóculos dentro del tanque, en general, y del módulo de alta tasa, en particular.

5.2.2 Pruebas de campo

Como se pudo constatar, a partir de la investigación bibliográfica (capítulo 4), existen pocas referencias sobre el uso de sedimentadores de alta tasa para el tratamiento de las aguas residuales -no así, para plantas potabilizadoras- por lo cual

se concluyó que sería de sumo interés instalar el piloto en una planta de tratamiento de aguas residuales.

Así, el sedimentador piloto fue trasladado a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Universitaria (PTCU). En los experimentos de sedimentación se utilizó, como material sedimentable, licor mezclado proveniente del proceso de lodos activados perfectamente mezclado. La alimentación de los lodos al piloto se realizó mediante un sifón para evitar el rompimiento de los flóculos que puede ocurrir al pasar esta mezcla a través de una bomba. El gasto de alimentación se controló por medio de una válvula y su medición se hizo en forma volumétrica (figura 34).

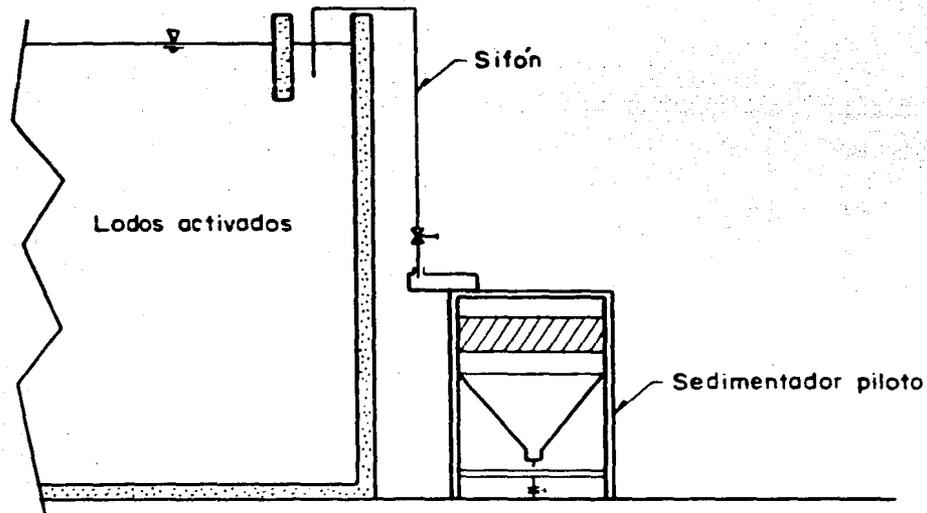


Figura 34. Instalación del sedimentador piloto en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de C.U.

Los estudios se programaron de tal forma que se pudiera analizar la influencia y tipo del módulo de alta tasa sobre la operación del sedimentador. Además, también se hicieron pruebas para estudiar la influencia del sulfato de aluminio (coagulante) en la sedimentación.

En todos los casos se utilizó la entrada cuadrada para la alimentación ya que, ésta fué la que presentó el mejor comportamiento hidráulico (Jiménez et al, 1986).

Para reducir la turbulencia y evitar al máximo el rompimiento de flóculos se adaptó un dispositivo a la entrada cuadrada como se muestra en la figura 35. De esta forma la alimentación de lodos se hizo en forma sumergida.

Para cada corrida se tomaron seis muestras dentro del sedimentador con el objeto de determinar la concentración de los sólidos suspendidos totales, éstas fueron:

- influente
- efluente
- cuatro puntos en la zona de recolección de agua clarificada (figura 36).

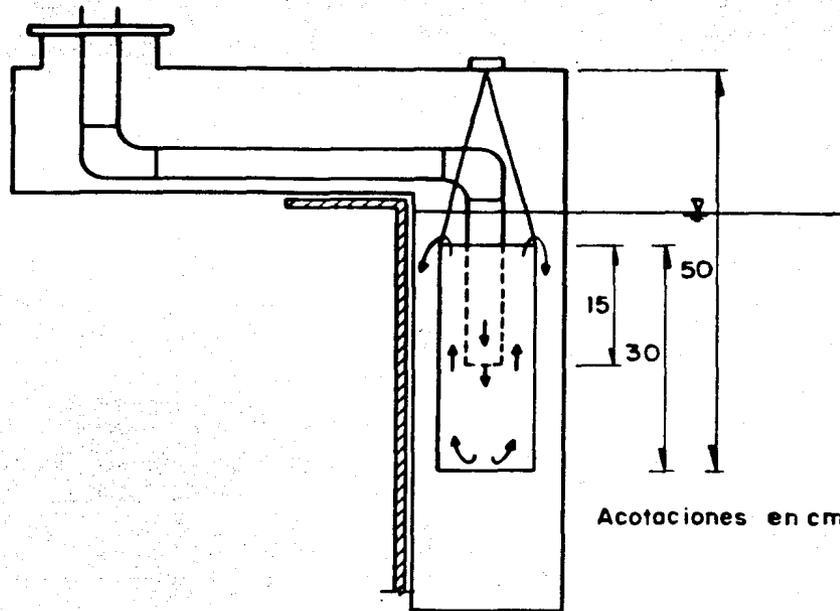


Figura 35. Adaptación efectuada a la entrada cuadrada para los estudios de sedimentación.

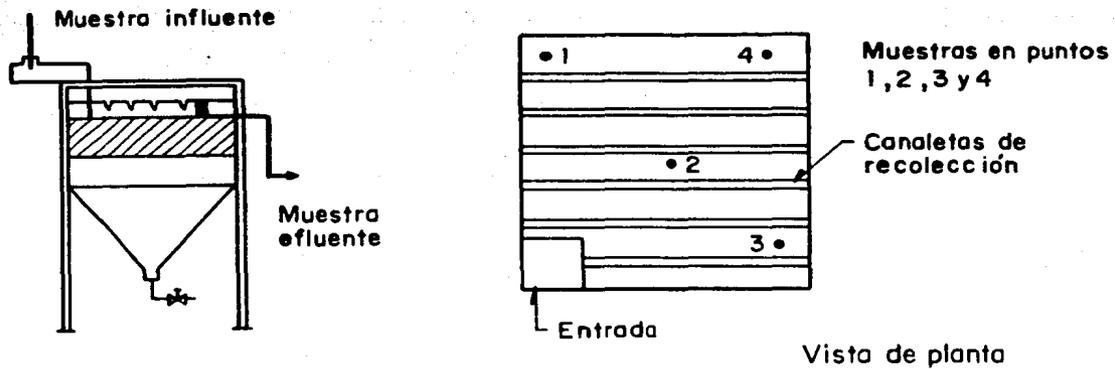


Figura 36. Puntos de muestreo durante las pruebas de campo dentro del sedimentador.

El objetivo de tomar cuatro muestras en la parte superior fue el de comprobar si existe o no distribución uniforme de los sólidos suspendidos a la salida.

El muestreo se realizó después de haber transcurrido tres veces el tiempo teórico de retención, ya que se encontró a partir de los estudios de trazado que éste periodo de tiempo es suficiente para llegar al régimen estacionario (Jiménez et al, 1986).

5.2.2.1 Estudios con módulo de tubos cuadrados

En este estudio se observó la influencia del módulo de tubos cuadrados sobre la operación del sedimentador. Se estudiaron dos condiciones: canaletas en posición alta y canaletas en posición baja (figura 37).

Para cada condición de operación se estudiaron cinco gastos de alimentación de licor mezclado: 0.26, 0.47, 0.72, 0.92 y 1.03 l/s. Cada corrida se efectuó tres veces y con el objeto de tener un valor representativo se calculó el promedio aritmético. El nivel de lodos dentro de la tolva se mantuvo a la altura mostrada en la figura 38. Para ello se necesitó un gasto de purga del 20% de la alimentación para gastos del influente de 0.26 y 0.47 l/s, y de 25% para los demás.

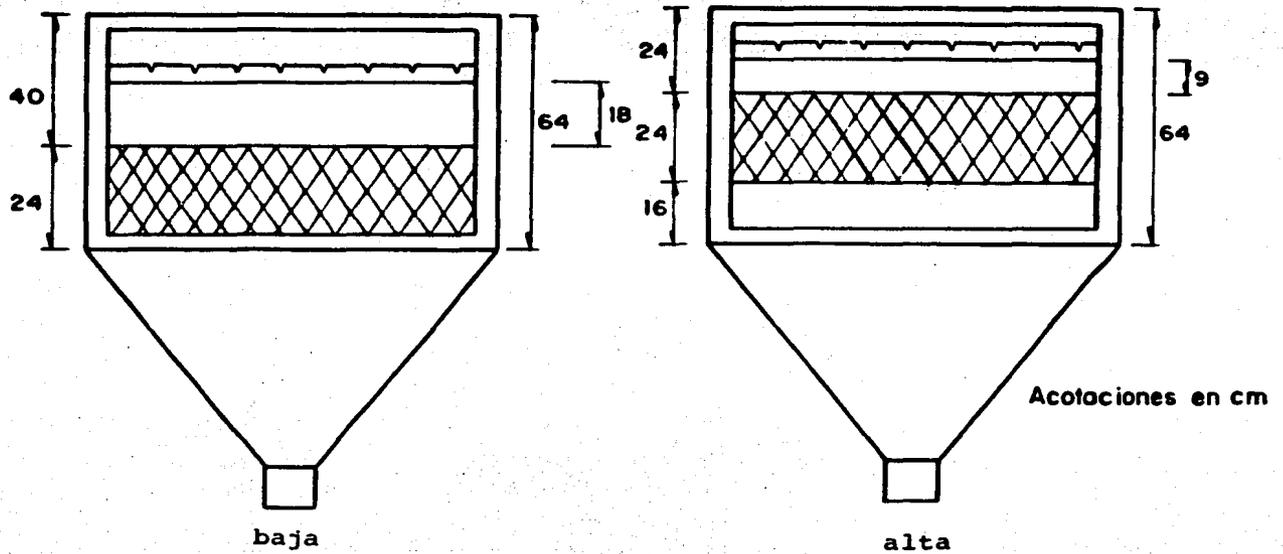


Figura 37. Posición baja y alta de las canaletas de recolección.

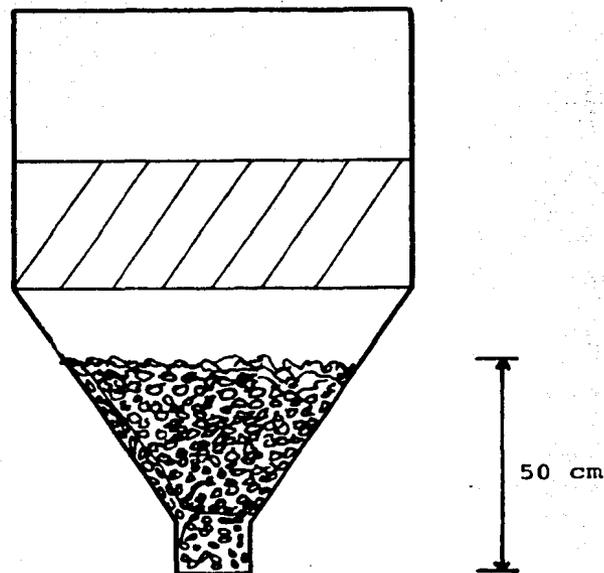


Figura 38. Nivel de lodos mantenido durante los experimentos dentro del sedimentador.

En las Tablas 2 y 3 se encuentran resumidas las condiciones de operación estudiadas para el módulo de tubos cuadrados.

TABLA 2. CONDICIONES DE OPERACION UTILIZADAS PARA EL MODULO DE TUBOS CUADRADOS, POSICION ALTA

Gasto de influente Q_i (l/s)	Gasto de Purga		Puntos de muestreo
	Como % de Q_i	Q_p (l/s)	
0.26	20%	0.05	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.47	20%	0.09	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.72	25%	0.18	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.92	25%	0.23	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
1.03	25%	0.25	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior

TABLA 3. CONDICIONES DE OPERACION UTILIZADAS PARA EL MODULO DE TUBOS CUADRADOS, POSICION BAJA

Gasto de influente Q_i (l/s)	Gasto de Purga		Puntos de muestreo
	Como % de Q_i	Q_p (l/s)	
0.26	20	0.05	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.47	20	0.09	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.72	25	0.18	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.92	25	0.23	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
1.03	25	0.25	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior

5.2.2.2 Estudios con módulo de placas paralelas

Estos estudios se realizaron bajo las mismas condiciones que el anterior únicamente se cambió el módulo de tubos cuadrados por el de placas paralelas. Las condiciones se encuentran resumidas en las Tablas 4 y 5.

TABLA 4. CONDICIONES DE OPERACION UTILIZADAS PARA EL MODULO DE PLACAS PARALELAS, POSICION ALTA

Gasto influente Q_i (l/s)	Gasto de Purga		Puntos de muestreo
	Como % de Q_i	Q_p (l/s)	
0.26	20	0.05	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.47	20	0.09	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.72	25	0.18	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.92	25	0.23	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
1.03	25	0.25	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior

TABLA 5. CONDICIONES DE OPERACION UTILIZADAS PARA EL MODULO DE PLACAS PARALELAS, POSICION BAJA

Gasto influente Q_i (l/s)	Gasto de Purga		Puntos de muestreo
	Como % de Q_i	Q_p (l/s)	
0.26	20	0.05	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.47	20	0.09	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.72	25	0.18	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.92	25	0.23	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
1.03	25	0.25	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior

5.2.2.3 Estudios sin módulo

Con el objeto de comparar el funcionamiento del sedimentador con uno convencional se llevaron a cabo pruebas sin el módulo de alta tasa. Estos estudios se hicieron con las canaletas en posición baja (Figura 37). Se estudiaron cinco gastos, a saber: 0.26, 0.47, 0.72, 0.92 y 1.03 l/s. Los gastos de purga fueron iguales a los de las corridas anteriores y cada prueba se realizó también por triplicado. Las condiciones de operación se encuentran resumidas en la Tabla 6.

TABLA 6. CONDICIONES DE OPERACION PARA LOS ESTUDIOS SIN MODULOS. CANALETAS EN POSICION BAJA

Gasto influente Q_i (l/s)	Gasto de Purga		Puntos de muestreo
	Como % de Q_i	Q_p (l/s)	
0.26	20	0.05	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.47	20	0.09	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.72	25	0.18	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.92	25	0.23	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
1.03	25	0.25	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior

5.2.2.4 Influencia del sulfato de aluminio como coagulante en la operación del sedimentador

Estos estudios se llevaron a cabo con objeto de comprobar si la adición de un coagulante al licor mezclado mejora su sedimentabilidad y, por lo tanto, la eficiencia de remoción de sólidos dentro del sedimentador de alta tasa. En este caso se empleó el módulo de tubos cuadrados en la posición alta y cinco gastos de influente diferentes (0.26, 0.47, 0.72, 0.92 y 1.03 l/s).

Como coagulante se usó sulfato de aluminio (grado industrial). La cantidad necesaria de sulfato de aluminio se determinó mediante una serie de pruebas de jarras. Estas se llevaron a cabo en un aparato marca Phipps and Bird.

El procedimiento seguido se explica a continuación. Se colocaron seis muestras de licor mezclado (1 litro) y a cinco de ellas se añadieron cantidades diferentes de sulfato de aluminio (a la sexta no se agregó). Durante 1 minuto se agitaron a una velocidad de 100 revoluciones por minuto, y después, por 15 minutos, a 20 rpm. Al cabo de 30 minutos de reposo se tomaron muestras del líquido sobrenadante y se midió la turbidez mediante un Nefelómetro Turner. En la Tabla 7 se muestran los resultados. Estos demuestran que se obtuvo una menor turbidez para 40 mg/l de sulfato de aluminio.

Con este dato se calculó la dosis de coagulante para el sedimentador, tomando en cuenta que una corrida dura tres veces el tiempo de retención. De tal modo que la solución de coagulante que se preparó tenía una concentración de 20.6 g/l.

TABLA 7. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE JARRAS

Vaso #	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ mg/l	Turbidez UTN
1	0	2.7
2	20	2.4
3	30	1.75
4	40	1.4
5	50	1.5
6	60	1.6

La alimentación de la solución del coagulante se realizó en el influente del sedimentador de una manera continua (el gasto se midió volumétricamente).

Para cada corrida y gasto se efectuaron seis muestreos dentro del sedimentador: influente, efluente y cuatro puntos en la superficie. En la Tabla 8 se encuentran resumidas las condiciones de operación.

