



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA EL DISEÑO DEL
TANQUE REGULADOR DEL P. H. AGUA PRIETA.

T E S I S

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERIA

(H I D R A U L I C A)

P R E S E N T A

VICTOR JAVIER BOURGUETT ORTIZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

1990



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

011621
rej

INDICE

RESUMEN

1.-	INTRODUCCION.	1
2.-	ANTECEDENTES.	5
2.1.-	Proyecto Agua Prieta.	5
2.2.-	Características del agua residual.	10
2.3.-	Planteamiento del problema.	12
3.-	DISEÑO EXPERIMENTAL.	14
3.1.-	Generalidades	14
3.2.-	Dispositivo Experimental, Modelo General..	
3.2.1.-	Objetivos.	15
3.2.2.-	Modelo Hidráulico.	16

3.2.3.- Alcances.	18
3.3.- Dispositivo Experimental, Modelo 1 : 20.	20.
3.3.1.- Objetivos.	18
3.3.2.- Modelación de vorticidad.	19
3.3.3.- Modelo Hidráulico.	24
3.3.4.- Alcances.	24
3.4.- Pruebas de Sedimentación.	27
3.4.1.- Generalidades.	27
3.4.2.- Objetivos.	27
3.4.3.- Dispositivo experimental.	28
4.- ESTUDIO EXPERIMENTAL.	33
4.1.- Funcionamiento general Tanque Regulator.	
4.1.1.- Ubicación de la obra de toma	33
4.1.2.- Funcionamiento Hidráulico.	35
4.1.3.- Depósito de sedimentos.	35
4.2.- Estudio con Trazador Sólido.	36
4.2.1.- Tanque de la Experiencia.	36
4.2.2.- Trazador Sólido.	39
4.2.3.- Estudio de trazado.	43
4.2.4.- Confinamiento de los Sedimentos.	43
4.3.- Estudio con Trazador Líquido.	45
4.3.1.- Ensayes.	45
4.3.2.- Técnica Estimulo Respuesta.	53
4.4.- Estudio en modelo 1 : 20.	56

4.4.1.-	Generalidades.	56
4.4.2.-	Presencia de vórtices.	57
4.4.3.-	Pruebas con trazador.	57
4.5.-	Estudio de sedimentación.	58
4.5.1.-	Aspectos generales.	58
4.5.2.-	Simulación del Vaso.	60
4.5.3.-	Experimentos.	60
4.5.4.-	Pruebas Estándar.	63
5.-	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	65
5.1	Funcionamiento General Tanque Regulador.	
5.1.1.-	Ubicación de la Obra de Toma.	65
5.1.2.-	Funcionamiento Hidráulico.	67
5.1.3.-	Depósito de Sedimentos.	69
5.2.-	Estudio de Trazado.	70
5.2.1.-	Localización de la Descarga.	70
5.2.2.-	Confinamiento de los Sedimentos.	71
5.2.3.-	Análisis de Alternativas.	72
5.3.-	Determinación del Tiempo de permanencia y Eficiencia Hidráulica.	78
5.4.-	Estudio en modelo 1:20.	82
5.4.1.-	Presencia de Vórtices.	82
5.4.2.-	Pruebas de Trazado.	83
5.5.-	Estudio de Sedimentación.	87
5.5.1.-	Simulación del vaso.	97

5.5.2. - Pruebas Estándar.	102
5.5. - Métodos de Limpieza.	112
6. - DISEÑO HIDRAULICO.	115
6.1. - Aspectos Generales.	115
6.2 Tanque sedimentador.	118
6.3 Obra de toma.	126
6.4 Arrastre de sedimentos.	126
7. - CONCLUSIONES.	128
AGRADECIMIENTOS.	132
REFERENCIAS.	134

RESUMEN

En este trabajo se presentan los trabajos experimentales realizados para determinar los parámetros de diseño del tanque sedimentador que se construirá en el Proyecto Hidroeléctrico Agua Prieta. Con esto se garantiza una operación eficiente y económica de la planta que maneja $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$ de aguas residuales y $6,600 \text{ m}^3$ de sólidos transportados en suspensión.

1- INTRODUCCION.

El proyecto hidroeléctrico Agua Prieta generará energía eléctrica aprovechando las aguas residuales de la cd. de Guadalajara, Jal. Esto significa concentrar en un vaso de almacenamiento, 1.1 millones de m^3 de agua negra diariamente. El volumen de sólidos que llegarían transportados en suspensión es en promedio de 6,700 m^3 /día.

Aun y cuando la totalidad del proyecto tiene fases de Ingeniería muy importantes, el estudio aquí presentado se refiere sólo a una de los componentes principales de aquel, el tanque de almacenamiento y regulación, ver fig. 1. Este recibirá el agua residual durante todo el día, alcanzando su nivel máximo (elev.1469) a las 19 h. Según un hidrograma de ingresos al vaso (ref 59), las otras 5 h del día se genera energía con un gasto constante de 52.6 m^3 /s. De esta forma se vacía el tanque hasta llegar al NAMINO (elev. 1458). El piso del tanque se encuentra en la elev 1456.

No existen antecedentes en la literatura sobre el tema de un vaso de características similares; los elementos teóricos de que se dispone no son suficientes para poder predecir lo que sucederá en el tanque si se descarga al vaso (100,000 m² en planta) esta clase de fluido sin alguna estructura especial, ya que por el volumen de sólidos que ingresa, una parte se decantará y existirá una cierta distribución de los sedimentos en el vaso, de acuerdo con la cual se analizará la remoción de éstos.

Por todo esto se estudió la ubicación de la obra de toma, la geometría del vaso regulador, la ubicación de la descarga, el patrón de depósito de sólidos, el confinamiento de sedimentos en un tanque sedimentador, su geometría (eficiencia hidráulica y de remoción) y estructuras complementarias, en un modelo físico escala 1:80; el funcionamiento de la obra de toma, aspectos adicionales de la geometría del sedimentador, potencial de arrastre de sedimentos y funcionamiento durante la extracción para generación, en un modelo físico 1:20; y, mediante pruebas de campo, el comportamiento del agua residual y de los sedimentos que transporta en columna de sedimentación de 10 m. La información obtenida será aplicada en el diseño de las estructuras pertinentes.

Esta tesis presenta el estudio experimental mencionado,

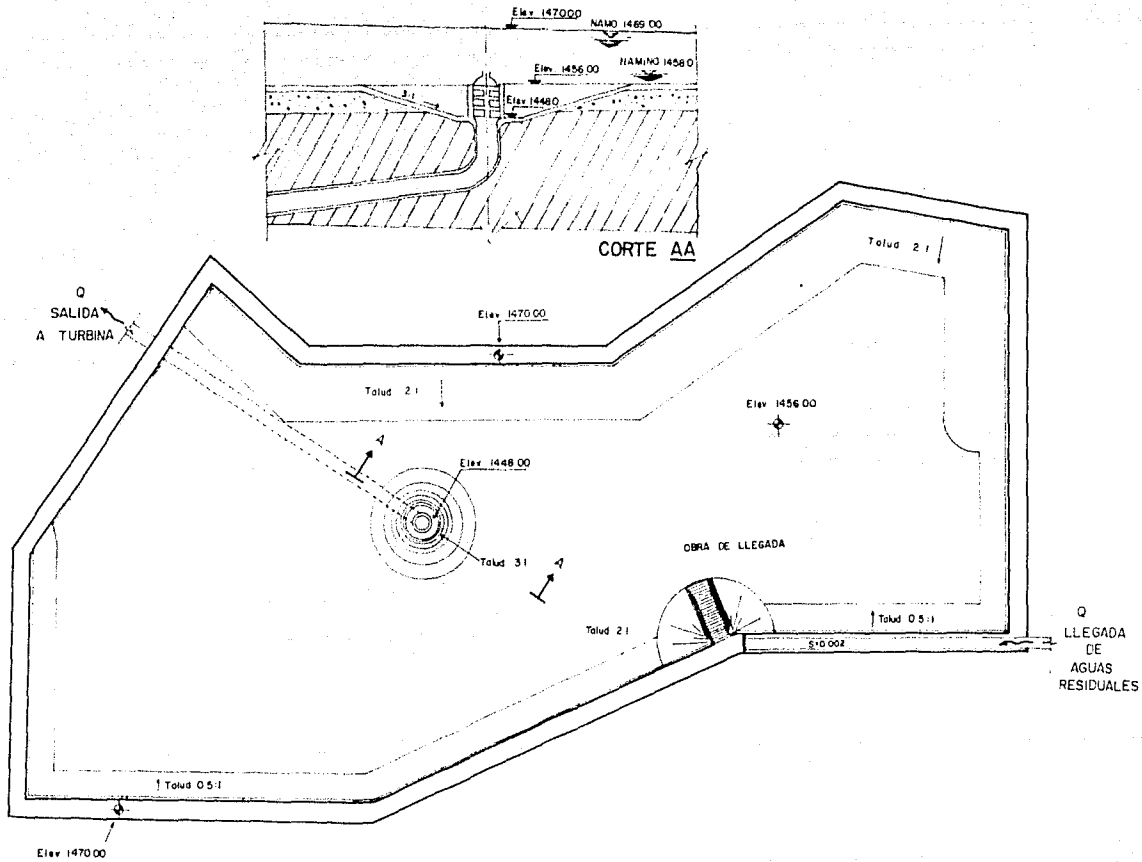


FIG 1 ESQUEMA ORIGINAL DEL TANQUE REGULADOR

efectuado por el Laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad, en el periodo 87-89, que mediante tres etapas de estudio; general, de identificación de problemas y soluciones; de detalle, sobre el funcionamiento de la toma y tanque sedimentador; de campo, acerca del conocimiento del comportamiento de los sedimentos y determinación de parámetros de diseño.

Habida cuenta de lo anterior, el escrito se estructura de la siguiente manera : los antecedentes y planteamiento del problema se incluyen en el capítulo 2; el capítulo 3 se integra con la descripción de las diferentes fases del estudio experimental, esto es; qué partes lo componen, cómo se determinaron los objetivos, escalas, alcances, etc; Los estudios realizados y procedimientos empleados, entre otros, se describen en el capítulo 4. El análisis de resultados de cada parte del estudio se incluye en el capítulo 5; el capítulo 6 presenta el diseño final del tanque regulador; finalmente las conclusiones y recomendaciones se anotan en el capítulo 7.