TABLA 8. CONDICIONES DE OPERACION PARA MODULO DE TUBOS CUADRADOS EN POSICION ALTA CON COAGULANTE (SULFATO DE ALUMINIO)

Q_i (l/s)	Q_p (l/s)	Q_c (ml/s)	C_{Al} g/l	M mg/l	Puntos de muestreo
0.26	0.05	0.50	20.6	40	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.47	0.09	0.91	20.6	40	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.72	0.18	1.40	20.6	40	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
0.92	0.23	1.79	20.6	40	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior
1.03	0.25	2.00	20.6	40	influyente, efluente y 4 puntos en la parte superior

Q_i : gasto de influente

Q_p : gasto de purga

Q_c : gasto de coagulante alimentado

C_{Al} : concentración de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ alimentado

M : concentración de $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ en el tanque

6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Estudios preliminares

En las figuras 39 y 40 se muestra la trayectoria que siguieron los flóculos dentro del sedimentador y específicamente en el módulo de alta tasa.

Como se puede observar la suspensión entra al módulo de una manera ascendente. Las partículas que tuvieron una velocidad de sedimentación mayor o igual a su velocidad crítica se depositaron en los tubos cuadrados. Después de cierto tiempo, cuando había suficiente material acumulado, éste resbaló y cayó al fondo del sedimentador.

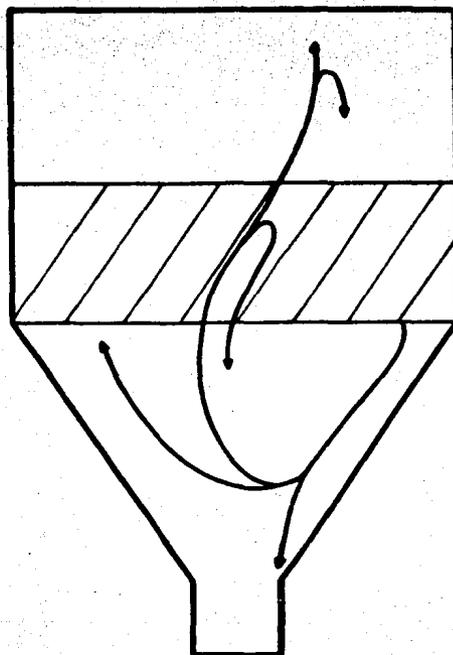


Figura 39. Trayectoria de los flóculos en el sedimentador de alta tasa.

Por otra parte, se observó que en la región atollada también se depositaron sedimentos. Para el caso de la entrada cuadrada, se observó que éstos se depositaron en mayor proporción en la esquina adyacente y en la opuesta a la entrada. Jiménez et al, (1986) localizaron y cuantificaron las zonas muertas dentro del sedimentador producidas al usar la entrada cuadrada y con reducción atollada. Estos resultados se presentan en las figuras 41 y 42 así como en la Tabla 9.

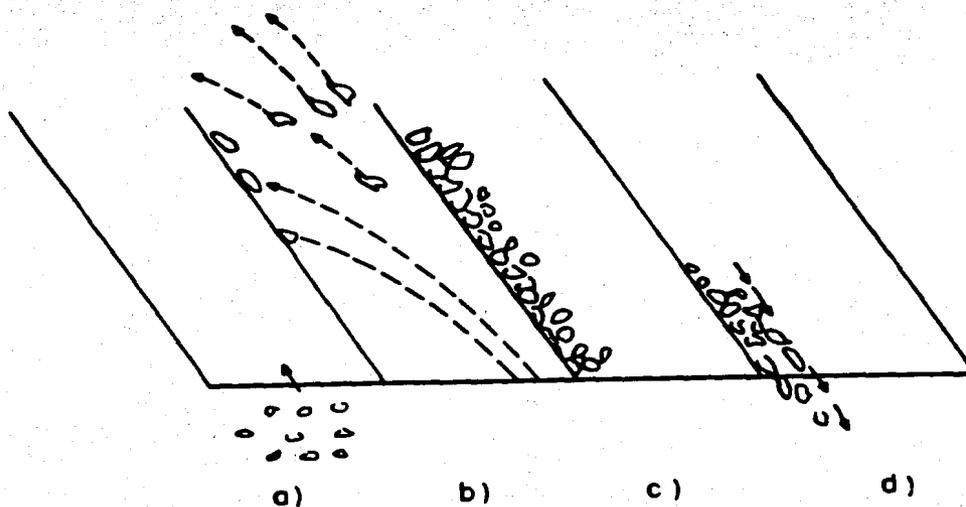
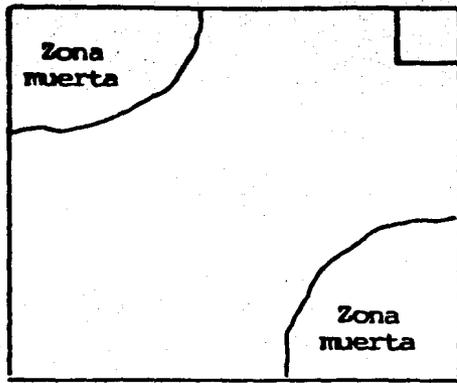


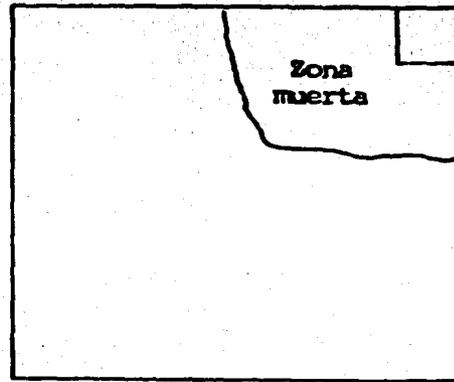
Figura 40. Trayectoria de las partículas dentro del módulo de alta tasa.
 a) Entrada al módulo; b) Trayectoria; c) Acumulación; d) Limpieza.

TABLA 9. PORCENTAJE DE ZONAS MUERTAS (JIMENEZ ET AL, 1986).

Q (1/s)	Entrada cuadrada		Entrada con reducción atollada
	módulo bajo	módulo alto	
0.26	23.6	22.2	26.0
0.47	26.7	45.4	64.1
0.72	16.4	15.4	7.2
0.92	16.7	14.8	7.5
1.01	16.0	15.2	7.5
Promedio	19.9	12.5	22.5

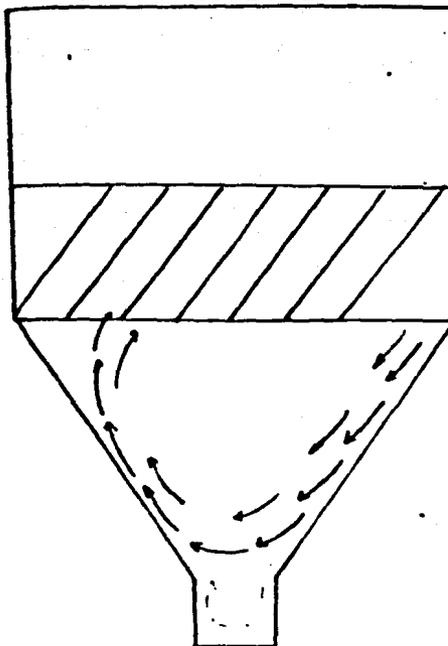


a) Entrada cuadrada

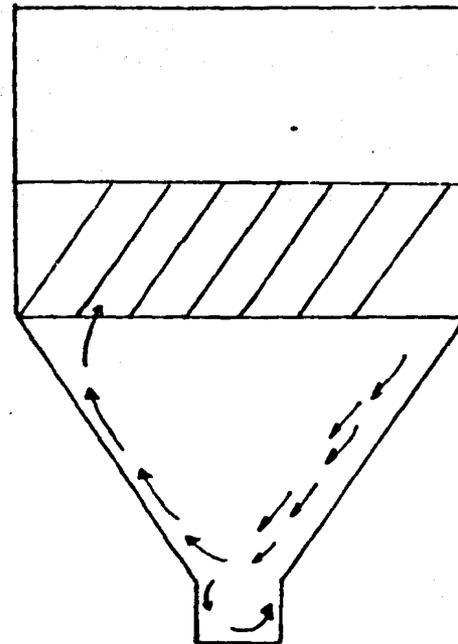


b) Entrada con reducción atolvada

Figura 41. Localización de las zonas muertas. Vista de planta del sedimentador. (Jiménez et al, 1986).
a) Entrada cuadrada; b) Entrada con reducción atolvada.



(a)



(b)

Figura 42. Vista de perfil de la trayectoria de las corrientes de flujo dentro del sedimentador. a) Entrada cuadrada; b) Entrada con reducción atolvada. (Jiménez et al, 1986).

Con base en los resultados anteriores se observa que los sedimentos se acumulan en los lugares donde no había zonas muertas puesto que en estos no pasaba agua con flóculos (figura 43).

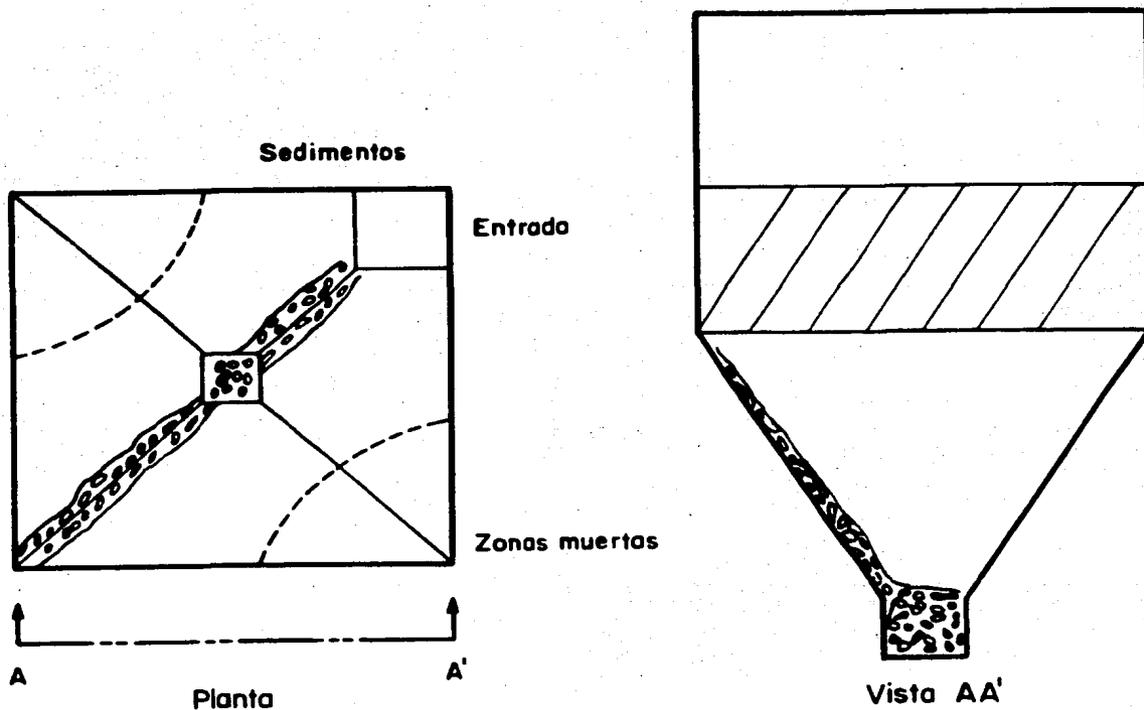


Figura 43. Zonas con mayor cantidad de sedimentos al usar la entrada cuadrada.

Al usar la entrada con reducción atollada, los sedimentos se depositaron en mayor proporción en la esquina donde se encuentra la alimentación. De acuerdo con los estudios hechos por Jiménez et al, (1986), lo anterior fué debido a que esta región es considerada como una zona donde hay suficiente calma

para que los lodos sedimenten mientras que, en el resto del tanque, existe turbulencia. En la figura 44 se muestra esquemáticamente lo anterior.

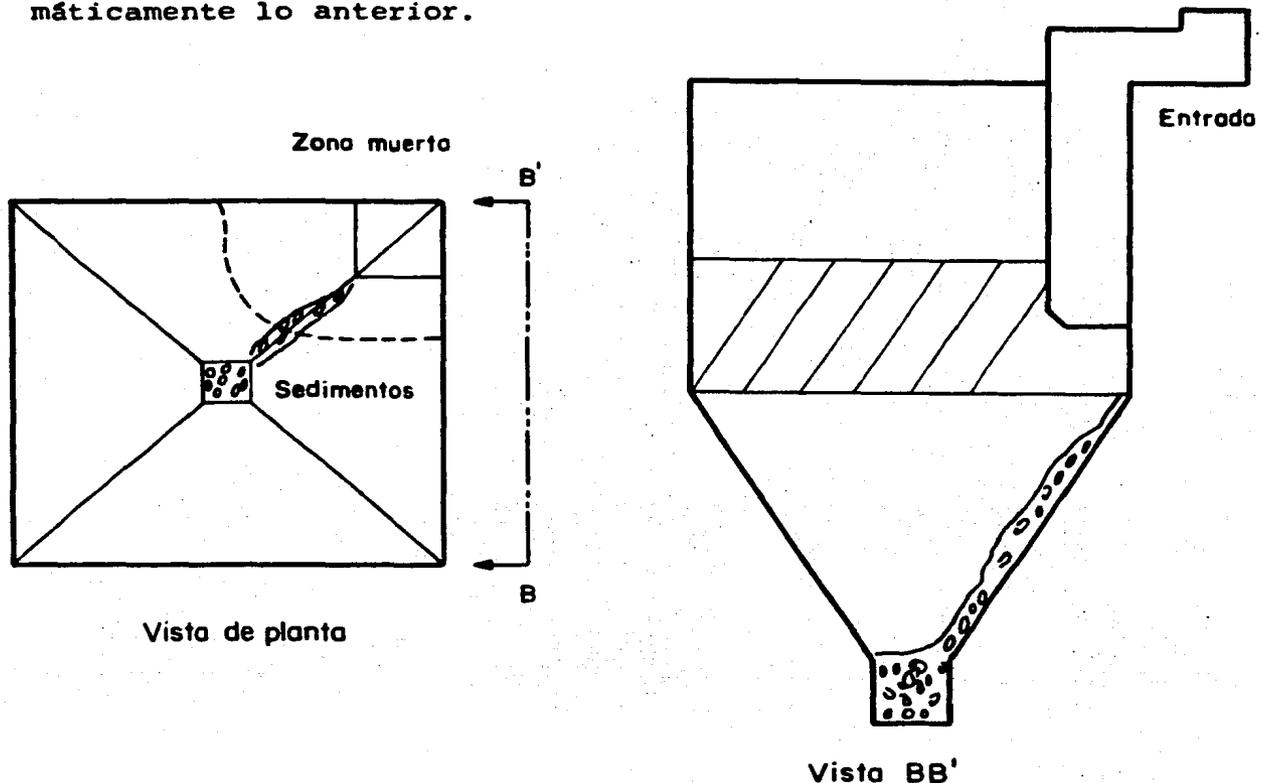


Figura 44. Zonas con mayor cantidad de sedimentos al usar la entrada con reducción atolvada.

Los resultados antes expuestos -aparentemente contradictorios- se explican de la siguiente manera:

- 1) La turbulencia existente al usar la entrada cuadrada no es tan alta ya que permite que los lodos se depositen en las zonas muertas y;

- 2) La entrada con reducción atollada produce tal turbulencia que el único lugar donde se pueden depositar los lodos es en la zona estancada.

6.2 Pruebas de campo

Se llevaron a cabo un total de 82 corridas para los cinco gastos estudiados (0.26, 0.47, 0.72, 0.92 y 1.03 l/s) y seis condiciones de operación (módulo de tubos cuadrados y módulo de placas paralelas, ambos con las canaletas en posición baja y alta, sin módulo de alta tasa y, con módulo y adición de coagulante). En total se muestrearon 492 puntos.

La concentración de lodos del influente, durante todos los ensayos, varío desde 450 hasta 1020 mg/l* por lo que el promedio de las 82 corridas para la concentración del influente fué de 666 mg/l con una desviación estándar de 124 mg/l. El índice volumétrico de lodos (IVL) -el cual está relacionado con la densidad de los sólidos sedimentados- varió de 148 a 254 ml/g con una media de 199 ml/g y 40 ml/g de desviación estándar (Tabla 3.6, Anexo 3).

Con la purga aplicada (20 ó 25%, según el gasto) se obtuvieron concentraciones de sólidos suspendidos de alrededor de 3500 mg/l.

* Esta variación en la concentración del licor mezclado se debió a la política de operación de la Planta de Tratamiento de Aguas de C.U.

6.2.1 Influencia del módulo de alta tasa

En las Tablas 2.1 y 2.2 (Anexo 2) se encuentran los resultados de los estudios de sedimentación para el módulo de tubos cuadrados y de placas paralelas con las canaletas en posición alta y baja y para los estudios sin módulo de alta tasa.

La eficiencia del sedimentador se calculó mediante la siguiente relación:

$$\eta = \left(1 - \frac{C_m}{C_i}\right) * 100 \quad (62)$$

donde,

η : % de remoción de sólidos suspendidos

C_m : concentración de sólidos suspendidos en el punto de muestreo (mg/l)

C_i : concentración de sólidos suspendidos en el influente (mg/l)

Con objeto de tener estandarizados los resultados, los gastos fueron transformados en cargas hidráulicas. Se tomó como área transversal del tanque 0.8239 m^2 , $(0.92 \times 0.92 \text{ m} - 0.15 \times 0.15 \text{ m})$, así la carga hidráulica se calculó con la siguiente relación:

$$\text{carga hidr\u00e1ulica} = Q/A$$

(63)

donde

Q : gasto volum\u00e9trico

A : \u00e1rea transversal del tanque

En la Tabla 10 se muestran los resultados de estas conversiones.

TABLA 10. EQUIVALENCIAS ENTRE GASTO Y CARGA HIDRAULICA PARA EL SEDIMENTADOR UTILIZADO

$Q_{\text{influyente}}$ (l/s)	Carga hidr\u00e1ulica ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$)
0.26	27.3
0.47	49.3
0.72	75.5
0.92	96.5
1.03	108.0

Los c\u00e1lculos de eficiencias de sedimentaci\u00f3n se realizaron con la ecuaci\u00f3n 62 (para los promedios de las tres corridas de cada gasto) y se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2 del Anexo 3.

Como era de esperarse, para todos los casos estudiados, la eficiencia de remoci\u00f3n de s\u00f3lidos en el efluente decrece a medida que aumenta la carga hidr\u00e1ulica aplicada (figuras 45, 46 y 47).

No se encontraron diferencias significativas entre las posiciones alta y baja de las canaletas, ya que al calcular la desviación estándar para la eficiencia de las dos posiciones (Tabla 3.3, Anexo 3) se encontró que la máxima fué de 1.9% para módulo de tubos cuadrados, y de 3.7% para el módulo de placas paralelas. Lo anterior concuerda con la teoría de Hazen (1904), quien demostró matemáticamente que la cantidad de sedimentos removidos es independiente de la profundidad del tanque. Por este motivo en las figuras 45 y 46 sólo se presenta una curva para ambas posiciones.

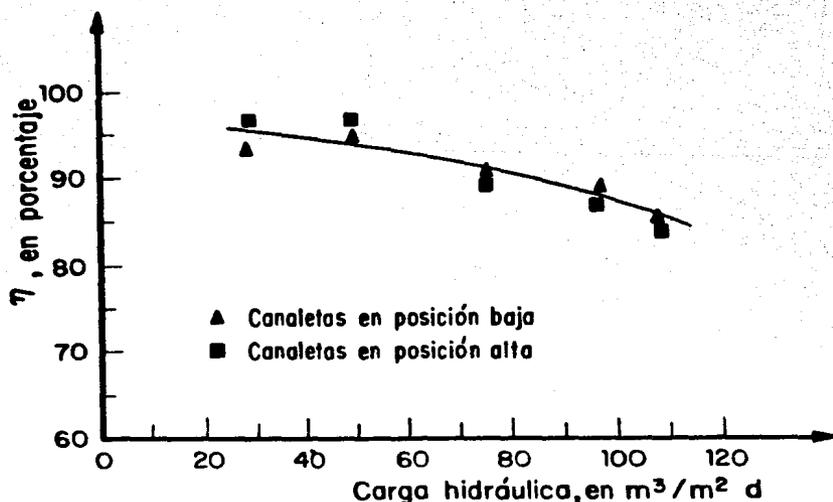


Figura 45. Eficiencias de remoción de sólidos en el sedimentador. Módulo de tubos cuadrados.

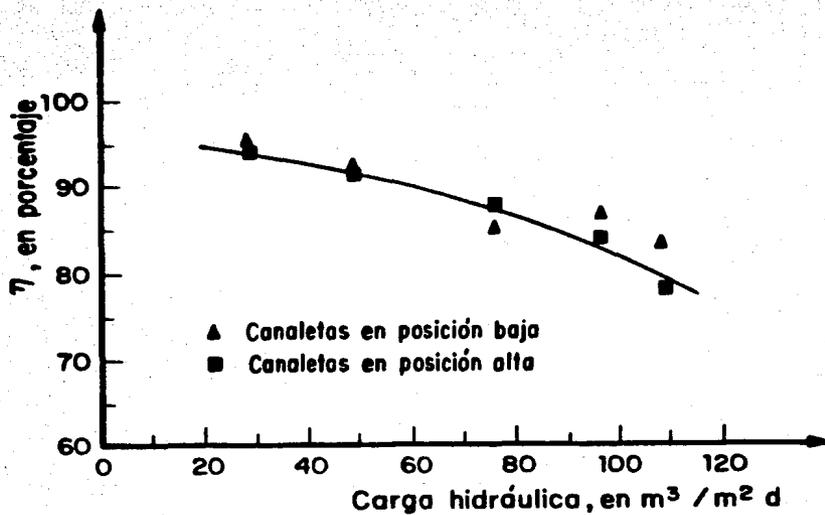


Figura 46. Eficiéncias de remoci3n de s3lidos en el sedimenador. M3dulo de placas paralelas.

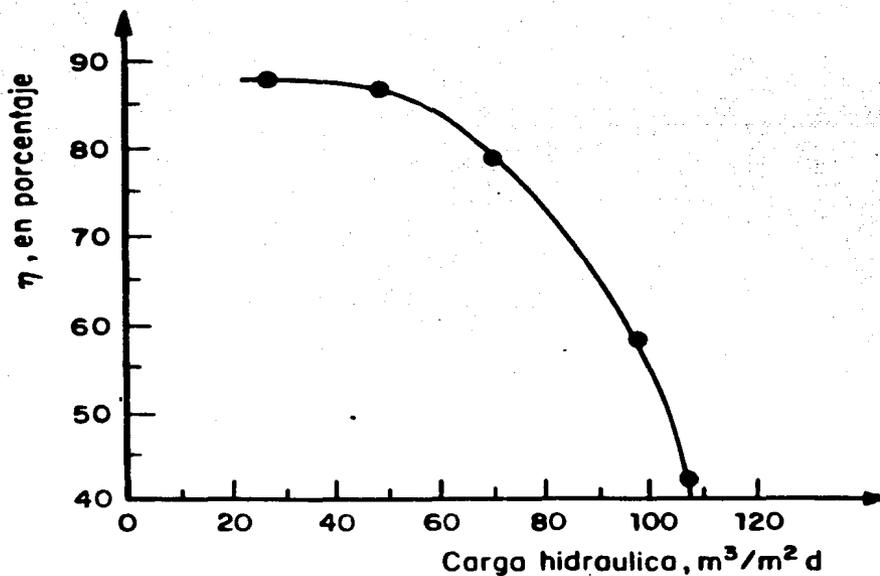


Figura 47. Eficiéncias de remoci3n de s3lidos en el sedimenador. Sin m3dulo de alta tasa.

Al usar el módulo de tubos cuadrados se encontró que para una carga hidráulica de $27.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ la eficiencia de remoción de sólidos es alrededor de 95%, mientras que para una carga hidráulica de $108 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ tiene un valor de 85%; esto es, al aumentar casi cuatro veces la carga hidráulica, la eficiencia decrece en sólo un 10% (figura 45).

De manera similar al usar el módulo de placas paralelas se observó que para $27.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ la eficiencia de remoción de sólidos es de 95% y para $108.0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ de 81%. En este caso, al cuadruplicarse la carga hidráulica la eficiencia de remoción de sólidos decrece en 15% (figura 46).

Cuando se removió el módulo de alta tasa y se operó el sedimentador sin él, se encontró lo siguiente: para una carga hidráulica de hasta $50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ la eficiencia de remoción de sólidos decrece suavemente (figura 47), pero al rebasar éste valor la eficiencia disminuye en forma considerable. Así, para una carga hidráulica aplicada de $27.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ se remueve el 88% de los sólidos suspendidos en tanto que para $108 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ la remoción es del 42%. Es decir, al aumentar 4 veces la carga hidráulica la eficiencia decrece en 46%.

Si se compara la operación del sedimentador al usar el módulo de tubos cuadrados y el de placas paralelas se encuentra que el primero es ligeramente más eficiente que el de placas para-

lelas (como se aprecia en la figura 48). Además se nota que la máxima diferencia en las eficiencias de remoción se encuentra en la carga hidráulica más alta, o sea $108.0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$. Sin embargo, ésta es de únicamente el 5%. De acuerdo con Yao (1970) el orden teórico de preferencia, para un mejor funcio-

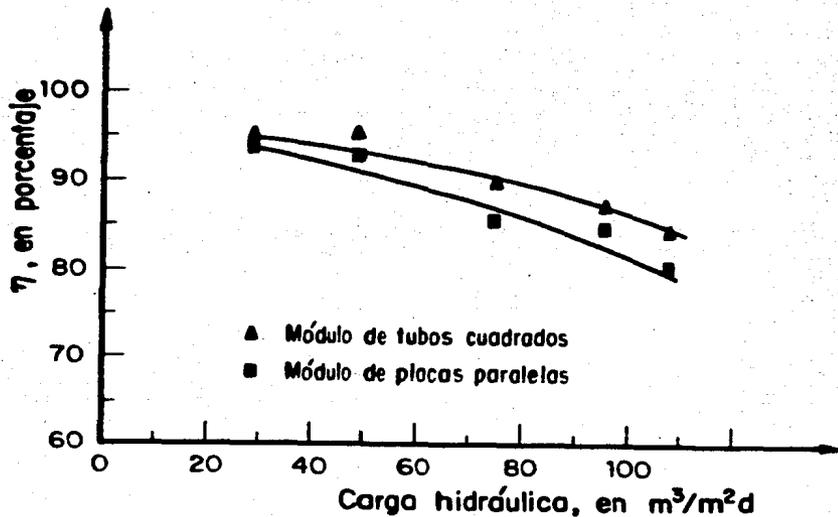


Figura 48. Influencia del tipo de módulo en la operación del sedimentador.

namiento del sedimentador es: placas paralelas y después tubos cuadrados lo cual no concuerda con los resultados obtenidos en la práctica. Lo anterior puede ser debido a que, hi-

dráulicamente, el módulo de tubos cuadrados es mejor que el de placas paralelas, ya que, en la corta longitud de las placas el efecto de pared ocasionado en dos planos para el caso de los tubos es comparable con el producido por las placas (Di Bernardo, 1987).

En las figuras 49 y 50 se pueden apreciar la influencia de la carga másica en la operación del sedimentador para el módulo de tubos cuadrados y el módulo de placas paralelas (Tabla 3.5, Anexo 3). En estas figuras se observa que al aumentar la carga másica (por el aumento correspondiente de la carga hidráulica) la remoción de sólidos suspendidos decrece. Para el módulo de tubos cuadrados se obtiene una eficiencia de 96% para la carga másica de $15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ y de 87% para la carga másica de $63 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ (figura 49). De una manera similar, para el módulo de placas paralelas la eficiencia es de 95% para la carga de $20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ y de 80% para $82 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$.

Por otro lado, en las figuras 51 y 52 se muestran los resultados obtenidos en la remoción de sólidos. Los datos corresponden a la zona superior del sedimentador, es decir, la zona de recolección de agua clarificada (módulo de tubos cuadrados, Tabla 3.2, Anexo 3). Existe uniformidad en la cantidad removida de sólidos suspendidos; así, para la posición baja del módulo el coeficiente de variación es menor a 2.1% y al 3.7% para la posición alta.

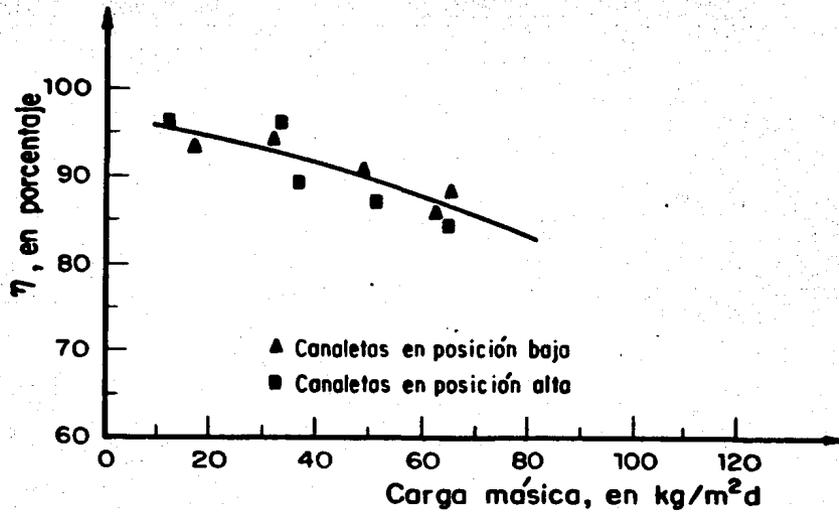


Figura 49. Influencia de la carga másica en la operación del sedimentador. Módulo de tubos cuadrados.

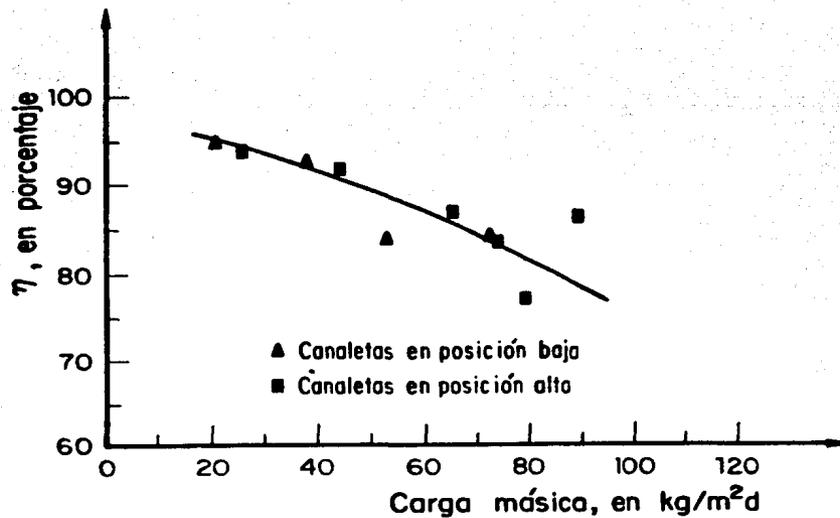


Figura 50. Influencia de la carga másica en la operación del sedimentador. Módulo de placas paralelas.

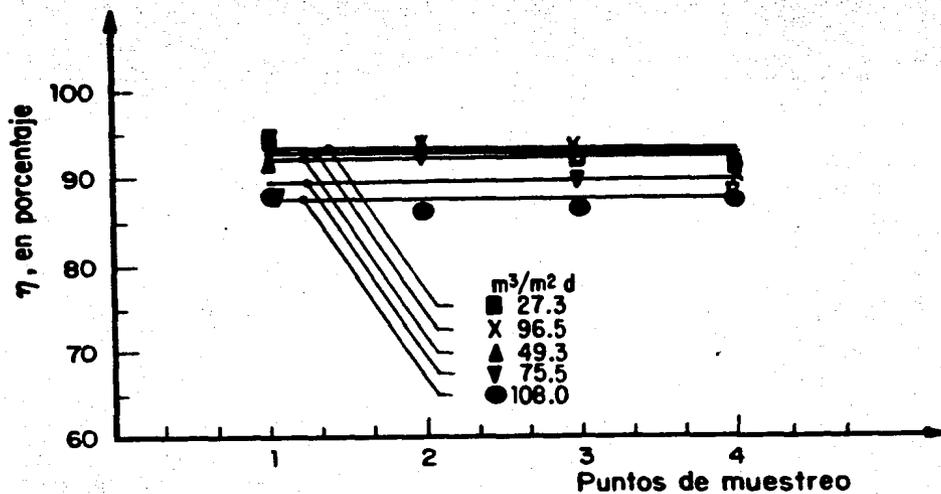


Figura 51. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de tubos cuadrados, cañaletas en posición baja.