2.- ANTECEDENTES.

2.1.- PROYECTO AGUA PRIETA.

La planta hidroeléctrica Agua Prieta, ubicada en las proximidades del área metropolitana de Guadalajara, Jal, es la primer hidroeléctrica del país que aprovechará agua residual. La planta tiene una capacidad de generación media anual de 565.6 GWH y una potencia instalada de 240 MW, en su primera etapa. Se utilizará para generar energía en horas pico, de 5 a 8 h al día.

La planta hidroeléctrica Agua Prieta recibirá las aportaciones de los arroyos Atemajac, San Andrés y Osorio y del río San Juan de Dios, siendo las principales las del primero y el último.

El esquema general del proyecto se conforma como sigue: las aguas de los arroyos Osorio y San Andrés se conducirán hasta presa Hedionda, localizada en el cauce del río San Juan de Dios; en este río y en el arroyo Atemajac, se instalarán derivadoras, ver fig. 2, éstas se comunicarán mediante un canal, constituyendo lo que será la captación; de ahí, se conducirá el agua aproximadamente 5.8 km a través de tres tramos en túnel, dos sifones y algunos tramos en túnel falso; el agua descarga a un vaso de regulación horaria de 1,290,000 m³ de capacidad y un área al NAMO de 100,000 m², ver fig. 3, el tanque es artificial con muros de materiales graduados y cortina impermeable de 14 m de altura, el piso es impermeable a base de material arcilloso sobre la cual se colocará una coraza de material rocoso; en una de sus paredes se aloja la obra de toma, ver fig.4, de sección rectangular, esta funcionará sólo durante 5 h en estiaje y hasta 8 h en época de lluvias, el agua será conducida hasta la casa de máquinas a través de tubería a presión que conecta a la obra de toma, el diámetro de la tubería de acero es variable, con máximo 5 m. La casa de máquinas se encuentra aproximadamente 500m abajo del NAMO en el regulador (ref 39).

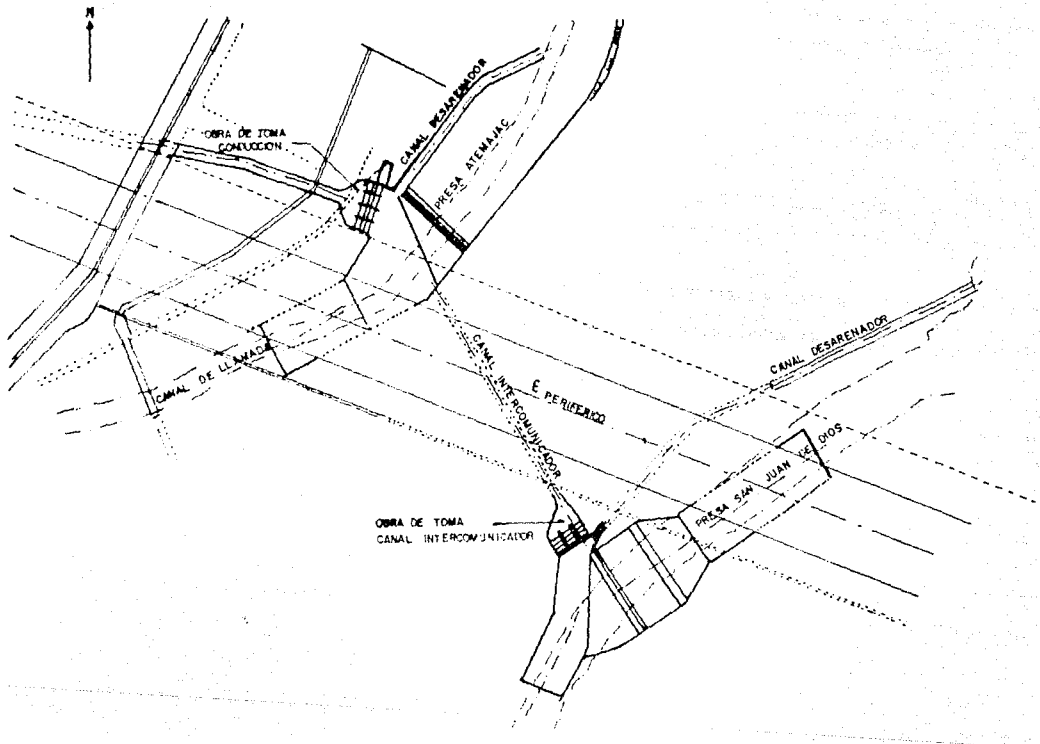


FIG. 2 CAPTACION ATENAJAC - SAN JUAN DE DIOS

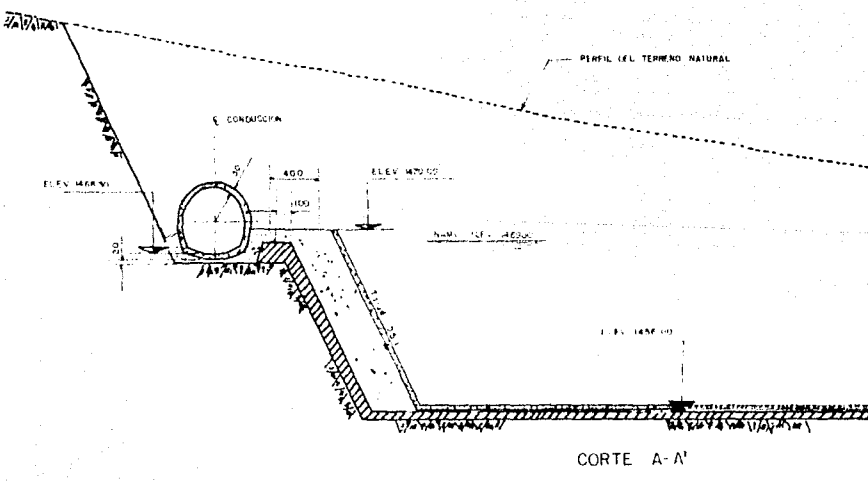
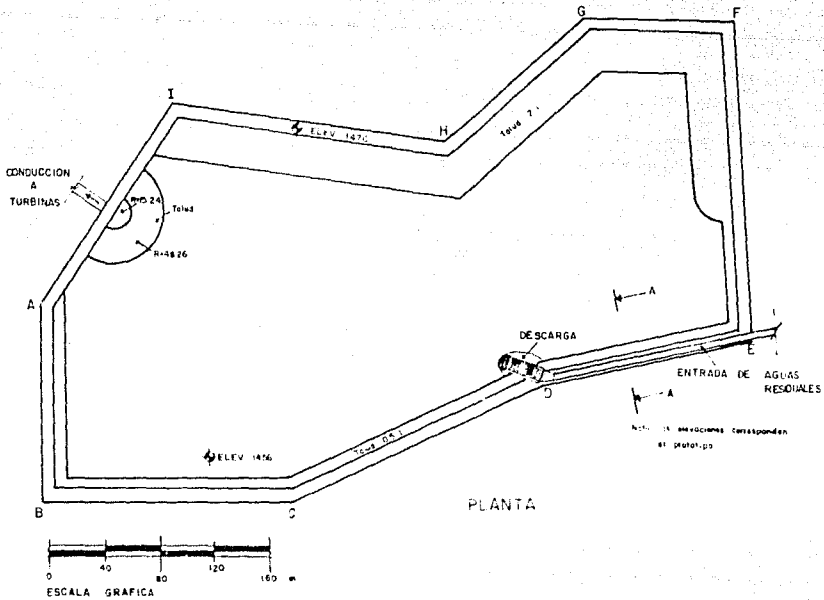


FIG. 3 PLANTA Y CORTE DEL VASO

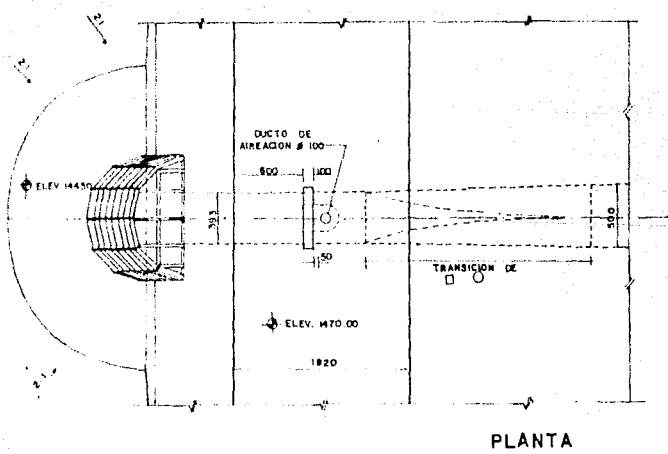
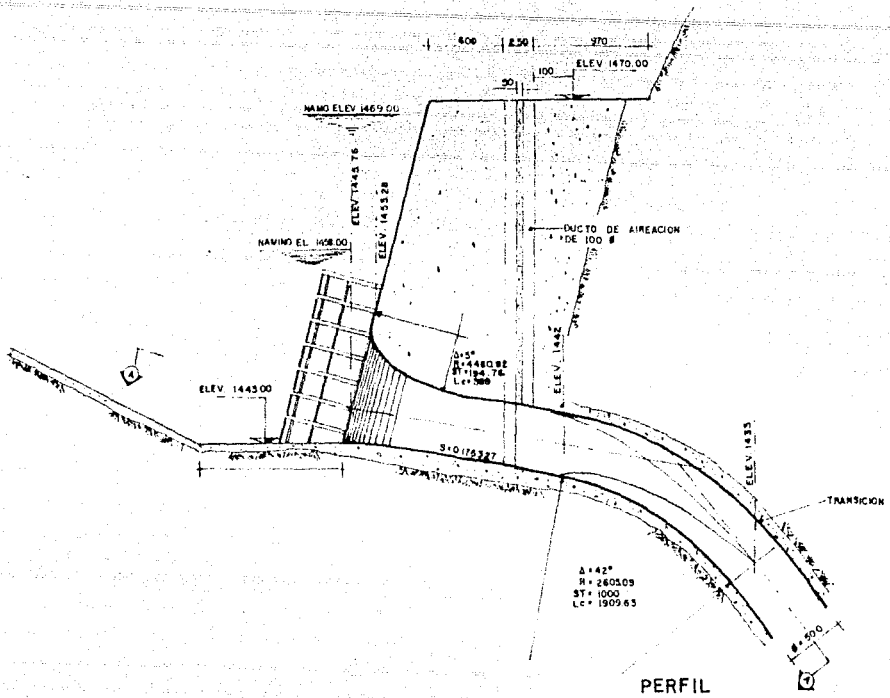


FIG 4 PLANTA Y PERFIL DE LA OBRA DE TOMA EN EL TANQUE REGULADOR PARA CASA DE MAQUINAS

2.2.- CARACTERISTICAS DEL AGUA RESIDUAL.

A diferencia de los proyectos hidroeléctricos convencionales el P.H. Agua Prieta utilizará esencialmente agua residual. La utilización de ésta introduce una serie de incógnitas sobre el comportamiento de grandes volúmenes de aguas residuales y los sólidos que son transportados en suspensión por el fluido. Los sólidos que transporta el agua residual presentan una heterogeneidad importante, varían en tamaños, forma, peso específico, velocidad de caída y de origen (inorgánico u orgánico). Los parámetros que se utilizarán para caracterizar el agua negra asociada a un problema de estimación de volúmenes y procesos de sedimentación se presentan a continuación así como los valores promedio asociados:

concentración de sedimentos en volumen C_{s1} (ppm).....	0.01351
concentración de sedimentos en peso C_{s2} (kgf/m^3).....	35.8
concentración de sedimentos en peso como % C_{s3}	3.51
peso específico volumétrico γ_v (kgf/m^3).....	0.223
peso específico de la mezcla γ_m (kgf/m^3).....	1022.6227

La definición de cada uno de estos parámetros se presenta en las ref 44 a 47.

Aunque se sabe que estos valores son función de un sin número de variables, (hora, estación, temperatura, forma de muestreo, método de determinación, etc), es factible establecer intervalos de variación y en su caso, promedios diarios para realizar estimaciones de volúmenes y comportamiento de los sólidos en suspensión.

Por otra parte, debido a que el manejo que se le da al fluido en el tanque es parecido al que puede presentarse en un tanque sedimentador de una planta de tratamiento de aguas negras es posible hablar, en general, de tres clases de materiales : partículas discretas, partículas floculentas y material sólido altamente floculento, y de cuatro tipos de procesos de sedimentación : sedimentación discreta o tipo I, sedimentación floculenta o tipo II, sedimentación zonal o tipo III y sedimentación compacta o tipo IV. Esta clasificación obedece a las diferentes características o propiedades de la mezcla o suspensión ; si las partículas son floculentas o discretas, orgánicas o inorgánicas, o si la concentración de sólidos es alta o baja. En el vaso de Agua Prieta se presentan los cuatro tipos: el primero porque al tanque llegan arenas muy finas que sedimentan conforme a la ley de Stokes, el segundo porque una buena parte de los sólidos son orgánicos y con ellos viene mucho material que flocula, el tercero se presenta en la parte baja del tanque donde normalmente se presentan altas concentraciones de

sólidos, debido a ésto se produce un efecto de retardamiento al interactuar las partículas entre si, la última se presenta en el material ya sedimentado, es un efecto de compactación o consolidación por efecto del peso y acomodo de las partículas, y puede ser importante para efectos de remoción (ref 56).

2.3.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Ante la incertidumbre que existe acerca del comportamiento de los grandes volúmenes de sedimentos en un área muy grande, como es el caso del vaso regulador, se plantea en principio estudiar la ubicación de la obra de toma; la geometría original del vaso para determinar la distribución del flujo y los patrones de depósito asociados a diferentes posiciones de la descarga al vaso. En caso de ser requerido se estudiarían estructuras que permitieran confinar los sedimentos en un área reducida con el fin de facilitar su remoción, esto es, tanques sedimentadores de los cuales se analizaran sus eficiencias hidráulicas y de remoción mediante técnicas apropiadas.

Por otra parte, dada la poca información de que se dispone acerca del comportamiento de los sólidos sedimentables de las aguas por aprovechar, se realizarán pruebas de campo encaminadas a obtener los parámetros sugeridos por los manuales de diseño de tanques de sedimentación, a saber carga superficial, tiempo de permanencia y eficiencia de remoción, por un lado y los parámetros requeridos para disponer de una evaluación cuantitativa del volumen de sedimentos por manejar, así como sus características generales, (peso volumétrico, peso específico, y concentración de sedimentos).

3.- DISEÑO EXPERIMENTAL.

3.1.- GENERALIDADES.

La diversidad de las interrogantes que se presentan en el diseño del tanque de almacenamiento y regulación, hace necesario disponer de diferentes estructuras para realizar los estudios correspondientes. Por lo mismo, para su ejecución se diseñaron y construyeron dos modelos hidráulicos en escalas 1:80 y 1:20, y una columna de sedimentación de 10.00 m de altura.

En el primero de ellos, un modelo según la ley de Froude, general, con una escala de líneas 1:80, se definió la posición de la obra de toma, el funcionamiento hidráulico general, la forma de depósito del material, y se propuso y analizó un tanque sedimentador para facilitar la remoción y manejo de los sólidos.

En el segundo, un modelo parcial 1:20 escalado conforme a la ley de similitud de Froude, minimizando los efectos de escala por tensión superficial y viscosidad, se estudia el funcionamiento de la obra de toma y del tanque sedimentador.

Por último para tener un conocimiento preciso de la materia en suspensión que llega al tanque y conforme con las recomendaciones (refs 8,10,23,24 y 47), en cuanto, al tipo de análisis a realizar y el experimento adecuado para la simulación, se construyó una columna de sedimentación en la que se estudió el comportamiento de las partículas reales en un tanque de almacenamiento de 10 m de altura llenándose y vaciándose cada 24 h y en un sedimentador primario de 10 m de altura y 2 h de tiempo de permanencia, mediante la denominada prueba de sedimentación en columna (ref 60).

3.2.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL, MODELO GENERAL

3.2.1.- Objetivos.

Los objetivos del estudio son definir la ubicación de la toma, funcionamiento general, detección de zonas de depósito o distribución de los sedimentos y análisis del tanque sedimentador.

3.2.2.- Modelo Hidráulico.

El escurrimiento a estudiar es a superficie libre, las fuerzas predominantes son las del peso propio; por lo cual para garantizar la similitud dinámica entre modelo y prototipo debe conservarse el número de Froude (F), ec. 1, en ambos sistemas.

$$F = \frac{V}{\sqrt{g y}} \quad (1)$$

donde: V es una velocidad característica, m/s.
 g es la aceleración de la gravedad, m/s²
 y es una longitud característica, m.

En la selección de la escala de líneas del modelo se consideraron las recomendaciones que se dan con base en la experiencia en estructuras hidráulicas similares (ref 22), las restricciones que se tienen en el laboratorio como espacio y gasto disponible, así como el aspecto económico, seleccionándose finalmente una escala de líneas L_e de 80.

El área del modelo es de aproximadamente 13 m², se reprodujo todo el tanque de regulación, la descarga, la obra de toma y parte de la conducción, ver fig 5. El modelo se construyó de mampostería de tabique con acabado en cemento pulido fino, la obra de toma se fabricó en acrílico, la tubería a

presión se simuló con tubería de P.V.C. de 2 1/2 " . La alimentación se efectúa mediante una bomba de 3/4 H P , con salida de 2" y gasto de 0.92 l/s. Se dispone antes del modelo de un tanque de aforo con un vertedor triangular de 45° (ref 15).

3.2.3.- Alcances.

En esta etapa del estudio se propuso definir la ubicación de la obra de toma, el funcionamiento hidráulico del tanque, la distribución del depósito de los sedimentos, la conveniencia de confinar los sedimentos y evaluar la eficiencia de algunas alternativas de tanques sedimentadores.

3.3.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL, MODELO 1:20.

3.3.1.- Objetivos.

Un elemento fundamental en un sistema hidroeléctrico es la obra de toma. Para definir el diseño de esta estructura es necesario recurrir a estudios experimentales, en modelo físico, en el que es posible determinar la presencia de vórtices. que pueden originar problemas importantes al

sistema hidroeléctrico como son: reducción del gasto, disminución de la eficiencia de la toma y turbina, vibraciones, entre otros.

Como resultado de los estudios en el modelo 1:80, se determinó la factibilidad de construir un tanque sedimentador en la zona cercana a la obra de toma. Por esto se ha estado estudiando el funcionamiento general del sedimentador y de la operación conjunta sedimentador, obra de toma y tanque regulador.

De los diferentes aspectos, sin duda, el que registrará la determinación de la escala de líneas del modelo, es la modelación de la vorticidad, por ello se abundará en este sentido más adelante.

3.3.2. Modelación de vórtices.

Debido a que el fenómeno de formación de vórtices es complejo, es difícil plantear un tratamiento analítico del problema. Por ésto se utilizan los modelos físicos en la determinación de los patrones de flujo y luego, mediante algún criterio de similitud, determinar las características hidráulicas en el prototipo.

En las obras de toma, la forma en que se estudia la

formación de vórtices, consiste en realizar un análisis dimensional de la misma y llegar a obtener relaciones entre las variables que más influyen en el fenómeno.

Según Anwar (ref 2), el estudio de la formación de vórtices en tomas horizontales se puede efectuar considerando los siguientes parámetros (ver fig. 6): profundidad de sumergencia, h , circulación $\Gamma = V_{\theta} r$, donde V_{θ} , es la velocidad tangencial medida desde el eje del vórtice al radio r , diámetro de la toma D , distancia b medida desde el fondo del canal al eje de la toma, el gasto Q a través de la toma, algunas propiedades del líquido que se está utilizando, tales como viscosidad cinemática ν , densidad ρ , tensión superficial σ , y finalmente, la aceleración de la gravedad g .