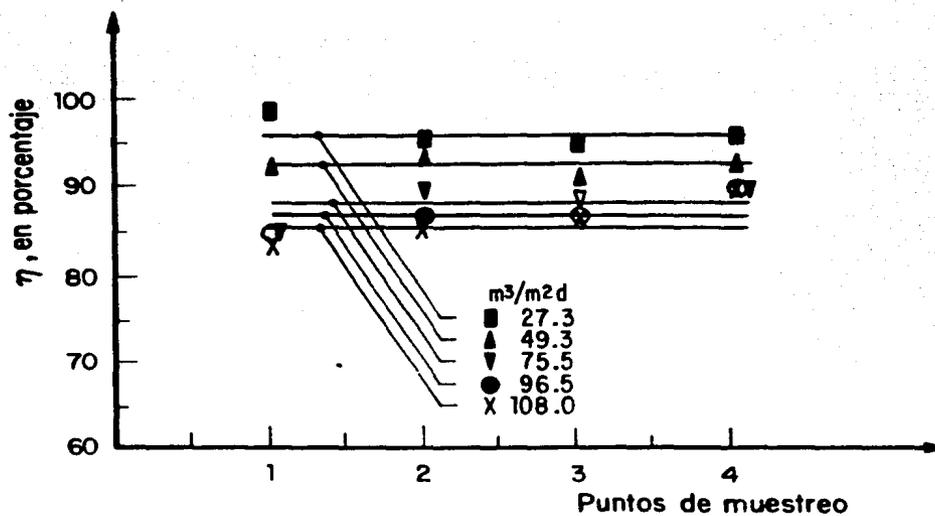


Figura 52. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de tubos cuadrados, cañaletas en posición alta.

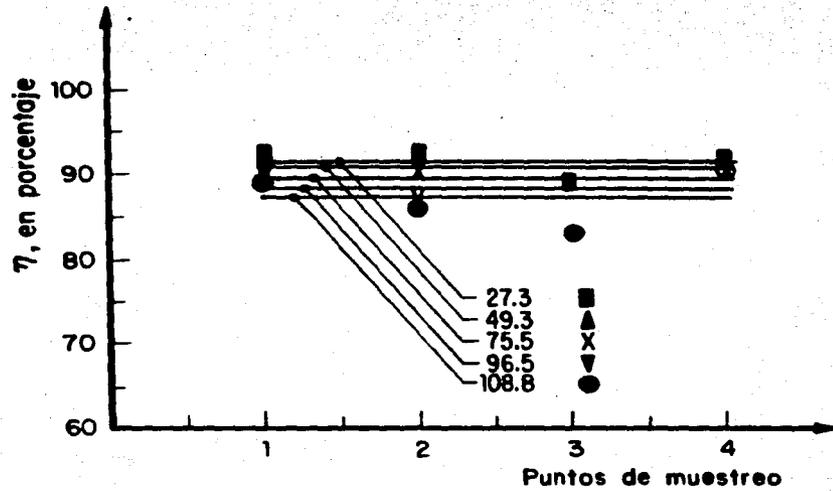


Figura 53. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de placas paralelas, cañetas en posición baja.

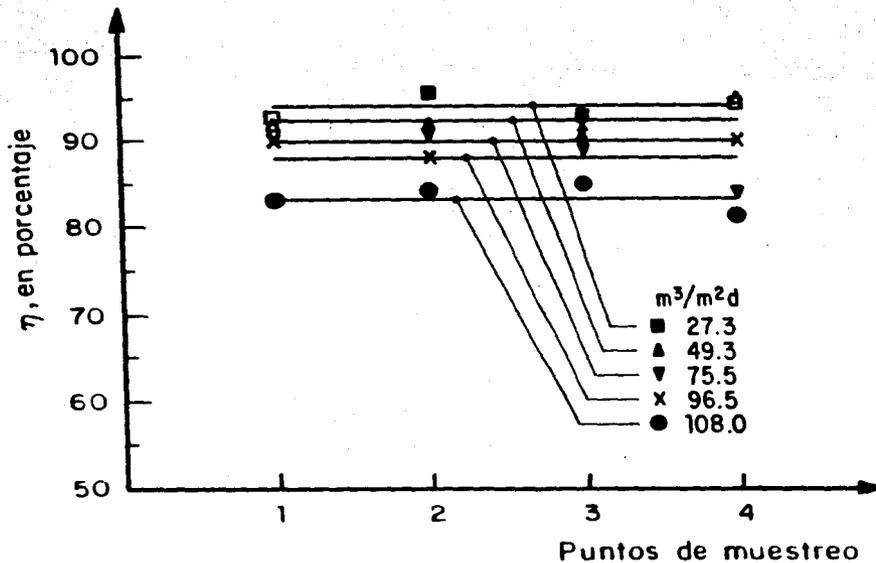


Figura 54. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Módulo de placas paralelas, cañetas en posición alta.

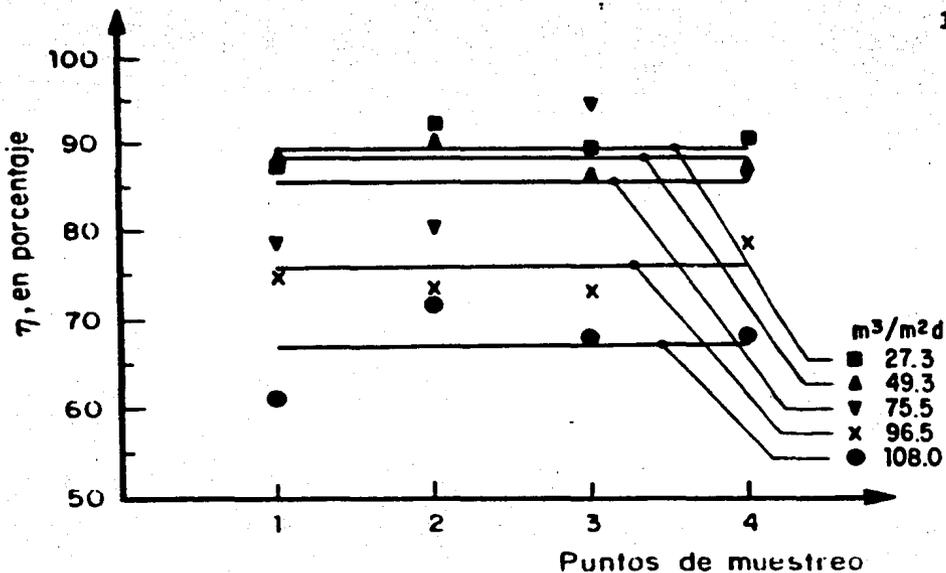


Figura 55. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Sin módulo de alta tasa.

De manera similar, para el módulo de placas paralelas se encontró uniformidad en la concentración de sólidos en la zona de recolección de agua clarificada (Figuras 53 y 54). El máximo coeficiente de variación entre los cuatro puntos fue de 4.3%, para la posición baja y 3.5% para la posición alta.

En la figura 55 se encuentran los resultados obtenidos al trabajar sin módulo de alta tasa. Se remarca que no existe la uniformidad encontrada en los casos anteriores (cuando se usó el módulo de alta tasa). Por el contrario, se obtuvo mayor dispersión de las eficiencias de sedimentación, en tal forma que el coeficiente de variación fue de 7.8%. Lo anterior indica que el módulo de alta tasa uniformiza la distribución de flujo y en consecuencia la de los sólidos dentro del sedimentador.

6.2.2 Influencia de coagulantes en la operación del sedimentador

Los resultados de estas pruebas se muestran graficados en la figura 56. Al igual que en el inciso anterior, al aumentar la carga hidráulica la eficiencia de remoción decrece; sin embargo, en éste caso la disminución en la remoción de sólidos suspendidos es mucho menos pronunciado ya que, por ejemplo, al aumentar 4 veces la carga hidráulica (de 25 a 100 $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{d}$), la eficiencia únicamente disminuye en 2% (de 97 a 95%).

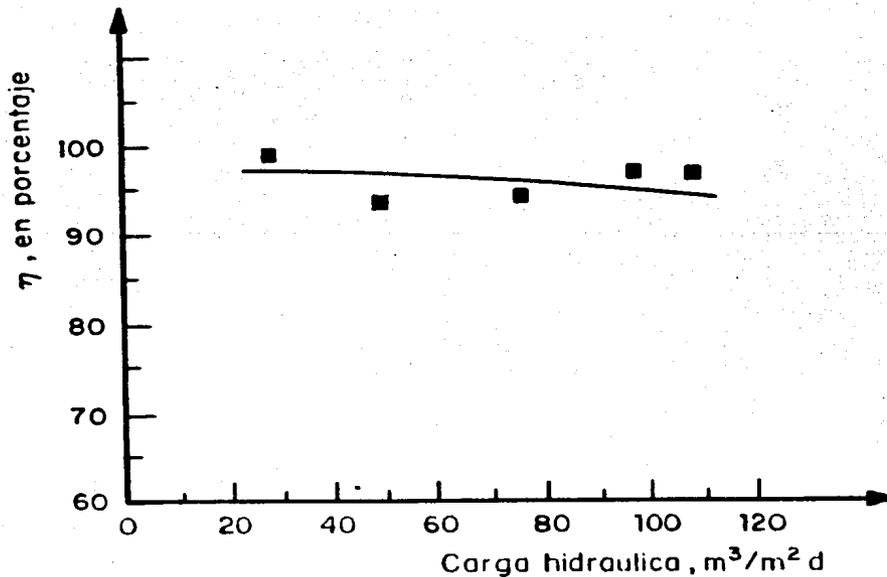


Figura 56. Influencia de coagulantes en la operación del sedimentador. Módulo de tubos cuadrados.

Diferencia que no puede ser considerada significativa. Esto se debe a que la adición de sulfato de aluminio ayuda a la aglomeración de los sólidos suspendidos más pequeños, ya que flocculan más fácilmente con lo que se remueve una mayor cantidad de sólidos suspendidos y en una forma más constante. Es interesante hacer notar que, al agregar el coagulante, la velocidad de sedimentación se incrementó en 56% con respecto a la determinada sin coagulante. De la misma manera, el índice volumétrico de lodos aumentó 37% al agregar coagulante.

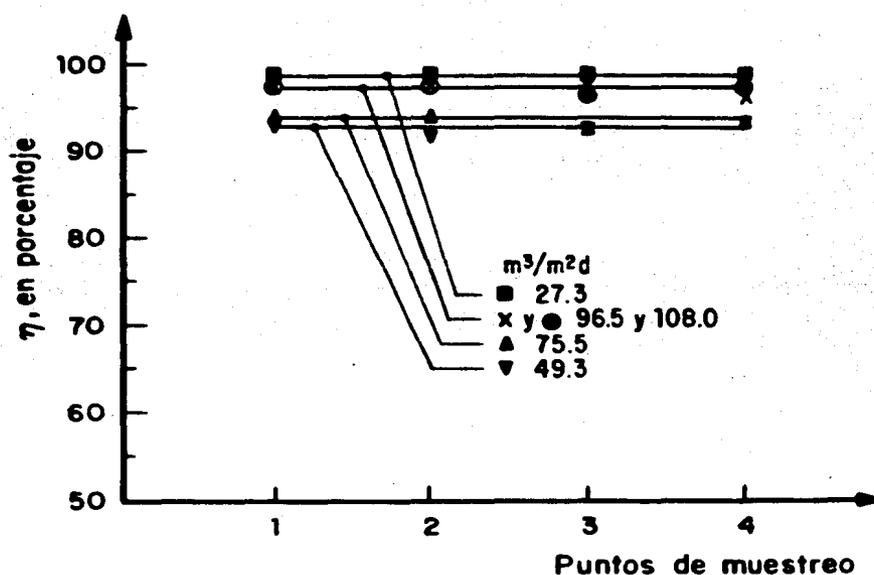


Figura 57. Eficiencias de remoción de sólidos en la zona de agua clarificada. Adición de sulfato de aluminio como coagulante.

Se puede observar en la figura 57 que existe una distribución

uniforme de sólidos en la parte superior del sedimentador, es decir en la zona de recolección de agua clarificada. El máximo coeficiente de variación para las eficiencias de remoción en una de las pruebas fue de 1.1% (Tabla 3.2, Anexo 3).

6.3 Evaluación del parámetro S para el sedimentador

Como se discutió en la sección 4.2.2.2, Yao (1979) propuso el parámetro S para caracterizar teóricamente el funcionamiento de un sedimentador de alta tasa. De esta forma cualquier partícula suspendida se removerá completamente si su valor de S es mayor o igual al valor de S_c para ese tipo de sistema. Con este fin se calcularon los valores de S para diferentes condiciones. Estos se resumen en la figura 58.

Los valores de S se obtuvieron a partir de la ecuación 23, con un ángulo de inclinación de 60° y una longitud relativa de 27.7 cm/5 cm. La velocidad de sedimentación v_s se calculó con base en las características de los lodos usados (Koopman y Cadee, 1982) y resultó de 80 m/d. Se varió la velocidad de flujo, v_o , para obtener diferentes valores de S (Tabla 3.7, Anexo 3).

De esta forma al usar el módulo de tubos cuadrados, teóricamente, se deben eliminar todas las partículas para cuando las condiciones de operación proporcionan un valor de S de $11/8 = (1.375)$.

La velocidad de flujo, v_0 , para $S = 11/8$ es de 212 m/d (figura 58) (carga hidráulica de $212 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$). De igual manera para placas paralelas ($S = 1$) la carga hidráulica límite es de $300 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. Se obtiene un resultado similar para el caso de placas paralelas, si se utiliza la figura 10 para calcular la carga hidráulica límite, esto es con $L = 5.54$ ($27.7/5$) resulta $v_{\Delta c}/v_0 = 0.28$. Ahora si $v_{\Delta c}$ se toma como 80 m/d, la carga hidráulica es $285 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

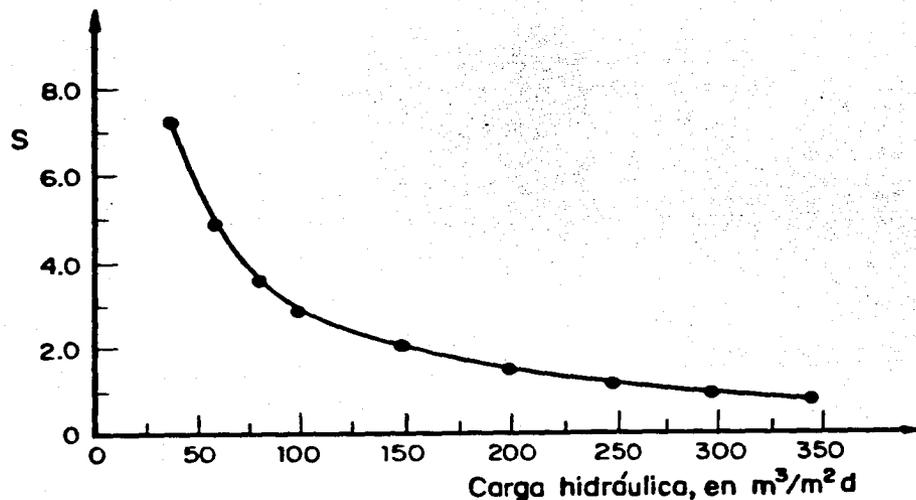


Figura 58. Valores de S en función de la velocidad de flujo

En la práctica, aunque no se trabajó con esas cargas hidráulicas, es de suponerse que las eficiencias de remoción sean bajas. Las diferencias encontradas entre la teoría y la práctica se deben a que Yao consideró en su desarrollo matemático,

condiciones ideales en el comportamiento de las partículas, esto es: flujo laminar y partículas no floculantes. En la práctica el sedimentador no operó idealmente ya que, existen regiones con alta turbulencia dentro del tanque y el comportamiento hidráulico tiende al reactor mezclado con zonas muertas (Jiménez et al, 1986). Además, el licor mezclado no se comporta como partículas discretas de tamaño y densidad uniformes.