Utilizando análisis dimensional (refs 37 y 48), se puede plantear la siguiente relación funcional:

$$f \left\{ \frac{\Gamma D}{Q}, \frac{h}{D}, \frac{Q}{A \sqrt{2gh}}, \frac{b}{D}, \frac{Q}{\nu h}, \frac{\rho Q^2 h}{A^2 \sigma} \right\} \quad (2)$$

donde $A = \pi D^2/4$ es el área de la toma. Reescribiendo la ec.2 se tiene:

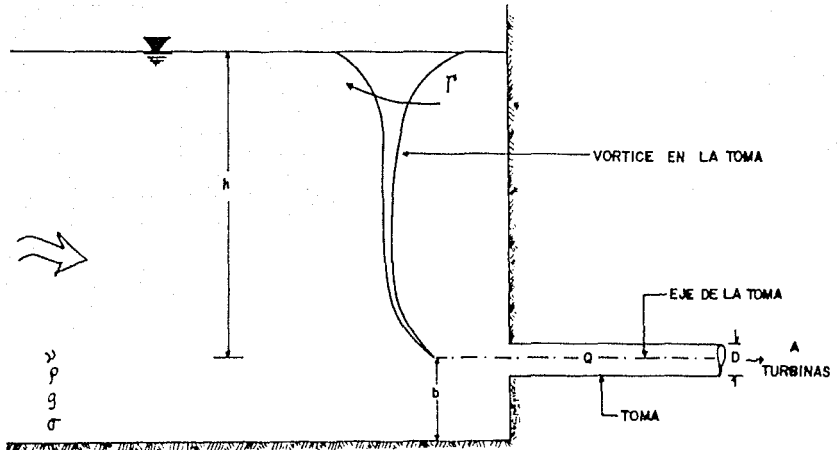


FIG. 6 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS EN LA FORMACIÓN DE VÓRTICES EN TOMAS HORIZONTALES

$$f_1 \left\{ \frac{D}{Q}, \frac{h}{D}, C, \frac{b}{D}, R_R, W \right\} = 0 \quad (3)$$

en donde :

C coeficiente de descarga es;

$$C = \frac{Q}{A \sqrt{2gh}} \quad (4)$$

R_R es el número de Reynolds radial es;

$$R_R = \frac{Q}{v h} \quad (5)$$

W, es el número de Weber

$$W = \frac{\rho Q^2 h}{A^2 \sigma} \quad (6)$$

y finalmente, h/D representa una caída de presión local en el cuerpo del agua.

Se observa en la ec. 2 que para cumplir con las condiciones de similitud dinámica entre modelo y prototipo cuando estos dos sistemas son geoméricamente similares, es necesaria la

modelación de todos los parámetros de dicha ecuación. Lo anterior es imposible de llevar a cabo en Laboratorio, y considerando que en prototipo los valores de R_R y W son mayores que en el modelo, es posible realizar la simulación de la vorticidad de tal forma que los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial se puedan despreciar.

Existen numerosos trabajos (refs 3, 9, 19, 21, 32, 35 y 49), para poder establecer los valores límite de R_R y W , para los cuales el fenómeno es independiente de estos valores. De todos ellos se puede concluir lo siguiente:

$$R_R \geq 3 \times 10^4 \quad (7)$$

$$W \geq 10^4 \quad (8)$$

Se incluyen algunas otras restricciones como el del flujo de aproximación, el flujo en la tubería, la tensión superficial en la toma, simular con gastos distorsionados, etc. en la ref 26 se presenta extensamente el análisis general y en la ref 13 el caso particular de Agua Prieta.

Para propósitos prácticos, la comparación de la intensidad de los vórtices entre el modelo y el prototipo, se puede realizar visualmente, apoyándose en la clasificación sugerida por el American Research Laboratory, ver fig 7.

3.3.3.- Modelo Hidráulico.

En la fig 8, se presenta un esquema general del modelo, que conforme al análisis anterior la escala de líneas es 1:20. Se construyó en mampostería de tabique con acabado de cemento pulido fino excepto, la zona de la toma y la toma misma, que están construidas en acrílico translúcido de 9 mm. Se ha simulado parte de la conducción, los desarenadores localizados antes del tanque sedimentador, el tanque sedimentador, la obra de toma, y una parte del tanque regulador. El modelo se compone además de dos tanques de alimentación, éstos controlan el flujo hacia la conducción uno, y hacia el tanque regulador el otro. Se simulan también las seis compuertas, que en la etapa de turbinado comunican al tanque regulador con el tanque sedimentador. El área total del modelo es de aproximadamente 100 m², la alimentación se realiza mediante dos motobombas de 25 y 15 H.P. que se conectan a dos tuberías de 10" y 6 " respectivamente. El control de gastos se realiza con vertedores rectangulares, el gasto máximo es de 60 l/s.

3.3.4.- Alcances.

Se pretende en este modelo analizar el funcionamiento de la obra de toma, determinar la geometría del tanque

VT = TIPO DE VORTICE



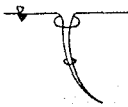
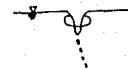

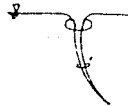
- 1  SUPERFICIE CON TURBULENCIA INCONSISTENTE
- 2  HOYUELO SUPERFICIAL;
TURBULENCIA CONSISTENTE EN LA SUPERFICIE
- 3  NUCLEO DEFINIDO HASTA LA TOMA;
TURBULENCIA DEFINIDA EN TODA
LA COLUMNA DE AGUA
- 4  VORTICE QUE JALA BASURA FLOTANTE,
AUNQUE NO AIRE
- 5  VORTICE QUE SUCCIONA
BURBUJAS DE AIRE HACIA LA TOMA
BURBUJAS DE AIRE
- 6  NUCLEO COMPLETO DE AIRE
HASTA LA TOMA

FIG 7 CLASIFICACION *ARL DE VORTICES SEGUN SU INTENSIDAD

* American Research Laboratory

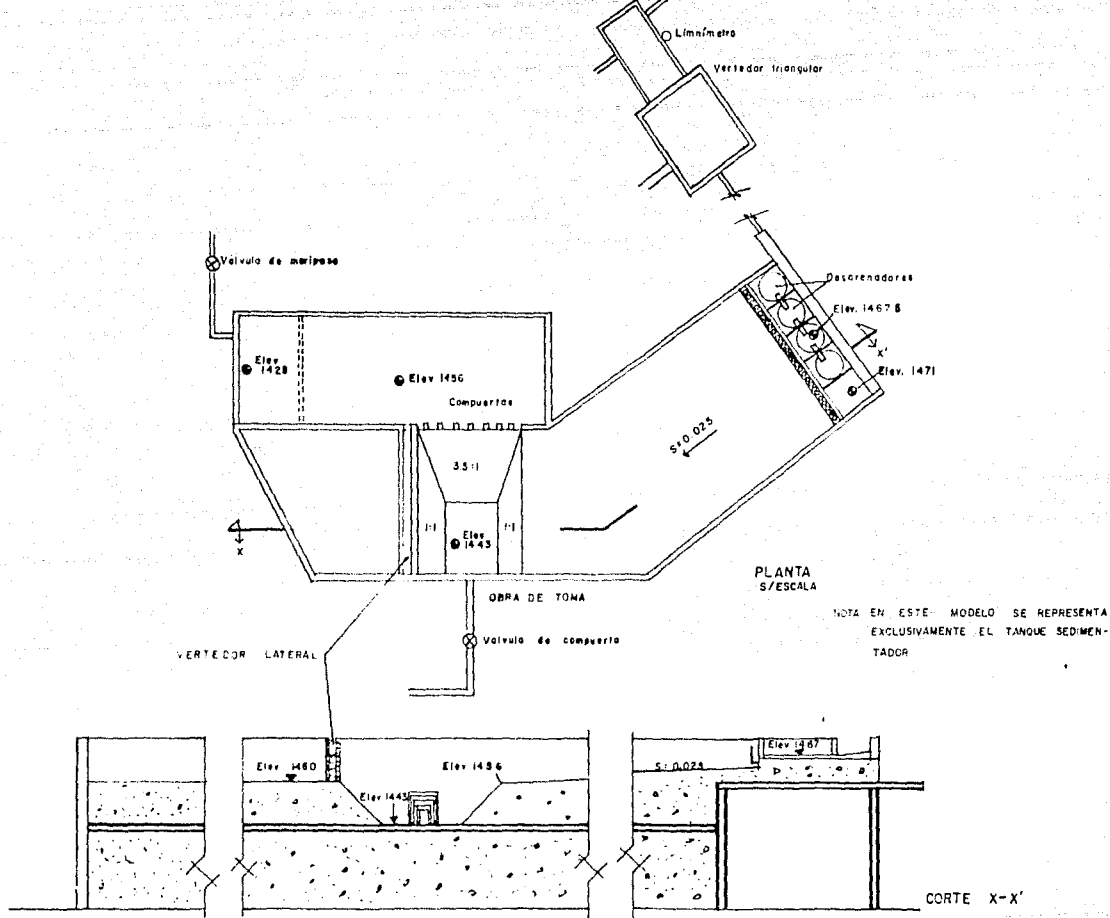


FIG 8 ESQUEMA DEL MODELO ESC 1:20

sedimentador y estructuras accesorias.

3.4.- PRUEBAS DE SEDIMENTACION.

3.4.1.- Generalidades.

La utilización del agua negra ha originado dudas sobre la sedimentación de la materia en suspensión durante el proceso de llenado del tanque. Previamente, en las captaciones y en la entrada al tanque, el agua negra será sometida a eliminación de cuerpos flotantes y acarreos gruesos (captación) y de arenas finas (desarenadores). En consecuencia, el líquido contendrá esencialmente materia fina. Para responder a las interrogantes que se presentan se ha empleado la técnica de sedimentación en columna, (ref. 60), este experimento permite estudiar la sedimentación de sólidos con las características del proyecto Agua Prieta, parte con sedimentación discreta y parte con sedimentación floculenta.

3.4.2.- Objetivos.

Los objetivos de las pruebas son esencialmente dos; el

primero consiste en estudiar la sedimentación de las partículas del agua negra, de los ríos San Juan de Dios y Atemajac, simulando las características de operación del tanque regulador, ref 17 , el segundo consiste en realizar las pruebas conforme a los procedimientos estandarizados.

3.4.3.- Dispositivo Experimental.