6.4 Análisis general de los resultados

Como se discutió en el capítulo 4, el funcionamiento del sedimentador depende de las características hidráulicas del tanque. Así, es deseable que dentro de los sedimentadores exista flujo pistón para que cada elemento del fluido permanezca el tiempo necesario para que los sólidos decanten. De esta manera los fenómenos que determinan la eficiencia de un sedimentador son: las características del flujo y las características de los sólidos.

Jiménez et al, (1986) encontraron que el sedimentador no se comporta de una manera ideal (es decir, flujo pistón), sino que presenta algunas características de un tanque perfectamente mezclado, con zonas muertas (20%), y cortos circuitos (1%).

Estos resultados y el hecho de que los sólidos con los que se trabajaron (lodos activados) presenten baja densidad y una amplia distribución en peso y talla de las partículas -condiciones no tomadas en cuenta por estudio teórico hecho por Yao-, ayudan a explicar por que la teoría de Yao no se ajustó a lo encontrado.

Por otra parte, es indudable el hecho de que al usar el módulo de alta tasa se disminuye el tiempo de retención necesario (o si se prefiere, aumenta la carga hidráulica admitida) para remover un porcentaje dado de sólidos. En la figura 59 se comparan los resultados obtenidos al usar el sedimentador con módulo de alta tasa, sin módulo y al usar el módulo y coagulante (Tabla 3.4, Anexo 3). En este caso se tiene que las mejores eficiencias de remoción de sólidos, para las condiciones estudiadas, se obtienen en presencia del módulo de alta tasa y con adición de coagulante.

Es interesante mencionar que el área de sedimentación del tanque es de 0.824 m^2 sin módulos y que al introducir el módulo ésta se incrementa hasta 2.78 m^2 , lo que favorece la remoción de sólidos suspendidos.

Existen en la literatura criterios de diseño para sedimentadores secundarios que operan en plantas que funcionan por el proceso de lodos activados, así por ejemplo el IWPC* (1973)

* IWPC: Institute of Water Pollution Control

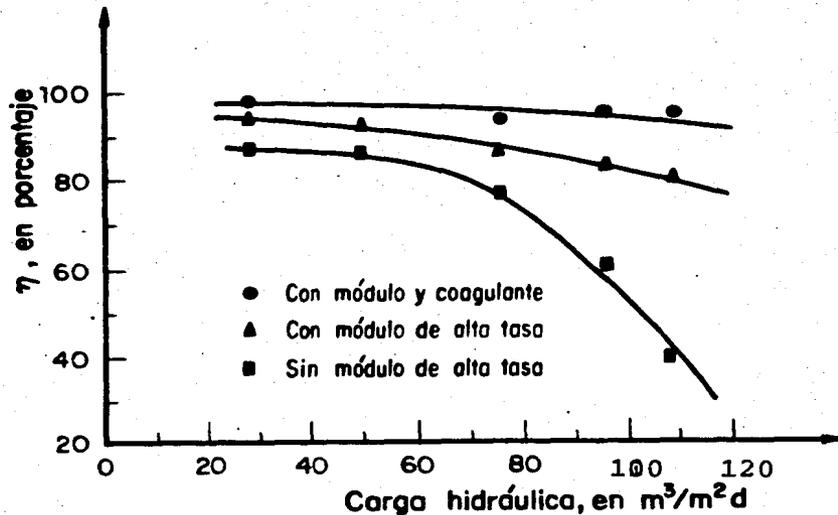


Figura 59. Funcionamiento del sedimentador bajo diferentes condiciones de operación.

recomienda una carga hidráulica máxima de $24 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ y un tiempo máximo de retención de 1.5 h, para un buen funcionamiento del sedimentador, de manera análoga la EPA⁺ (1975) recomienda, con los mismos propósitos, una carga hidráulica entre 16 y $32 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ y cargas máxicas entre 90 y $145 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. Como se puede observar las cargas hidráulicas utilizadas en

+ EPA: United States Environmental Protection Agency

el presente estudio fueron de hasta $108 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, con una eficiencia de remoción de sólidos de 83%. Esto indica que se puede aumentar hasta 4 veces la carga hidráulica recomendada en la literatura al usar el módulo de alta tasa con buenas eficiencias de remoción.

Otra manera de comparar el funcionamiento del sedimentador es la siguiente: la concentración de sólidos suspendidos totales admisibles en el efluente de un sedimentador secundario está en función del medio receptor. Si se toma, por ejemplo, lo establecido por la Dirección General de Uso del Agua y Prevención de la Contaminación de la S.A.R.H., (1975) el contenido de sólidos suspendidos totales en el efluente de un sedimentador secundario debe ser de 50 mg/l . Así, de acuerdo con la concentración promedio del influente, se establece que la eficiencia de remoción deseada es de alrededor de 90%.

Al analizar la figura 59 se observa que para una eficiencia de remoción de sólidos del 90%, se puede aplicar una carga hidráulica hasta de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ al usar el módulo de alta tasa, mientras que sin el módulo se obtienen estas eficiencias con cargas hidráulicas inferiores a $20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$.

Por otra parte, la adición de coagulantes permite operar el sedimentador con cargas hidráulicas de hasta $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ (valores extrapolados), y obtener la misma eficiencia.

Con estos resultados se puede afirmar que un sedimentador equipado con un módulo de alta tasa opera con una carga hidráulica de tres y media veces más que uno sin módulo. Esta relación aumenta hasta siete veces si además se agrega un coagulante a los lodos.

Para estudiar la influencia del gasto de purga en la remoción de sólidos se efectuaron pruebas bajo las mismas condiciones, pero a dos gastos de purga diferentes (25 y 40%). Los resultados de estas pruebas se encuentran en la Tabla 3.1, Anexo 3 (Estudios con adición de coagulante). Como se puede observar, el aumento de 15% en la purga, con la consiguiente disminución de la altura de la cama de lodos prácticamente no influye en la remoción de sólidos.

El funcionamiento de sedimentador no se ve afectado significativamente por el tipo de módulo empleado. En cambio, el costo de fabricación del módulo de tubos cuadrados es alrededor de tres veces mayor que el de placas paralelas, debido a lo complicado de su manufactura. Por lo anterior es recomendable el uso de un módulo de placas paralelas.

Para finalizar es interesante señalar que la posición del módulo dentro del tanque no resultó un factor relevante; sin embargo, se recomienda la posición alta para aumentar la trayectoria que deban recorrer las partículas.

7. INFLUENCIA DEL ANGULO DE INCLINACION EN LA EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS

7.1 *Desarrollo experimental*

Puesto que, al parecer no existen en la literatura especificaciones precisas de diseño para efluentes secundarios biológicos, se realizaron los presentes estudios con objeto de determinar el ángulo de inclinación óptimo para la remoción de sólidos suspendidos. Para ello se usaron efluentes provenientes de tres sistemas de tratamiento de aguas residuales a saber: lodos activados, biodisco y filtro percolador.

El equipo utilizado para tales estudios fue un tubo circular de 3.8 cm de diámetro y 50.0 cm de longitud. La suspensión se pasó del tanque receptor -que se encontraba perfectamente agitado-, al tubo mediante una bomba dosificadora. El gasto ali-

mentado se controló mediante una válvula y se midió volumétricamente a la salida del tubo (figura 60).

Se llevaron a cabo tres conjuntos de corridas, esto es, un conjunto para cada tipo de efluente. El ángulo de inclinación se varió, con respecto a la horizontal, de 10 a 80°. Se traba

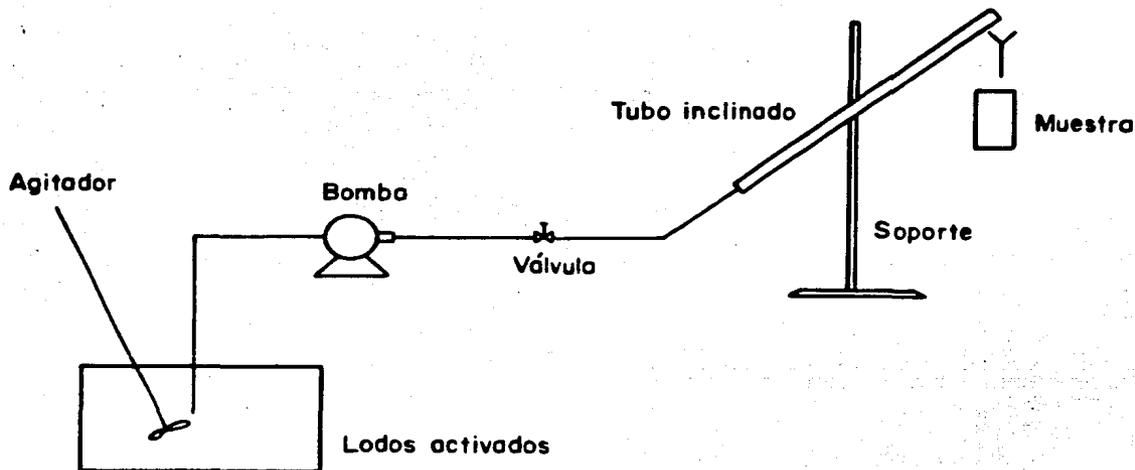


Figura 60. Equipo utilizado para determinar la influencia del ángulo de inclinación.

jó con una carga hidráulica de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. Para cada corrida se midió la turbidez del influente mediante un nefelómetro Turner. Después de haber transcurrido tres veces el tiempo teórico de retención (31 minutos) se tomó una muestra del

efluente y se midió la turbidez. En la Tabla 11 se encuentran resumidas las condiciones de operación.

TABLA 11. CONDICIONES DE OPERACION UTILIZADAS EN EL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ANGULO DE INCLINACION

Carga Hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$	Angulos de inclinación (grados)		
	Lodos Activados	Biodisco	Filtro Percolador
70	10	10	10
70	20	20	20
70	30	30	30
70	40	40	40
70	45		
70	50	50	50
70	55		
70	60	60	60
70	70	70	70
70	80	80	80

7.2 Resultados y análisis de los resultados

Los resultados de estos estudios se presentan en el Anexo 4, Tabla 4.1. Se calculó para cada caso la eficiencia de remoción mediante la ecuación 62* y los resultados se presentan en las figuras 61, 62 y 63 (Tabla 4.2, Anexo 4).

* Sólo que para este caso se usó turbidez en lugar de concentraciones.

La figura 61 representa la variación de la remoción de sólidos en función del ángulo de inclinación para cuando se usaron lodos activados como material sedimentable. Se observa que para ángulos de inclinación bajos (hasta 20°), la remoción de turbidez es prácticamente constante y alrededor de 90%. Al inclinarse más el tubo, la calidad del efluente mejora, ya que aumenta la eficiencia de remoción. Se encuentra un máximo alrededor de los 45° , donde se remueve hasta el 95% de la turbidez, después de lo cual la eficiencia comienza a disminuir.

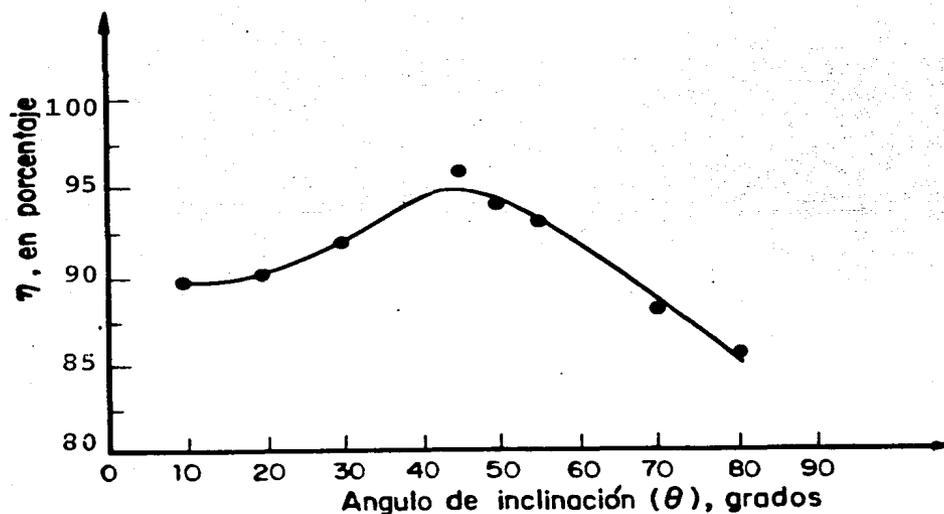


Figura 61. Influencia del ángulo de inclinación en la remoción de turbidez. Lodos activados.

Lo anterior indica que el mejor ángulo de inclinación, se encuentra a los 45° , además de que a este ángulo los lodos res-

balan fácilmente hacia el fondo del tubo (Culp et al, 1968).

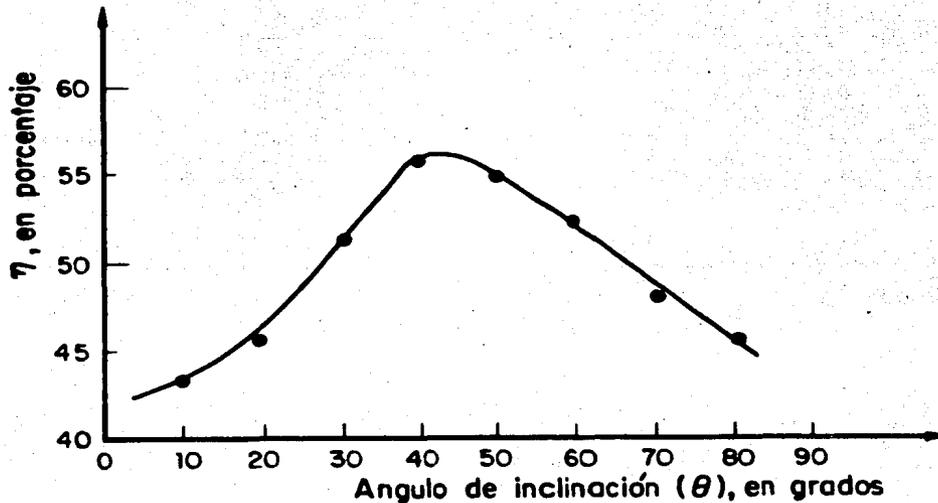


Figura 62. Influencia del ángulo de inclinación en la remoción de turbidez. Lodos provenientes de biodisco.

La figura 62 muestra los resultados para lodos provenientes del sistema de biodisco. Al igual que en el caso anterior, en ángulos de inclinación pequeños se obtienen eficiencias de remoción bajas y a medida que aumenta la inclinación ésta mejora. El máximo se obtiene aproximadamente a los 42° (56% de remoción). Después, la eficiencia de remoción comienza a disminuir.

Los resultados del análisis de lodos de filtro percolador muestran que, también en este caso, se obtiene una curva en forma de campana con un máximo de remoción a los 35° (54% de eficiencia). Esto se puede observar en la figura 63.

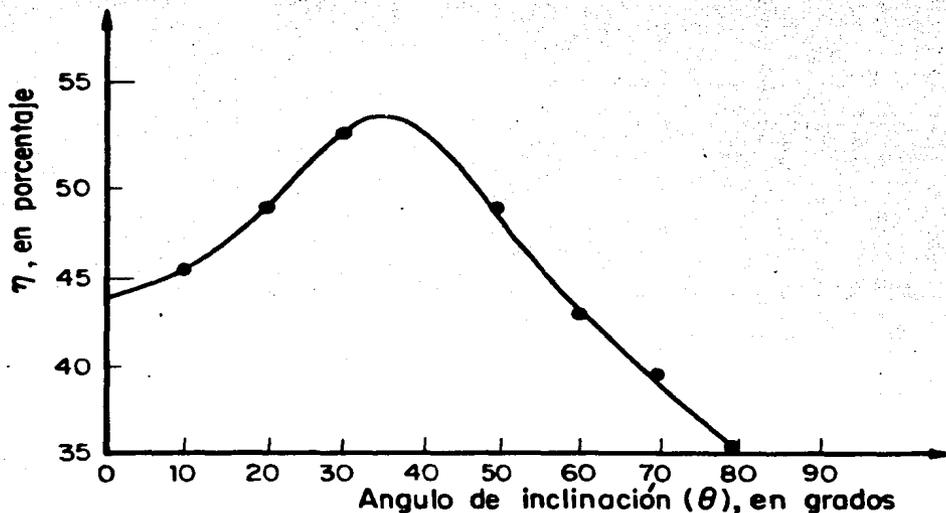


Figura 63. Influencia del ángulo de inclinación en la remoción de turbidez. Lodos provenientes de filtro percolador.

Como se observó en las figuras 61, 62 y 63 para los tres sistemas se obtienen curvas similares al variar el ángulo de inclinación. Sólo que para los sólidos provenientes del sistema de

lodos activados la variación de la eficiencia de remoción con respecto al ángulo de inclinación no es tan marcada como en los otros dos casos. Lo anterior se pudo deber a que la turbidez en los lodos activados fué mucho mayor que la de los otros sistemas, esto es: lodos activados tuvo alrededor de 65 UTN, biodisco 12 UTN y filtro percolador 15 UTN. Esto favorece que al haber una mayor cantidad de sólidos sedimentables floculen y sean más fácilmente removidos.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Estudios preliminares

Los estudios preliminares de sedimentación permitieron determinar la trayectoria de los flóculos dentro del tanque sedimentador, así como del módulo de alta tasa.

Estudios de campo

Se obtuvieron las siguientes conclusiones en cuanto a la operación del sedimentador:

- La eficiencia de remoción de sólidos, en el sedimentador, decrece a medida que aumenta la carga hidráulica aplicada.
- Las eficiencias de remoción para las cargas hidráulicas

aplicadas (27 a 108 m³/m².d) fueron de: 95 a 85% al usar el módulo de tubos cuadrados y de 95 a 81% al usar el módulo de placas paralelas.

- Las eficiencias de remoción de sólidos decrecen drásticamente (de 88 a 42%) al aumentar la carga hidráulica (27-108 m³/m².d), cuando el sedimentador funcionó sin módulo de alta tasa.
- El uso de sulfato de aluminio como coagulante produce que la eficiencia de remoción de sólidos permanezca prácticamente constante (99 a 95%) al aumentar la carga hidráulica (27 a 108 m³/m².d).
- El módulo de alta tasa favorece una distribución uniforme de los sólidos suspendidos en la zona de recolección de agua clarificada. Esta uniformidad en la distribución aumenta al usar sulfato de aluminio como coagulante.
- El aumento de la carga másica (debido al aumento de carga hidráulica) produce que la eficiencia de remoción de sólidos decrezca.
- El gasto de purga adecuado, para las condiciones estudiadas, se sitúa entre 20 y 25% del gasto del influente.

Por otro lado, en cuanto a diseño se concluye lo siguiente:

- La introducción del módulo de alta tasa, al sedimentador, aumenta el área de sedimentación.
- El uso del módulo de alta tasa permite disminuir el tiempo de retención necesario para remover un porcentaje dado de sólidos.
- El módulo de tubos cuadrados es ligeramente más eficiente que el de placas paralelas; a pesar de ello se recomienda el módulo de placas debido a el costo de fabricación.
- No existen diferencias significativas entre las posiciones alta y baja de las canaletas; sin embargo, se recomienda el uso de la posición alta debido a las mejores características hidráulicas.

Por último, las conclusiones respecto a la teoría son las siguientes:

- El uso del módulo de alta tasa permite aumentar de 3.5 a 4 veces la carga hidráulica recomendada en la literatura (EPA, IWPC, SARH) para sedimentadores secundarios convencionales que operan con lodos activados.

- La teoría expuesta por Yao para sedimentadores ideales, no es satisfactoria al aplicarla a los resultados obtenidos en los experimentos debido a que se trabajó bajo condiciones no ideales.

De esta forma, con base en los resultados obtenidos se recomienda la operación del sedimentador bajo las condiciones siguientes:

- Entrada: de tipo cuadrada con introducción sumergida de lodos.
- Módulo: de placas paralelas colocado en la primera tercera parte del sedimentador;

Y específicamente, para efluentes de tratamiento por el proceso de lodos activados:

- Carga hidráulica: $70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, para 90% de remoción, de sólidos (si se quiere aumentar la carga hidráulica o la eficiencia de remoción, se recomienda el uso de sulfato de aluminio como coagulante. Si se usa coagulante se recomienda una carga hidráulica de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, y;
- Gasto de purga: 25% del gasto de influente (para cargas máxicas de 15 a $100 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$).

Por último, se observa que existe variación de la eficiencia de remoción de turbidez al variar el ángulo de inclinación del sedimentador y además, que esta variación es característica del tipo de efluente (lodos activados, biodisco o filtro percolador).

La máxima remoción de turbidez en el efluente se encuentra al trabajar el sedimentador con ángulos de inclinación de 35 a 45° (35° para filtro percolador, 42° biodisco y 45° para lodos activados).

9. BIBLIOGRAFIA

1. Blaine, Severin, Poduska, R., (1986), "Floculant settling dynamics under constant load", J. of the Env. Eng. Div. Vol. 112, No. 1, p. 171.
2. Bramer, H.C., Hoak, (1966), "Measuring sedimentation flocculation efficiencies", Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. Vol. 5, pp. 316.
3. Bergman, B. S., (1985), "An improved circular sedimentation Design". Journal and Proceedings, Inst. of Sewage Purification, South African Branch, Part. 1. pp. 50-67.
4. Bond, A.W. (1960), "Behavior of Suspensions". J. San. Eng. Div. Vol. 86, No. SA3, pp. 57-85.

5. Camp, T.R. (1936), "On grit chamber model test", Transactions ASCE, Vol. 101, p. 344.
6. Camp, T.R. (1945), "Sedimentation and the Design of Settling Tanks", Transactions ASCE. Vol. 3, No. 2285, pp. 445-486.
7. Culp, L.G., Hansen, S., (1967), "Applying shallow depth sedimentation theory", J.A.W.W.A., Vol. 59, pp. 1135-1148.
8. Culp, G., Hansen S. y Richardson G. (1968), "High-Rate Sedimentation in water treatment works", Journal AWWA, Vol. 60, pp. 681-698.
9. Culp, G., Kou-Ying Hsiung y Conley W. (1969), "Tube clarification process, operation experiences", Journal of the Sanitary Engineering Division, Vol. 95, No. SA5, pp. 829-846.
10. Degrémont (1979), "Manual Técnico del Agua", 4a. ed., Bilbao, Cap. 7, pp. 159-188.
11. Di Bernardo, Luiz, (1987), Comunicación directa.

12. Dick, R., Ewing B. (1967), "Evaluation of activated sludge thickening theories". J. San. Eng. Div., Vol. 93, No. SA4, pp. 9-29.
13. Ekama, G.A., Marais, R., (1986), "Sludge settleability and Secondary Settling Tank design Procedures". Water Pollution Control, Vol. 85, parte 1, No. 101.
14. Entat Marcel, "Décantation, séparation". Techniques de l'Ingénieur, Service Commercial, 18 Place de l'Odéon 7506, Paris.
15. Feuerstein, D., Selleck, R., (1963), "Fluorescent tracers for dispersion measurements". J. San. Eng. Div. Vo. 89, No. SA4, pp. 1-21.
16. Fischerström, C., Isgård, E., Larsen, I., (1967), "Settling of Activated sludge in horizontal tanks", J. San. Eng. Div., Vol. 93, No. SA3, pp. 73-83.
17. Fitch, Bryan (1966), "Current theory and thickner design". Ind. Eng. Chem. Vol. 58, No. 10, pp. 18-28.
18. Hansen, S.P. y Culp G. (1967). "Applying Shallow depth Sedimentation Theory", Journal AWWA, Vol. 59, pp. 1134-1148.

19. Hazen, A. (1904), "On Sedimentation", Transactions ASCE, Vol. 53, pp. 45-71.
20. Ingersoll, A.C. Mc Kee J.E., Brooks, N.H., (1955), "Fundamental concepts of rectangular settling tanks", Proceedings, ASCE., Vol. 81, No. 590, pp. 1-28.
21. Institute of Water Pollution Control (1973), "A guide to the design of Sewage purification works", IWPC, P.O. Box 81249, Parkhurst 2120.
22. Jiménez C.B., Espinoza A.J., Buitrón M.G., Trujillo M.J. D., "Fabricación y pruebas en un modelo físico de un sedimentador hidráulico de lodos" (Informe final del proyecto 5311). Elaborado para la SARH por el Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre de 1986. pp. 197.
23. Koopman, B. y Cadee, K. (1983), "Prediction of thickening Capacity using diluted sludge volume index", Water Research, Vol. 17, pp. 1427-1431.
24. Levenspiel O. (1972), "Chemical Reaction Engineering", Ed. John Wiley and Sons, USA.

25. Márquez Buitrón J. Miguel. "Diseño de una planta para tratamiento de aguas negras", Tesis, ESIME, IPN, México 1985.
26. Metcalf and Eddy (1979), Inc. "Wastewater engineering", Treatment, Disposal & Reuse, 2a. ed., Ed. Mc Graw-Hill, USA.
27. Mau, G.E. (1959), "A study of Vertical-slatted inlet Baffles". Sewage and Industrial wastes, Vol. 31, No. 12, pp. 1349.
28. Pineault, G. y Cloutier, L. (1972), "Fonction de transfert d'un réservoir agité en systeme continu: I. Détermination a l'aide d'un traceur fluorescent", Canadian Journal of Chem. Eng., Vol. 50, pp. 736-742.
29. Pineault, G. y Cloutier, L. (1973), "Fonctin de transfert d'un réservoir agité en systeme continu: II. Variation des constant de temps avecet sans differenie de densité initiale", Canadian Journal of Chem. Eng., Vol. 51, pp. 55-59.
30. Pürschell, W. (1982), "El tratamiento de las aguas residua les domésticas", Tratado general del agua y su distribución. Técnicas de depuración, Tomo 6, Ed. Urmo, España.

31. Rebhun, M., Argaman, Y. (1965), "Evaluation of hydraulic efficiency of sedimentation basin", J. San. Eng. Div., ASCE, Vol. 91, No. SA5, pp. 37-45.
32. Reynolds, T. (1982), "Unit Operations and processes in environmental engineering", Wadsworth, Inc., Belmont, California, pp. 69-129.
33. Rich L.G. (1961), "Unit Operations in Sanitary Engineering", John Willey, New York, pp. 81-109.
34. Ríos, Ch. Enrique y Fernández Z.J. Luis., "Diseño de un modelo físico de un sistema sedimentador con extracción hidráulica de lodos", Informe del proyecto 3336. Elaborado para la SARH por el Instituto de Ingeniería, UNAM. 100 pp, septiembre 1984.
35. Roustan, M. (1982), Apuntes del curso "Modeles d'écoulement hydraulique dans les réacteurs". INSA-Toulouse, Francia.
36. Roy, P. y Choquette P. (1974), "The Gaussian Distribution of $\theta^{1/3}$ - A two Parameter Statistical Model for approximating. RTD's in CSTR's", Canadian Journal of Chem. Eng., Vol. 52, pp. 492-495.

37. Streeter, U.L. y Wylie, E.B. (1979), "Mecánica de los Fluidos", 6a. ed., Ed. McGraw-Hill, México.
38. Talmage, W. y Fitch B. (1955), "Determining thickener unit areas", Ind. Eng. Chem., Vol. 47, No. 1, pp. 38-41.
39. Tekippe, R. y Cleasby J. (1968), "Model studies of a peripheral feed settling tank", Journal Sanitary Engineering Division, Vol. 94, No. SA1, pp. 85-102.
40. "Techniques et économie de l'épuration des eaux résiduaires", Ministère de l'environnement et du cadre de vie. Cahiers techniques de la Direction de la Prévention des Pollutions, No. 2, Paris.
41. United States Environmental Protection Agency, (1975). "Process design manual for suspended solids removal, EPA 62511-75-003a, Office of Technology transfer, USEPA, Washington, D.C.
42. Verhoff, F.H. (1979), "Optimal design of high-rate sedimentation devices", Journal of the environmental engineering division, Vol. 105, No. EE2, pp. 199-215.

43. Vo Van Bang y Cholette, A. (1973), "Comparaison du modèle des reservoirs imparfaitement agités en série avec le modele de dispersion axiale", Canadian Journal of Chem. Eng., Vol. 51, pp. 149-155.
44. Yao, K.M. (1970), "Theoretical study of High-Rate Sedimentation", Journal Water Pollution Control Federation, Vol. 42,, No. 2, Part. 1, pp. 218-228.
45. Yao, K.M. (1973), "Design of High-Rate Settlers", Journal of the Environmental Engineering Division, Vol. 99, No. EE5, pp. 621-637.
46. Yee, L., Babb, A. (1985), "Inlet design for rectangular settling tanks by physical modeling", J.W.P.C.F. Vol. 57, No. 12, pp. 1168-1177.

ANEXOS

ANEXO 1. OBTENCION DE LA ECUACION DEL MODELO DE YAO PARA
FLUJO LAMINAR EN UN TUBO CIRCULAR

A continuación se describe el desarrollo de la ecuación 16 del capítulo 4.

La ecuación que describe la velocidad puntual para flujo laminar en tubos circulares se expresa como (Streeter, 1979):

$$\frac{u}{v_0} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

donde

r_1 : radio del tubo

r : distancia del centro al punto donde se calcula la velocidad puntual.

Para llegar a la ecuación 16 se tiene que efectuar un cambio de coordenadas como se indica en la figura 1.1.

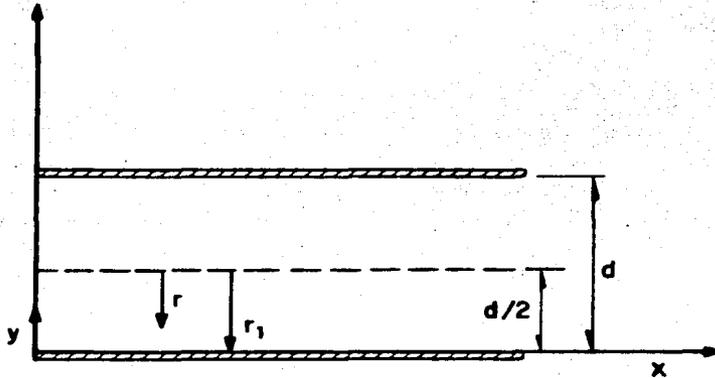


Figura 1.1. Sistema de coordenadas para la obtención de la ecuación 16 del modelo de Yao.

Se observa de la figura 1.1 que

$$r_1 = d/2 \quad y \quad (1.2)$$

$$r = d/2 - y \quad (1.3)$$

al sustituir las ecuaciones 1.2 y 1.3 en la 1.1 se obtiene:

$$\frac{u}{v_0} = 2 \left[1 - \left(\frac{d/2 - y}{d/2} \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

$$\frac{u}{v_0} = 2 \left[1 - \frac{[(d/2)^2 - dy + y^2]}{(d/2)^2} \right] \quad (1.5)$$

$$\frac{u}{v_0} = 8 \left[\frac{y}{d} - \left(\frac{y}{d} \right)^2 \right] \quad (1.6)$$

La ecuación 1.6 es igual a la 1.4, ya que $y = y/d$.

ANEXO 2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

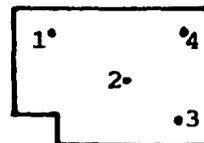
TABLA 2.1. RESULTADOS PARA LOS ENSAYOS CON EL MODULO DE TUBOS CUADRADOS Y LAS CANALETAS EN POSICION BAJA

Q_i l/s	Q_p l/s	CONCENTRACIONES					
		Influente mg/l	Efluente mg/l	1 mg/l	2 mg/l	3 mg/l	4 mg/l
0.26	0.05	573	30	83	20	27	23
0.26	0.05	620	43	13	33	70	93
0.26	0.05	700	--	22	74	58	52
Promedio		597	37	39	42	51	56
0.47	0.09	700	--	40	36	--	30
0.47	0.09	687	34	28	28	64	64
0.47	0.09	587	32	74	70	48	84
Promedio		637	33	47	45	56	59
0.72	0.18	703	66	80	78	90	112
0.72	0.18	647	--	68	42	52	86
0.72	0.18	567	70	62	36	68	46
Promedio		639	68	70	52	70	81
0.92	0.23	710	70	22	26	76	48
0.92	0.23	687	38	40	22	28	26
0.92	0.23	613	80	46	86	34	112
Promedio		670	63	36	45	46	62
1.03	0.25	600	86	112	40	100	104
1.03	0.25	637	74	34	100	66	38
1.03	0.25	500	86	--	94	82	120
Promedio		579	82	73	78	83	94

Q_i : gasto de influente

Q_p : gasto de purga

1, 2, 3 y 4: puntos de muestreo

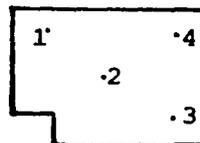


Puntos de muestreo en la superficie del sedimentador

TABLA 2.2. RESULTADOS PARA LOS ENSAYOS EN EL MODULO DE TUBOS CUADRADOS Y LAS CANALETAS EN POSICION ALTA.