El dispositivo consiste en una columna de sedimentación de altura similar a la del tanque sedimentador (10 m), que por las características de la simulación requiere de una forma de alimentación, una estructura soporte y un sistema de izaje especiales, ver fig 9. Estos componentes se describen a continuación.

-Columna de sedimentación.- La columna está construida en acrílico transparente y P.V.C., sus dimensiones son las siguientes: altura 10 m, diámetro 0.19 m y espesor de las paredes de 0.0095 m. La parte inferior de la columna (2.40 m) es de acrílico. La columna tiene 10 perforaciones alineadas de 0.0125 m de diámetro, a intervalos de 1.0 m, excepto la primera que se encuentra a 0.50 m de la base de la columna. En cada orificio, se colocó un niple metálico de 0.05 m de longitud, 0.012 m de diámetro exterior y está colocado a paño con la pared interior de la columna. A cada niple se conectó una manguera latex de 0.075 m de longitud,

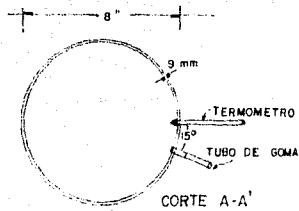
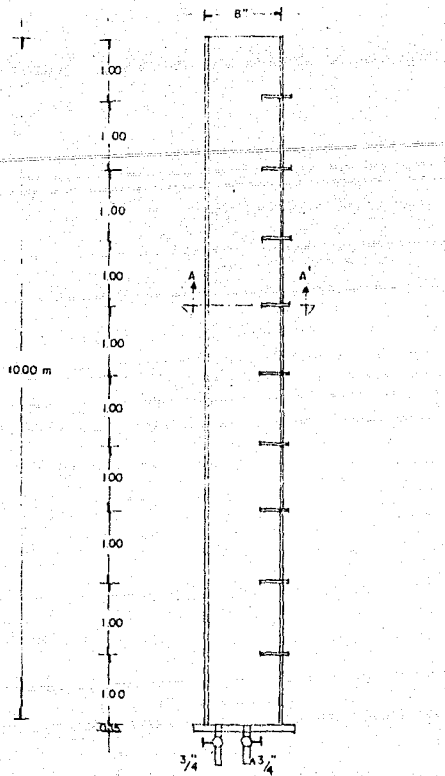


FIG. 9 CROQUIS DE LA COLUMNA CONSTRUIDA EN EL LABORATORIO PARA LA REALIZACION DE PRUEBAS DE SEDIMENTACION

colocándose en el extremo una pinza de laboratorio.

Se tienen instaladas 9 tomas de temperatura, ubicadas a cada metro a partir de la base de la columna, siendo las perforaciones de 0.006 m de diámetro, donde se inserta un termómetro de bulbo de -35°C a 50°C . La base de la columna es de acrílico transparente de 0.009 m de espesor, cuenta con dos orificios, por uno se alimenta y por el otro se vacía la columna, ver fig 10.

-Alimentación.- Se realiza a través de un tubo conduit de 0.012 m de diámetro y con grupos de 4 orificios de 0.003 perpendiculares entre sí separados a cada 0.1 m, el cual se ha colocado concéntrico a lo largo de toda la columna.

-Estructura soporte.- La columna está apoyada sobre un marco metálico, cuenta con 4 sujetadores metálicos que la fijan a la estructura soporte, evitándose con esto la presencia de vibraciones o movimientos accidentales que perturben el proceso de sedimentación.

-Sistema de izaje.- Debido a la naturaleza de la prueba, llenado y vaciado de la columna en 24 h, es necesario disponer de una estructura que pueda ir ascendiendo o descendiendo el tanque alimentador-mezclador de tal forma que se mantenga un desnivel de 0.005 m, entre las

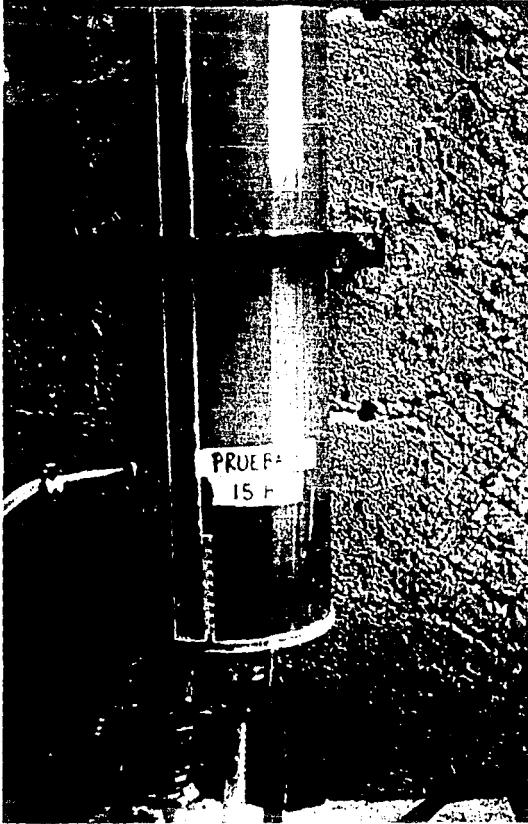


FIGURA 10

superficies libres del agua en aquel y la columna.

-Tanque alimentador-mezclador.- Es un recipiente metálico de forma cilíndrica de 200 l de capacidad. En su parte superior se colocó un moto-reductor que mediante una flecha hace girar una hélice a 42 rpm, evitando que se produzca sedimentación en el líquido almacenado.

-Desarenador.- Los desarenadores remueven arenas con tamaño mayor a 0.2 mm (malla 65) y ocasionalmente partículas de tamaño mayor a 0.147 mm (malla 100). Considerando lo anterior se diseñó un desarenador cilíndrico cuyas dimensiones son: diámetro 0.30 m, altura 0.045 m. Está construido en acrílico transparente y tiene a 0.08 m de la base, dos orificios de 0.025 m, cada uno con una válvula de compuerta.

-Toma de agua.-El agua utilizada en todos los experimentos se toma directamente del cauce con cubetas, en una zona tal que velocidad exceda 1.0 m/s.

4.- ESTUDIO EXPERIMENTAL.

4.1.- FUNCIONAMIENTO GENERAL TANQUE REGULADOR.

4.1.1.- Ubicación de la Obra de Toma.

Se efectuaron ensayos de tipo cualitativo con el fin de seleccionar ubicación de la obra de toma que presente mejores condiciones de operación, ver fig 11. Debe recordarse que los resultados obtenidos pueden ser útiles para fines comparativos, de ninguna manera debe asumirse que la operación corresponde con el prototipo. Los ensayos se realizaron con las siguientes condiciones:

- descarga libre en el vértice D.
- Geometría original del tanque.

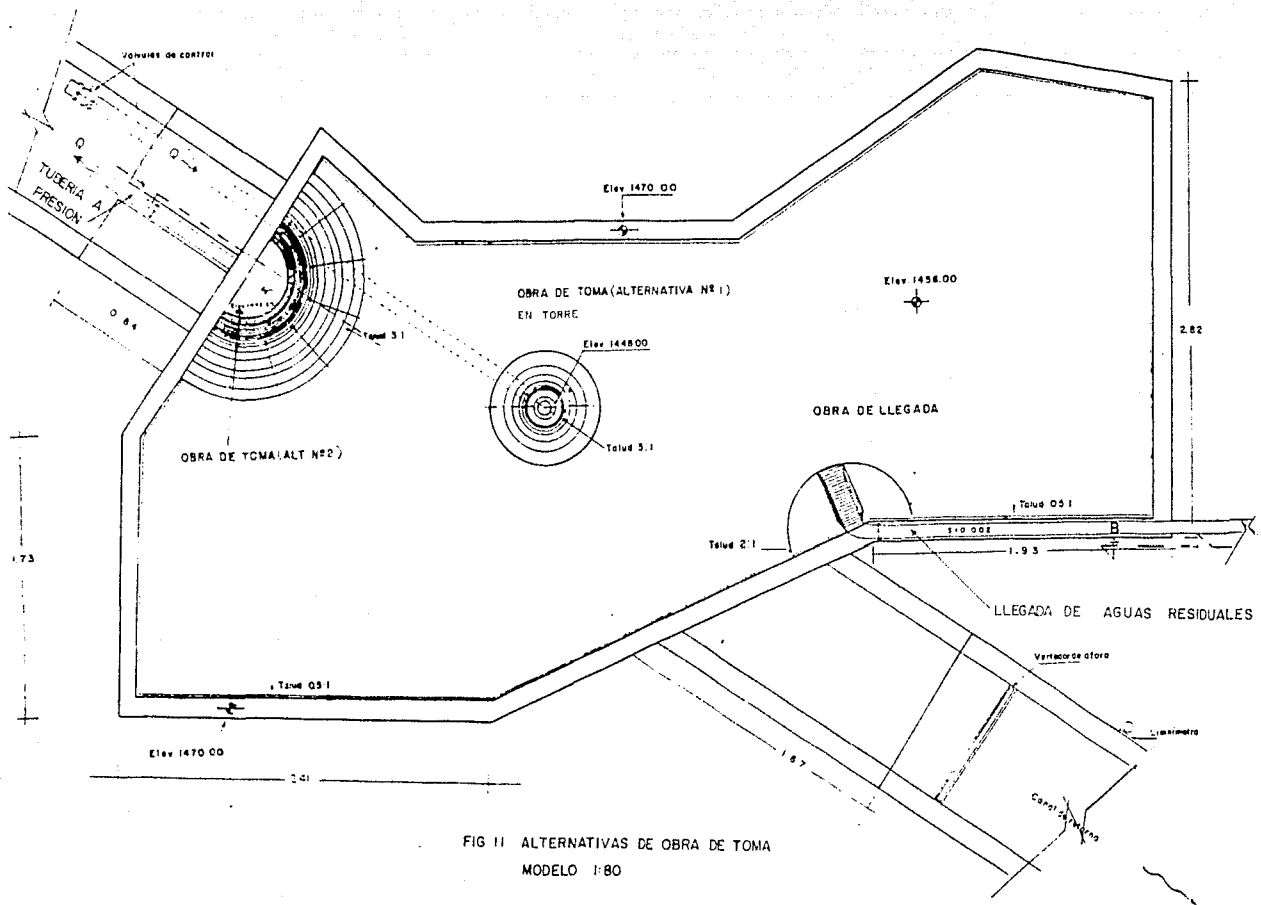


FIG II ALTERNATIVAS DE OBRA DE TOMA
 MODELO 1-80

-Gasto por la toma de 105.2 m³/s.

En total se realizaron 10 ensayos, variando el nivel desde el NAMO hasta el NAMINO para las dos tomas lateral y al centro del tanque. En el acápite 5.1.1 se presentan los resultados de estos ensayos.

4.1.2.- Funcionamiento Hidráulico.

Esta parte se estudió para definir la ubicación de la descarga del líquido al vaso, ésta se ubica en el vértice D, se incluyó una rápida que lleva el agua hasta la elev. 1454. Se observó en los ensayos el patrón de flujo, utilizando trazador líquido para visualizar líneas de corriente, zonas muertas y estimar velocidades. Se realizaron 4 ensayos con diferentes condiciones hidráulicas.

4.1.3.- Depósito de Sedimentos.

Para seleccionar el trazador sólido se efectuaron ensayos preliminares que permitieron visualizar el tipo de depósito asociado a diversos materiales: arena fina, limo-arcilloso, baquelita, ceniza volcánica.

Como primera aproximación y aún sabiendo que no simulaban la heterogeneidad del material del prototipo se consideró de

interés conocer su comportamiento. En el acápite 5.13 se describen los resultados de estos ensayos.

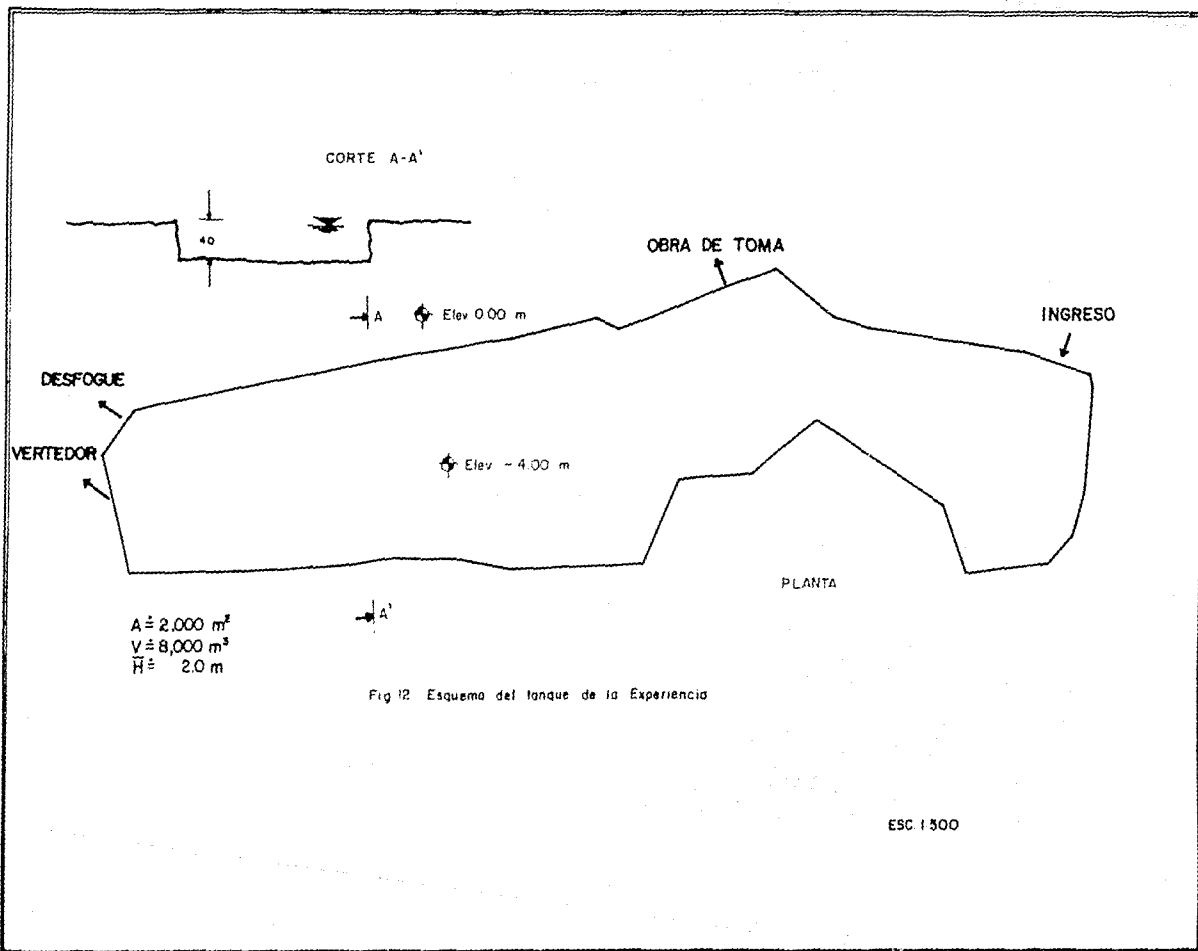
4.2.- ESTUDIO CON TRAZADOR SOLIDO.

4.2.1.- Tanque de la Experiencia.

Para tener mejores elementos de juicio acerca de la distribución de los sólidos en un vaso se realizó una visita al pequeño vaso regulador de la C.H. La Experiencia, Jal. Este aprovechamiento se ubica cerca del proyecto Agua Prieta, de hecho utiliza agua del río Sn Juan de Dios. El tanque, excavado en roca basáltica, es de geometría alargada e irregular, ver fig.12, su área es de 2000 m^2 aproximadamente y su profundidad media 4 m, siendo su volumen aproximado, de 8000 m^3 , las componentes del tanque son: llegada, desvío, tanque, obra de toma, desfogue y vertedor. De este tanque se toma $1 \text{ m}^3/\text{s}$ y se genera energía durante las 24 h.

De las observaciones de campo, ref 14, es importante mencionar lo siguiente:

-Debido a la geometría y forma de operación del tanque las



partículas tiene un recorrido corto y poco tiempo de permanencia. Sin embargo, los volúmenes de sedimentos son apreciables, distribuyéndose en forma sensiblemente uniforme, excepto en la zona de entrada. Esto es muy importante ya que a pesar de la geometría y forma de operación del vaso se sedimentan inclusive arenas, en zonas aparentemente muertas. En los depósitos de arenas mientras más lejos de la entrada menor es el tamaño de ellas como era de esperarse, presentándose diámetros entre 1.2 y 0.6 mm.

-Al ingresar el sedimento al tanque el análisis químico reporta que 50 % de él es materia orgánica, al vaciar el tanque y recoger muestras de los lodos sedimentados el análisis químico revela que sólo un 10 % de ellos es orgánico, el 40 % restante desaparece del sistema bien sea al salir por la obra de toma hacia la turbina o bien sufre descomposición que se refleja por el constante burbujeo en la superficie libre y el olor bastante fuerte a ácido sulfhídrico.

-La limpieza del vaso se efectúa cada semana, se vacía el tanque totalmente y mediante un arrastre hidráulico, con la misma agua que llega, y removiendo el sedimento con palas se eliminan gran parte de los sólidos por el desfogue.

4.2.2.- Trazador Sólido.

Los depósitos observados en el pequeño vaso de la Experiencia, sugieren que el depósito es casi uniforme, por lo cual se deben desechar los trazadores estudiados anteriormente y buscar uno que tenga un comportamiento similar en el modelo 1:80. En esta búsqueda se realizaron prueba con caolín micronizado que pasa la malla 325, material similar al empleado en el Instituto de Ingeniería en estudio de sedimentación en embalses (ref 28), observándose una distribución similar a la deseada. Se consideró conveniente realizar otro tipo de comparación, por lo cual, del estudio de aguas ref 11, se tomaron las curvas de sedimentación en cono, y asumiendo la hipótesis de que son indicadores de la velocidad de sedimentación, se aplicó el criterio de velocidad de caída, ley de Stokes, recomendado como primera aproximación por Ivicsics Lajas, ref 34, y por Velikhanov, Nikitin, y otros autores (refs 31 y 57). A las curvas de sedimentación cuya concentración de sólidos suspendidos totales C_{sst} , las que se espere llegue al vaso regulador, se delimitó una región, que se consideró como la tendencia de sedimentación. Se pretendía que la tendencia del trazador, afectado por un factor de escala, quedará dentro de la región observada y de ser así, poder asumir correspondencia entre las velocidades de sedimentación.

El factor de escala se determinó como se indica enseguida:

Sean:

$$V_p = \frac{L_p}{T_p} \quad (9)$$

$$V_m = \frac{L_m}{T_m} \quad (10)$$

donde:

V_p velocidad de sedimentación, el subíndice p indica prototipo.

V_m velocidad de sedimentación, el subíndice m indica modelo.

V_e escala de velocidades

L_p longitud en prototipo.

L_m longitud en modelo.

L_e escala de líneas.

T tiempo de sedimentación

como el cono de sedimentación condiona que $L_p = L_m$,

entonces:

$$V_e = \frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p}{L_m} \cdot \frac{T_m}{T_p} \quad (11)$$

de donde

$$T_m = \sqrt{L \cdot T_p} \quad (12.)$$

es decir, los tiempos de sedimentación del trazador deben ser los del prototipo multiplicados por la raíz cuadrada de la escala geométrica. En la fig 13, se muestran las curvas de sedimentación del agua negra y se señala la región de sedimentación así como la curva de sedimentación del caolín. Puede observarse una buena aproximación en las tendencias. Con base en estas consideraciones se seleccionó al caolín como trazador sólido para el estudio.

El trazador se aplicó como mezcla agua-caolín, desde un recipiente de 60 l de capacidad, mediante un agitador de aspas accionado por un motor eléctrico de 1/2 H.P. se homogeneizaba la mezcla y se evitaba la sedimentación.

La concentración C_{ss} se midió mediante la prueba Imhoff ref 4, y con turbidímetro, previamente se estimó la correlación turbidez-concentración. El levantamiento del depósito de sedimento se realizó con la ayuda de un limnómetro de punta y el volumen de sedimentos con ayuda de un planímetro.