Q_i l/s	Q_p l/s	CONCENTRACIONES					
		Influente mg/l	Efluente mg/l	1 mg/l	2 mg/l	3 mg/l	4 mg/l
0.27	0.06	577	17	12	17	23	12
0.27	0.06	576	7	6	6	12	36
0.26	0.06	563	36	17	36	50	17
Promedio		572	20	12	20	28	22
0.47	0.09	657	30	67	33	83	77
0.47	0.09	666	17	17	10	20	23
0.47	0.09	660	20	40	50	80	33
Promedio		661	22	41	31	61	44
0.72	0.17	470	53	50	65	75	--
0.72	0.16	500	47	100	30	45	--
0.72	0.16	450	48	--	40	--	--
Promedio		473	49	75	45	60	--
0.92	0.18	513	70	30	20	90	--
0.92	0.18	536	70	70	176	97	70
0.92	0.18	525	64	87	33	50	33
Promedio		525	68	62	76	79	52
1.03	0.2	583	100	103	80	80	53
1.03	0.2	600	83	63	80	76	50
1.03	0.2	620	103	83	100	63	66
Promedio		601	95	83	87	73	56

Q_i : gasto de influente
 Q_p : gasto de purga
 1, 2, 3 y 4 : puntos de muestreo

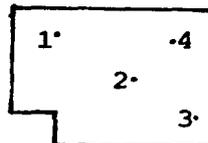


Puntos de muestreo en la superficie del sedimentador

TABLA 2.3. RESULTADOS PARA LOS ENSAYOS CON MODULO DE PLACAS PARALELAS Y LAS CANALETAS EN POSICION BAJA.

Q_i l/s	Q_p l/s	CONCENTRACIONES					
		Influyente mg/l	Efluente mg/l	1 mg/l	2 mg/l	3 mg/l	4 mg/l
0.26	0.05	652	26	44	40	40	34
0.26	0.05	660	26	38	42	70	54
0.26	0.05	684	44	68	84	104	92
Promedio		665	32	50	55	71	60
0.47	0.09	776	57	100	64	56	76
0.47	0.09	736	28	29	23	71	54
0.47	0.09	646	63	63	43	90	60
Promedio		719	49	64	43	72	63
0.72	0.18	690	56	56	100	64	44
0.72	0.18	692	150	44	52	68	100
0.72	0.18	668	112	106	60	120	72
Promedio		683	105	69	71	84	72
0.92	0.23	672	240	348	80	148	144
0.92	0.23	712	64	30	120	76	30
0.92	0.23	680	156	36	76	128	92
Promedio		688	110	138	92	117	89
1.03	0.25	556	126	44	88	56	32
1.03	0.25	640	--	120	92	152	36
1.03	0.25	660	64	32	88	64	56
Promedio		619	95	65	89	91	41

Q_i : gasto de influente
 Q_p : gasto de purga
 1, 2, 3 y 4: puntos de muestreo



Puntos de muestreo en la superficie del sedimentador

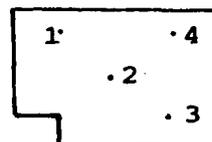
TABLA 2.4. RESULTADOS PARA LOS ENSAYOS CON EL MODULO DE PLACAS PARALELAS Y LAS CANALETAS EN POSICION ALTA.

Q_i l/s	Q_p l/s	CONCENTRACIONES					
		Influyente mg/l	Efluente mg/l	1 mg/l	2 mg/l	3 mg/l	4 mg/l
0.26	0.05	700	60	56	51	74	49
0.26	0.05	864	31	60	16	43	43
0.26	0.05	1020	54	51	44	48	51
Promedio		861	48	56	37	55	48
0.47	0.09	668	94	83	63	77	46
0.47	0.09	945	58	58	28	40	26
0.47	0.09	952	36	40	100	16	--
Promedio		855	63	60	63	44	36
0.72	0.18	816	80	86	105	83	80
0.72	0.18	884	114	83	105	66	91
0.72	0.18	820	114	74	100	63	94
Promedio		840	103	81	103	71	88
0.92	0.23	908	83	73	68	77	80
0.92	0.23	924	100	84	81	118	96
0.92	0.23	--	126	69	54	177	174
Promedio		916	103	75	67	124	116
1.03	0.25	704	200	116	132	104	168
1.03	0.25	756	150	88	127	97	112
1.03	0.25	680	116	160	90	108	96
Promedio		713	155	121	116	103	125

Q_i : gasto de influente

Q_p : gasto de purga

1, 2, 3 y 4: puntos de muestreo

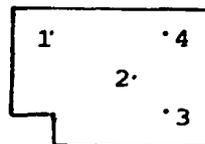


Puntos de muestreo en la superficie del sedimentador

TABLA 2.5. RESULTADOS PARA LOS ENSAYOS SIN MODULO Y LAS CANALLETAS EN POSICION BAJA.

Q_i l/s	Q_p l/s	CONCENTRACIONES					
		Influente mg/l	Efluente mg/l	1 mg/l	2 mg/l	3 mg/l	4 mg/l
0.26	0.05	503	48	32	28	50	46
0.26	0.05	546	90	78	48	70	72
0.26	0.05	603	58	90	28	44	30
Promedio		551	65	67	35	55	49
0.47	0.09	557	66	64	38	48	--
0.47	0.09	560	78	68	62	68	60
0.47	0.09	600	72	66	51	72	70
Promedio		572	72	66	51	72	70
0.72	0.18	608	78	82	69	15	80
0.72	0.18	616	126	137	83	49	97
0.72	0.18	500	150	140	160	--	57
Promedio		575	121	120	104	32	78
0.92	0.23	640	192	124	148	176	60
0.92	0.23	584	324	184	172	148	196
0.92	0.23	--	--	128	56	52	20
Promedio		612	258	145	125	125	92
1.03	0.25	512	188	100	98	80	216
1.03	0.25	536	388	--	208	196	--
1.03	0.25	548	352	316	112	228	--
Promedio		532	309	208	139	168	216

Q_i : gasto de influente
 Q_p : gasto de purga
 1, 2, 3 y 4: puntos de muestreo



Puntos de muestreo en la superficie del sedimentador

TABLA 2.6. RESULTADOS PARA LOS ENSAYOS CON EL MODULO DE TUBOS CUADRADOS Y LAS CANALETAS EN POSICION ALTA

Coagulante: Sulfato de aluminio (solución: 20.6 g/l)

pH en el tanque: 7.23

CONCENTRACIONES									
Q_i l/s	Q_p l/s	Q_c ml/s	C_c mg/l	Inf. mg/l	Ef. 1 mg/l		2 mg/l	3 mg/l	4 mg/l
0.26	0.05	0.50	40	800	8	6	8	10	7
0.47	0.09	0.91	40	832	64	56	64	62	48
0.72	0.28	1.40	40	800	44	46	44	64	48
0.72	0.18	1.40	40	850	40	62	56	56	58
0.92	0.37	1.79	40	780	18	14	12	12	18
1.03	0.25	2.0	40	820	20	12	22	20	18
1.03	0.41	2.00	40	848	14	--	18	20	18

Q_i : gasto influente

Q_p : gasto efluente

Q_c : gasto coagulante

C_c : concentración de coagulante en el tanque

Inf.: influente

Ef.: efluente

ANEXO 3. OPERACION DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

TABLA 3.1. EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS

Carga Hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$	% de Purga	% DE REMOCION DE SOLIDOS			
		Módulo de tubos cuadrados		Módulo de placas paralelas	
		Posición de las canaletas:		Posición de las canaletas:	
		Baja	Alta	Baja	Alta
27.3	20	93.8	96.5	95.2	94.4
49.3	20	94.8	96.6	93.2	92.6
75.5	25	90.6	89.6	84.6	87.7
96.5	25	88.6	87.0	84.0	87.0
108.0	25	85.8	84.1	83.5	78.3

NOTA: Los porcentajes presentados para cada carga hidráulica y condición del módulo son los valores promedio.

TABLA 3.1. EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS (CONTINUACION)

Carga Hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$	% de Purga	% DE REMOCION DE SOLIDOS	
		Sin módulo de tubos Canaletas en posición baja	Módulo de tubos cuadrados Canaletas en posición alta con adición de coagulante
27.3	20	88.2	99.0
49.3	20	87.4	92.3
75.5	25	78.9	95.3
75.5	40	--	94.5
96.5	25	57.8	--
108.0	25	41.9	97.5
108.0	40	--	98.3

TABLA 3.2. EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS EN LA ZONA DE COLECCION DEL AGUA CLARIFICADA

Carga Hidráulica $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$	% de Purga	% DE REMOCION DE SOLIDOS ⁺									
		Módulos de tubos cuadrados									
		Canaletas en posición baja					Canaletas en posición alta				
		1	2	3	4	Promedio	1	2	3	4	Promedio
27.3	20	93.5	93.0	91.5	90.6	92.1 \pm 1.3	97.9	96.5	95.1	96.2	96.4 \pm 1.2
49.3	20	92.6	92.6	91.2	90.7	91.9 \pm 1.1	93.8	95.3	90.8	93.3	93.3 \pm 1.9
75.5	25	89.0	91.9	89.0	87.3	89.3 \pm 1.9	84.1	90.5	87.3	--	87.3 \pm 3.2
96.5	25	94.6	93.3	93.1	90.7	92.9 \pm 1.6	81.2	85.5	85.0	90.1	87.2 \pm 2.4
108.0	25	87.4	86.5	85.7	83.8	85.8 \pm 1.6	86.2	85.5	87.9	90.7	87.6 \pm 2.3

+ Los porcentajes presentados para cada punto son los valores promedio de las corridas presentadas en el anexo.

TABLA 3.2. EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS EN LA ZONA DE COLECCION DEL AGUA CLARIFICADA
(CONTINUACION)

Carga Hidráulica $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	% de Purga	% DE REMOCION DE SOLIDOS ⁺									
		Módulo de Placas Paralelas									
		Canaletas en posición baja					Canaletas en posición alta				
		1	2	3	4	Promedio	1	2	3	4	Promedio
27.3	20	92.5	91.7	89.3	98.0	91.1 \pm 1.4	93.5	95.7	93.6	94.4	94.3 \pm 1.0
49.3	20	91.1	94.0	90.0	91.2	91.6 \pm 1.7	93.0	92.6	94.9	95.8	94.1 \pm 1.5
75.5	25	90.0	89.6	87.7	89.5	89.2 \pm 1.0	90.4	87.7	91.5	89.5	89.9 \pm 1.7
96.5	25	79.9	86.6	83.0	87.1	84.2 \pm 3.4	91.8	92.7	86.5	87.3	89.6 \pm 3.1
108.0	25	89.5	85.6	85.3	93.4	88.4 \pm 3.8	23.0	83.7	85.6	82.5	83.7 \pm 1.3

+ Los porcentajes presentados para cada punto son los valores promedio de las corridas presentadas en el anexo.

TABLA 3.2. EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS EN LA ZONA DE COLECCION DE AGUA CLARIFICADA.
(CONTINUACION).

Carga Hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$	% de Purga	% DE REMOCION DE SOLIDOS									
		Sin módulo de tubos					Módulo de tubos cuadrados				
		Canaletas en posición baja				Promedio	Con adición de coagulante				Promedio
1	2	3	4	1	2		3	4			
27.3	20	87.8	93.6	90.0	91.1	90.6 \pm 2.4	99.2	99.0	98.8	99.1	99.0 \pm 0.2
49.3	20	88.5	91.1	87.4	87.8	88.7 \pm 1.7	93.3	92.3	92.5	94.2	93.1 \pm 0.8
75.5	25	79.1	81.9	94.4	86.4	85.5 \pm 6.7	92.7	93.4	93.4	93.2	93.2 \pm 0.3
75.5	40	--	--	--	--	--	94.3	94.5	92.0	94.0	93.7 \pm 1.1
96.5	25	76.3	79.6	79.6	85.0	80.1 \pm 3.6	--	--	--	--	--
96.5	40	--	--	--	--	--	98.2	98.5	98.5	97.7	98.2 \pm 0.4
108.5	25	60.9	73.8	68.4	59.9	65.6 \pm 6.7	98.5	97.3	97.6	97.8	97.8 \pm 0.5
108.0	40	--	--	--	--	--	--	97.9	97.6	97.9	97.8 \pm 0.1

TABLA 3.3. INFLUENCIA DEL TIPO DE MODULO. EFICIENCIA DE REMOCION DE SOLIDOS

Carga Hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$	% DE REMOCION DE SOLIDOS ⁺ Tipo de módulo	
	Tubos cuadrados	Placas paralelas
27.3	95.2 \pm 1.9	94.8 \pm 0.6
49.3	95.7 \pm 1.3	92.9 \pm 0.4
75.5	90.1 \pm 0.7	86.2 \pm 2.2
96.5	87.8 \pm 1.1	85.5 \pm 2.1
108.0	85.0 \pm 1.2	80.9 \pm 3.7

+: Los porcentajes de remoción para cada tipo de módulos son promedios de la posición alta y baja \pm la desviación estándar.

TABLA 3.4. COMPARACION ENTRE LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION DEL SEDIMENTADOR PARA EL EFLUENTE

Carga Hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$	% DE REMOCION DE SOLIDOS		
	Con módulo ⁺⁺	Sin módulo	Con módulo y coagulante
27.3	95.0 \pm 1.6	88.2	99.0
49.3	94.3 \pm 1.8	87.4	92.3
75.3	88.1 \pm 2.6	78.9	95.3
96.5	86.7 \pm 1.9	57.8	97.6
108.0	82.9 \pm 3.2	41.9	97.5

++: Los porcentajes de remoción son el promedio del módulo de tubos cuadrados y el de placas paralelas.

TABLA 3.5. INFLUENCIA DE LA CARGA MASICA

MODULO TUBOS CUADRADOS	27.3	Carga hidráulica (m /m .d)			
		49.8	75.5	96.5	108.0
Canaletas en Posición Baja					
Carga másica kg/m ² .d	16.3	31.4	48.2	64.6	62.5
% remoción en el efluente	93.8	94.8	90.6	88.6	85.8
Canaletas en Posición Alta					
Carga másica kg/m ² .d	15.6	32.6	35.7	50.7	65.0
% remoción en el efluente	96.5	96.6	89.6	87.0	84.1
MODULO DE PLACAS PARALELAS					
Canaletas en Posición Baja					
Carga másica kg/m ² .d	18.1	35.4	51.7	66.4	66.8
% remoción en el efluente	95.2	93.2	84.6	84.0	83.5
Canaletas en Posición Alta					
Carga másica kg/m ² .d	23.1	42.1	63.4	88.4	77.0
% remoción en el efluente	24.4	92.6	87.7	87.0	78.3

TABLA 3.5. INFLUENCIA DE LA CARGA MASICA (CONTINUACION)

SIN MODULO DE ALTA TASA		Carga Hidráulica		(m³/m².d)	
	27.3	19.3	75.5	96.5	108.0
Canaletas en Posición Baja					
Carga másica kg/m². d	15.0	28.2	43.4	59.0	57.5
% remoción en el efluente	88.0	87.4	78.9	57.8	41.9
MODULO DE TUBOS CUADRADOS. CON ADICION DE COAGULANTE					
Canaletas en Posición Alta					
Carga máxima kg/m². d	21.8	41.0	64.1	75.3	88.6
% remoción en el efluente	99.0	92.3	95.3	97.6	97.5

TABLA 3.6. INDICES VOLUMETRICOS DE LODOS (IVL)

Carga Hidráulica $m^3/m^2 \cdot d$	INDICE VOLUMETRICO DE LODOS (IVL) ml/g				
	Tubos cuadrados		Placas Paralelas		Sin Módulo
	Posición de las canaletas				
	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
27.7	251	122	195	186	254
49.3	235	166	229	187	250
75.5	188	148	241	155	208
96.5	204	190	189	175	196
108.0	193	166	202	224	226

TABLA 3.7. VALORES DEL PARAMETRO S PARA LAS CONDICIONES DE OPERACION.

v_o	v_d	S
m/d	m/d	
20	80	14.6
40	80	7.3
60	80	4.9
80	80	3.6
100	80	2.9
150	80	1.9
200	80	1.5
250	80	1.2
300	80	1.0
350	80	0.8

**ANEXO 4. RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS DE INFLUENCIA DEL ANGULO
DE INCLINACION EN LA REMOCION DE TURBIDEZ**

TABLA 4.1. TURBIDEZ MEDIDA EN EL INFLUENTE Y EFLUENTE EN FUNCION DEL ANGULO DE INCLINACION

Angulo de inclinación (grados) θ	TURBIDEZ (UTN)					
	Lodos Activados		Biodisco		Filtro Percolador	
	Influente	Efluente	Influente	Efluente	Influente	Efluente
10	65.5	6.5	12.0	6.8	15.3	8.4
20	67.5	6.6	12.0	6.5	15.3	7.8
30	66.8	5.1	12.0	5.8	15.3	7.1
40	--	-	12.0	5.3	--	-
45	108	3.6	--	-	--	-
50	71.0	4.2	12.0	5.4	16.5	8.4
55	71.0	4.1	--	-	--	-
60	--	-	12.0	5.7	15.3	8.7
70	64.5	7.7	12.0	6.2	15.3	9.2
80	64.5	9.3	12.0	6.5	15.3	9.9

TABLA 4.2. EFICIENCIAS DE REMOCION EN FUNCION DEL ANGULO DE INCLINACION

Angulo de inclinación θ	Lodos activados	Biodisco	Filtro Percolador
10	90	43.3	45.1
20	90.2	45.8	49.0
30	92.3	51.6	53.6
40	--	55.8	--
45	96.6	--	--
50	94.1	55.0	49.1
55	93.1	--	--
60	--	52.5	43.1
70	88.1	48.3	39.9
80	85.6	45.8	35.3

ANEXO 5. DISEÑO DE SEDIMENTADORES

ANEXO 5. DISEÑO DE SEDIMENTADORES SECUNDARIOS

A.5.1 Sedimentadores convencionales

Básicamente existen dos métodos para el diseño de sedimentadores secundarios convencionales: a) el presentado por Talmage y Fitch (1955) y, b) el método basado en el concepto del Flux de sólidos (Dick, 1970).