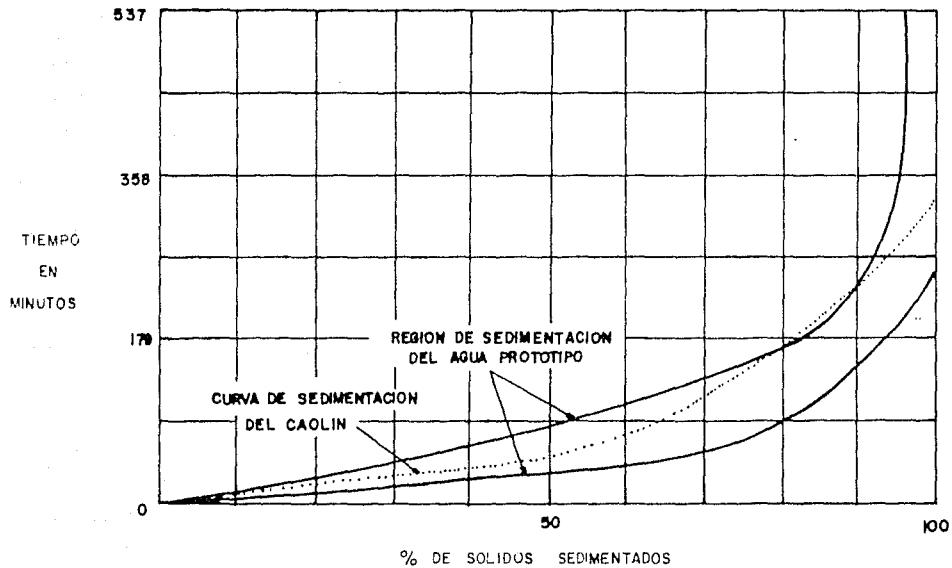


FIG. 13 CURVA DE SEDIMENTACION DEL CAOLIN

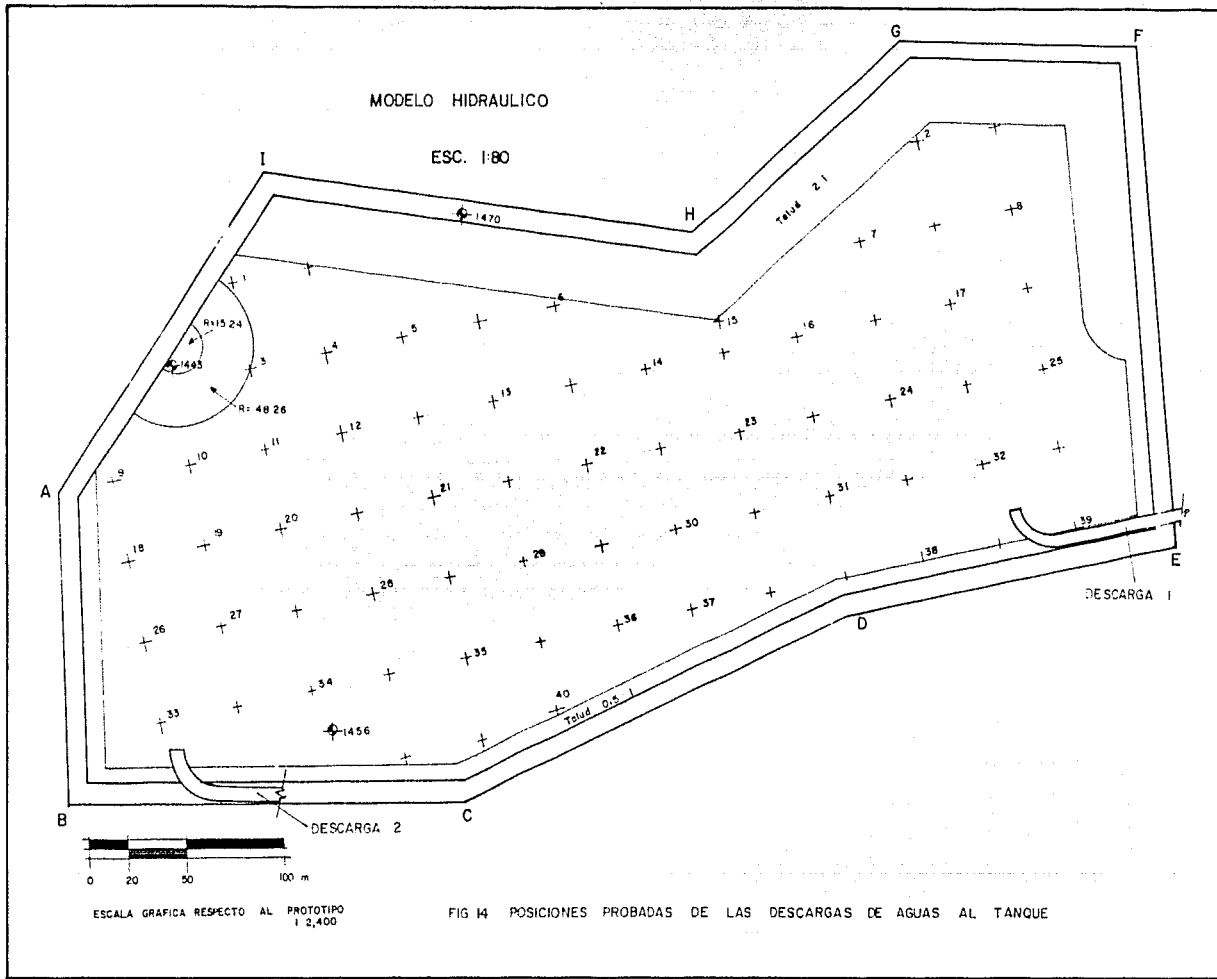
4.2.3.- Estudio de Trazado.

Asociar patrones de depósito de sedimentos en el tanque con diferentes posiciones de la descarga, era uno de los objetivos del estudio con trazador sólido. Para ello se analizaron dos posiciones de la descarga económicamente atractivas, ver fig 14. Se simularon dos días de operación con hidrograma correspondiente al mes de abril y operando la toma con un gasto de $52.6 \text{ m}^3/\text{s}$. La concentración de sedimentos fue de 9.85 ml/l . Al finalizar el 2do día de operación se drenó el tanque para realizar el levantamiento de distribución de sedimentos. Al realizar el análisis se observó la conveniencia de ampliar el periodo de simulación para la ubicación de la descarga más económica, por lo cual se simularon 8 días con una concentración de 8.5 ml/l .

El trazador se utilizó también en el análisis de la eficiencia de los sedimentadores, los esquemas analizados 4, se describen en el acápite 4.3.1, las condiciones simuladas corresponden a 3 días de operación continua con hidrograma típico del mes de abril, y la C_{ss} media fue de 8.5 ml/l .

4.2.4.- Confinamiento de los sedimentos.

A partir de las conclusiones del inciso anterior, se



considero conveniente la inclusión de un tanque de confinamiento de los sólidos o sedimentador primario, como el mostrado en la fig 15. Para el análisis de su funcionamiento se efectuó un ensaye, con condiciones de operación similares a los del inciso anterior, tiempo de simulación 8 días, etc. Los resultados se presentan en el acápite 5.2.2. Debido a los buenos resultados, se propusieron y estudiaron otras geometrias del sedimentador cercanas a la obra de toma. Se presenta el resultado de una de las simulaciones, de tres días de operación continúa ver fig 16. Como consecuencia de los resultados la siguiente parte del estudio fue analizar los factores que influyen en el diseño de un tanque sedimentador, para lo cual se recurrió a un estudio con trazador líquido.

4.3.- ESTUDIO CON TRAZADOR LIQUIDO.

4.3.1.- Ensayes.

Al detectarse que el 90% de los sólidos que ingresan al vaso se sedimentan en él en forma apreciablemente uniforme, se propuso confinar los sedimentos durante el tiempo de regulacion y posteriormente facilitar su remoción, por lo

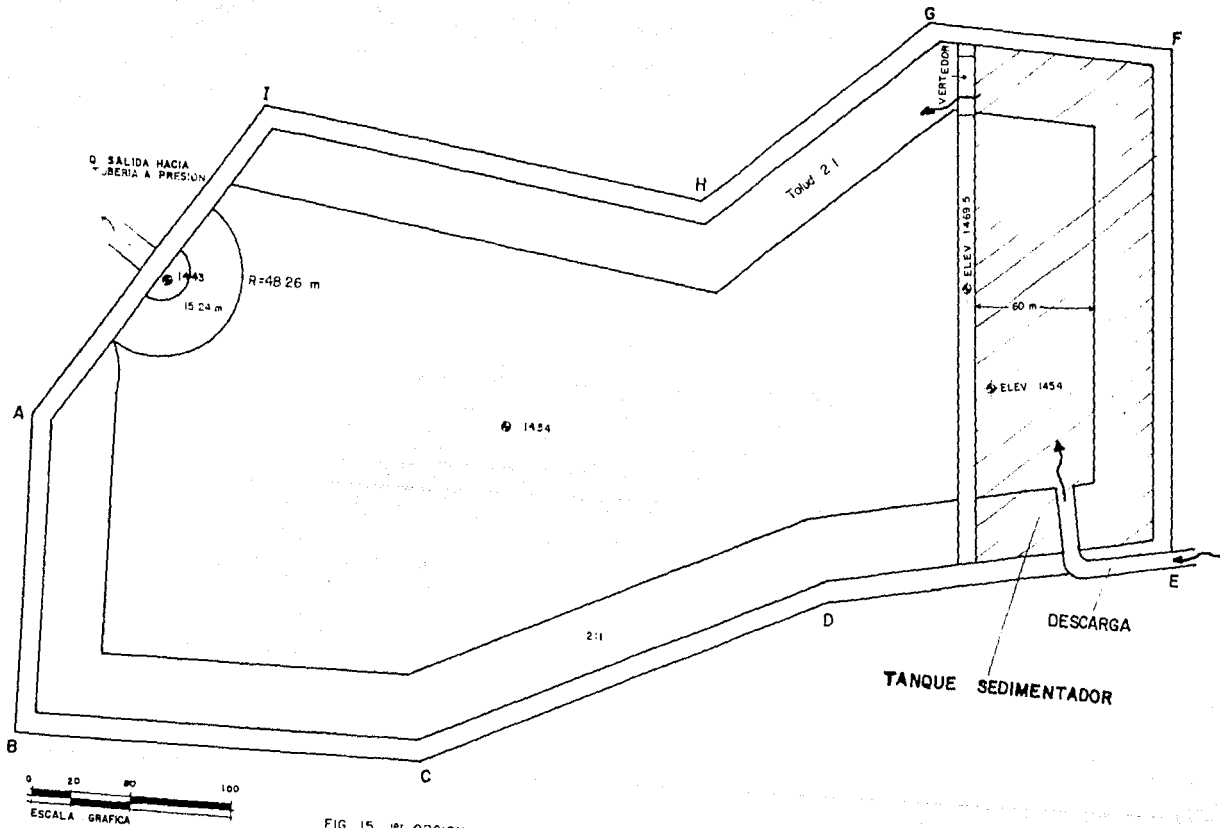


FIG. 15 1ª OPCION DEL TANQUE SEDIMENTADOR
 CON LA DESCARGA AL TANQUE REGULA-
 DOR EN EL VERTICE "E".