Método de Talmage y Fitch

El método de Talmage y Fitch se basa en la teoría de Kynch donde se asume que la velocidad de sedimentación de las partículas es solamente función de la concentración local. Esta velocidad se relaciona con el gasto de lodos a tratar y la concentración de purga deseada. Para ello, se llevan a cabo pruebas de sedimentación como a continuación se describe: en una pro-

beta de vidrio de un litro se colocan los lodos con una concentración similar a la que tendrá el influente del sedimentador. Estos son agitados lentamente a razón de cuatro a seis revoluciones por hora (para simular el efecto de las rastras del sedimentador). Se mide la altura de la interfase sólido - líquido a diferentes tiempos y se grafican los resultados como se muestra en la figura 5.1.

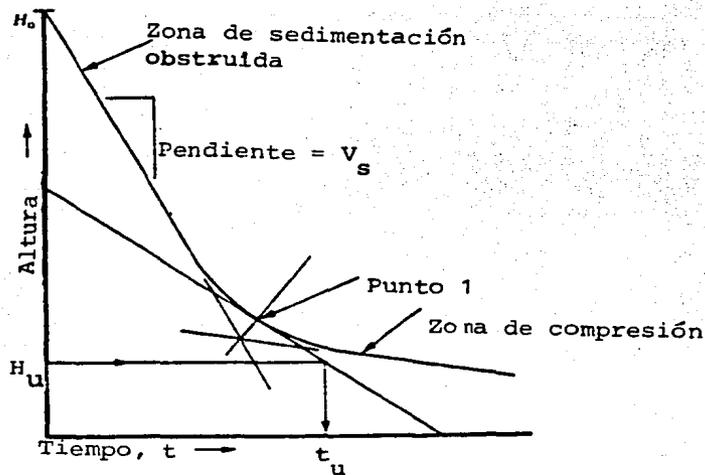


Figura 5.1. Curva para el análisis de velocidad de sedimentación.

El procedimiento para obtener el área de un clarificador final es el siguiente:

1. Determinar la pendiente de la región de sedimentación obstruida, v_d . Esta es la velocidad de sedimentación requerida para la clarificación (ver capítulo 4).
2. Extender tangentes de la zona de sedimentación obstruida y la región de compresión y bisectar el ángulo formado para localizar el punto 1 (figura 5.1).
3. Dibujar una tangente a la curva en el punto 1.
4. Conociendo la concentración inicial del lodo, C_o , y la altura inicial del lodo, H_o , seleccionar una concentración de purga, C_u , y determinar la altura interfacial, H_u .

Puesto que:

$$C_u H_u = C_o H_o \quad (5.1)$$

entonces

$$H_u = \frac{C_o H_o}{C_u} \quad (5.2)$$

5. Dibujar una línea horizontal de H_u hasta la intersección de la tangente a la curva y determinar el tiempo, t_u . (Figura 5.1). Este es el tiempo requerido para alcanzar la concentración de purga C_u , deseada.

6. Determinar el área requerida para el espesamiento, A_e , a partir de:

$$A_e = 1.5 (Q + Q_R) \frac{t_u}{H_o} \quad (5.3)$$

donde:

- Q : gasto del influente antes de unirse a la recirculación
- Q_R : gasto de recirculación
- 1.5: factor de seguridad (Eckenfelder, 1980)

7. Determinar el área requerida para la clarificación, A_c :

$$A_c = 2.0 \frac{Q}{v_s} \quad (5.4)$$

donde:

- Q : gasto del efluente del sedimentador (o del influente antes de recirculación)
- 2.0: factor de sobrediseño.

Un área A_e o A_c será mayor y por lo tanto se usará en el diseño del clarificador final.

Método del flux de sólidos

Debido a su simplicidad -se requiere solo una prueba de sedimentación- el método propuesto por Talmage y Fitch ha tenido gran aceptación. Sin embargo, como lo han notado varios investigadores, incluso Fitch (1962), se obtienen mejores resultados si se llevan a cabo varias pruebas de sedimentación.

Este método se basa en el concepto del flux de sólidos (Dick 1970). Este flux es el flujo de sólidos espesados por unidad de área transversal (en otras palabras la carga másica en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$).

Los sólidos que entran a los sedimentadores deben ser espesados de una concentración inicial C_0 , a la concentración de purga, C_u . Como los sólidos se mueven hacia el fondo, en algún nivel del tanque ocurre un flux de sólidos límite, G_L . Este flux no debe excederse o los sólidos ascenderán y comenzarán a salir por el efluente. El movimiento de las partículas hacia el fondo sucede por sedimentación obstruida, así como por el desplazamiento del volumen hacia abajo, debido al gasto de purga.

Los datos requeridos para el diseño de sedimentadores por este método se obtienen a través de una serie de pruebas de sedimentación donde se estudian varias concentraciones de lodos, y

así obtener sus respectivas velocidades de sedimentación. Una vez calculadas estas velocidades se construye una gráfica de velocidad de sedimentación, v_s , en función de la concentración de los sólidos, c , como se muestra en la figura 5.2.

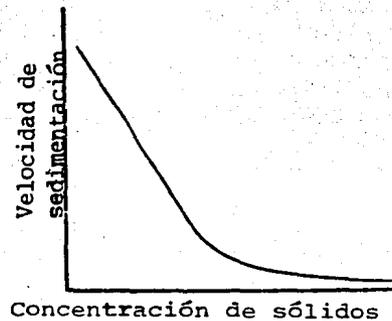


Figura 5.2. Velocidades de sedimentación en función de la concentración de sólidos.

A continuación se calcula el flux de sólidos al multiplicar la velocidad de sedimentación por la concentración de los sólidos y se grafican los resultados como se muestra en la figura 5.3.

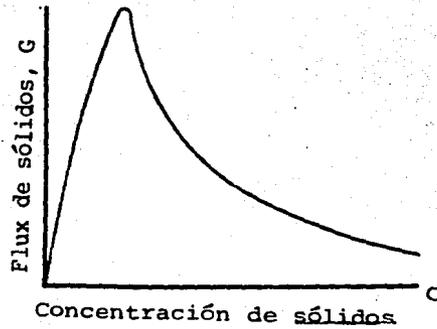


Figura 5.3. Flux de sólidos en función de la concentración.

A cualquier nivel en el sedimentador, el movimiento de sólidos por asentamiento es:

$$G_s = C_t V_t \quad (5.5)$$

donde:

G_s : flux de sólidos por gravedad

C_t : concentración de sólidos

V_t : velocidad de sedimentación obstruida

El movimiento de sólidos debido al desplazamiento del volumen está dado por:

$$G_b = C_t V_b \quad (5.6)$$

donde

G_b : flux del volumen

V_b : velocidad de desplazamiento del volumen

El flux de sólidos total, G_t , es:

$$G_t = G_s + G_b = C_t V_t + C_t V_b \quad (5.7)$$

La velocidad del volumen está dada por:

$$V_b = \frac{Q_u}{A} \quad (5.8)$$

donde:

Q_u : gasto de purga

A : área transversal del tanque

El gasto másico de sólidos que sedimentan, esto es el peso de sólidos por unidad de tiempo es:

$$M_t = Q_o C_o = Q_u C_u \quad (5.9)$$

donde:

M_t : gasto másico de sólidos que sedimentan

Q_o : gasto de influente

C_o : concentración del influente

El área transversal límite, A , requerida está dada por:

$$A = \frac{M_t}{G_L} = \frac{Q_o C_o}{G_L} \quad (5.10)$$

Al reorganizar la ecuación 5.9 se obtiene

$$Q_u = \frac{M_t}{C_u} \quad (5.11)$$

Al combinar 5.11 con 5.8 y 5.10 se obtiene:

$$v_b = \frac{Q_u}{A} = \frac{M_t}{C_u A} = \frac{G_L}{C_u} \quad (5.12)$$

Estas relaciones se muestran en la figura 5.4. Para obtener el valor de G_L primero se selecciona una concentración de purga, C_u , y posteriormente se dibuja una tangente a la curva del flux. El valor de G_L es la intercepción del eje y (figura 5.4).

El área requerida se obtiene con:

$$A = 1.5 \frac{M_t}{G_L} \quad (5.13)$$

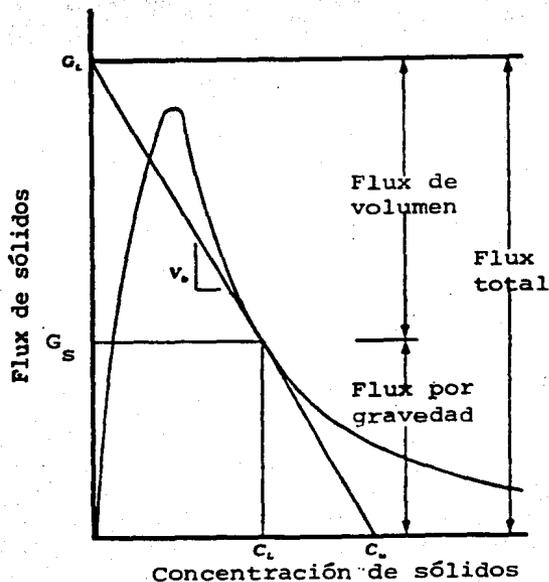


Figura 5.4. Cálculo del flux de sólidos límite

donde 1.5 es un factor de sobrediseño.

Volumen requerido

El volumen requerido para los lodos en la región de compresión se determina por medio de pruebas de sedimentación. La velocidad de compactación en esta región es proporcional a la diferencia de altura al tiempo t y la altura a la cual el lodo sedimentará después de un periodo grande de tiempo. Esto se representa por la ecuación 5.14:

$$H_t - H_\infty = (H_2 - H_\infty) e^{-i(t-t_2)} \quad (5.14)$$

donde:

H_t : altura de lodo al tiempo t

H_∞ : altura de lodo después de un periodo grande de tiempo
(p. ej. 24 h)

H_2 : altura de lodo al tiempo t_2

i : constante para una suspensión dada

Otra manera de determinar la altura requerida es usar los criterios de diseño incluidos en la literatura técnica. Por ejemplo el Institute for Water Pollution Control (IWPC, 1973) recomienda un tiempo mínimo de retención de 1.5 horas para sedimentadores que operan con lodos activados. Así la altura requerida se obtiene con la ecuación 5.15

$$H = \frac{Q \cdot t}{A} \quad (5.15)$$

donde:

H : altura

Q : gasto volumétrico

A : área

t : tiempo de retención

A.5.2 Sedimentación de alta tasa

Como se discutió en el capítulo 4 un módulo de sedimentación de alta tasa puede tener diferentes arreglos: tubos cuadrados o

hexagonales, placas paralelas, etc. Estos módulos se construyen con materiales como el PVC ó el asbesto-cemento (para el caso de placas). Para prevenir que se formen corrientes de flujo es recomendable que una hilera o conjunto de tubos se incline hacia un lado y la siguiente hacia el otro.

Con respecto al ángulo de inclinación se recomienda que éste oscile entre 45 y 60°, ya que si es menor deberá proveerse de un sistema que remueva los lodos acumulados. El espaciamiento entre placas o diámetro de los tubos varía entre 2.5 y 5 centímetros.

De esta manera, una vez seleccionado el tipo de módulo, el ángulo de inclinación y el espaciamiento entre placas o tubos, se procede a calcular la longitud de estos. Para ello se utiliza la ecuación del modelo de Yao, es decir:

$$L = \frac{\ell}{d} = \frac{S_c}{\cos \theta} \cdot \frac{v_o}{v_{sc}} - \tan \theta \quad (5.15)$$

donde:

L : longitud relativa

ℓ : longitud de las placas o tubos

d : espaciamiento ó diámetro

S_c : parámetro que depende de la forma del módulo (ver sección 4.2)

v_o : velocidad promedio de flujo (carga hidráulica a tratar)

v_{sc} : velocidad de sedimentación de las partículas
 θ : ángulo de inclinación

A esta longitud L se adiciona la longitud relativa L' debida a la región de transición del flujo (ecuación 45, sección 4.2).

El área requerida para la sedimentación se calcula a partir de la carga hidráulica recomendada- por ejemplo $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ para suspensiones de lodos activados- y, el gasto que es necesario tratar. De esta manera:

$$\text{área } [L^2] = \frac{\text{Gasto, } Q [L^3.T^{-1}]}{\text{Carga hidráulica } [L.T^{-1}]} \quad (5.16)$$

El número de tubos o placas necesarias para el sedimentador de alta tasa es:

$$\begin{array}{l} \# \text{ de tubos o} \\ \text{placas} \end{array} = \frac{\text{área requerida}}{\text{Longitud, } l * \text{ ancho o diámetro, } d}$$

(5.17)

Se debe mencionar que para el caso de tratamiento de aguas residuales, el número de tubos o placas se debe aumentar, ya que como se demostró, la teoría no se ajusta totalmente a la práctica. Por lo tanto, es conveniente multiplicar la ecuación 5.17 por 1.2, como factor de seguridad.

El módulo de alta tasa se coloca en la primera tercera parte del tanque, cuidando que la altura h_e sea igual o mayor al tamaño l del módulo (ver figura 5.5). Este diseño se puede optimizar utilizando los diagramas propuestos por Verhoff (ver sección 4.2.4).

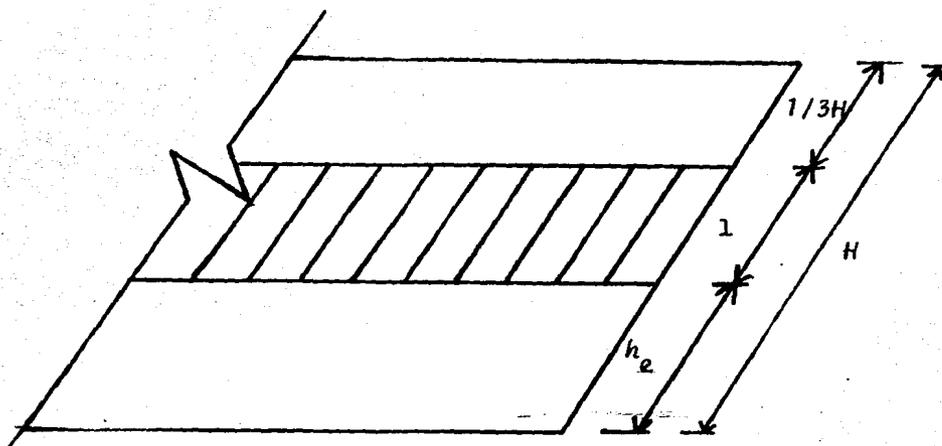


Figura 5.5 Esquema de un sedimentador de alta tasa.