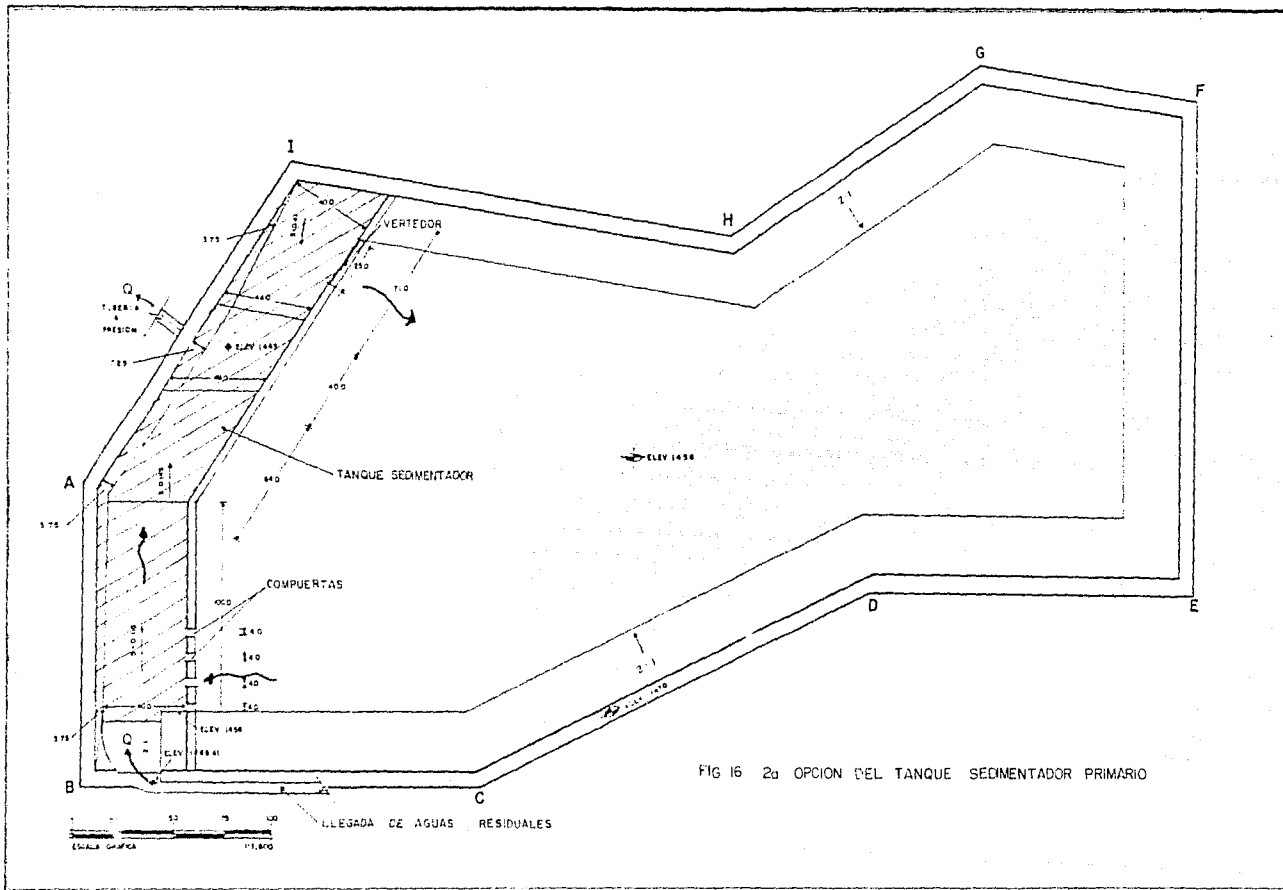


FIG 16 2a OPCION DEL TANQUE SEDIMENTADOR PRIMARIO

que surgió la propuesta de un tanque sedimentador, el cual se alojaría dentro del propio regulador, de manera que durante el periodo de regulación se retuvieran los sedimentos, y de ser posible, durante el periodo de generación, se aprovechará la capacidad de arrastre del flujo, causada por el descenso del nivel, para extraer por la obra de toma los sedimentos, realizándose de esta forma una operación de limpieza económica, prácticamente sin costo adicional.

Fundamentalmente son dos los factores que afectan la eficiencia de un tanque sedimentador, a saber: la carga superficial y la eficiencia hidráulica. La carga superficial es el cociente del gasto diario y el área superficial del sedimentador ($m^3/m^2/día$), la cual está directamente relacionada con la velocidad de sedimentación de los sólidos, por lo que debe fijarse en función del tipo de sólidos sedimentables. La eficiencia hidráulica, -distribución de tiempos de permanencia y tipo de flujo en el sistema sedimentador-, es función de las características del tanque y del flujo, -geometría, flujos de llegada y salida, etc -. La determinación de la velocidad de sedimentación se realizó con las pruebas en columna y el análisis de la eficiencia hidráulica se realizó en los modelos físicos aplicando la técnica estímulo-respuesta. Los ensayos se efectuaron usando eosina amarillenta. El

gasto empleado corresponde a $24 \text{ m}^3/\text{s}$, por ser el gasto medio de la última etapa de proyecto y considerar que el sedimentador habrá de funcionar eficientemente para este gasto. Durante cada ensayo se muestreó el flujo de salida hasta un tiempo del orden del triple del tiempo de permanencia teórico en el sedimentador (periodo de decaimiento de la señal de salida).

Desde el punto de vista de operación y economía resulta muy atractiva la opción de colocar el sedimentador cerca de la obra de toma, con esto el sistema es prácticamente autolimpiable, evitándose enormes problemas de operación. Los ensayos estuvieron encaminados al estudio de dos geometrías de sedimentador que cumpliendo con una carga superficial de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ y tiempo de permanencia de 2 h, sea económicamente atractivo. Para una de ellas se efectuaron modificaciones a la llegada y salida, por lo mismo se obtuvieron cuatro esquemas, ver figs 17 a 20, en la tabla 1, se muestran dimensiones y tiempos teóricos de permanencia para cada esquema. El esquema 1 tiene una geometría alargada con relación longitud-ancho mayor a 10, esto lo convierte teóricamente en muy eficiente, tiene a la llegada una ampliación y una caída, en tanto que la salida se conformó mediante un vertedor con 20 m de longitud de cresta; el esquema 2 tiene a la llegada desarenadores con forma cilíndrica, comunicados al sedimentador propiamente

T A B L A 1

CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTADORES

Esquema	Capacidad	Profundidad	Longitud	Ancho	L/A	Tiempo permanencia teórico
#	V (m ³)	H (m)	(m)	A (m)		T (hr)
1	191,900	7	565	40	14.0	2.20
2	258,250	8	300	90	3.3	2.99
3	283,100	9	300	90	3.3	3.28
4	283,100	9	300	90	3.3	3.28

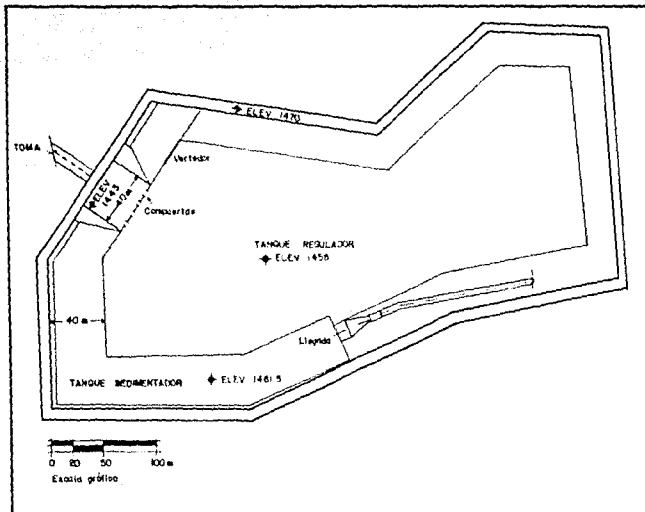


FIG. 17 Esquema del sedimentador 1 - tanque regulador - obra de toma.

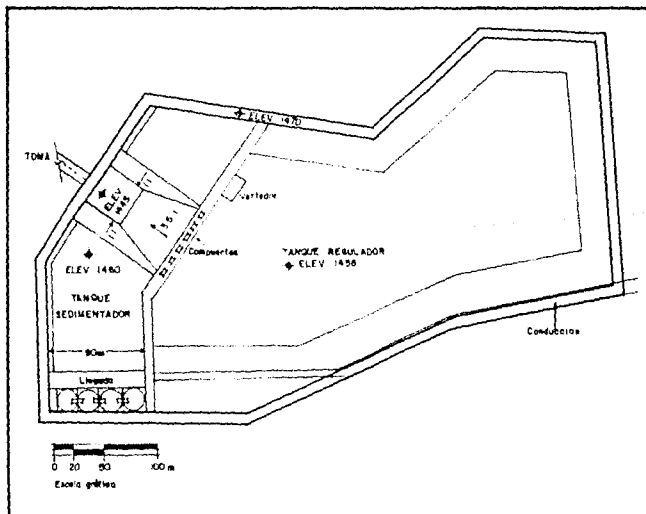


FIG. 18 Esquema del sedimentador 2 - tanque regulador - obra de toma.

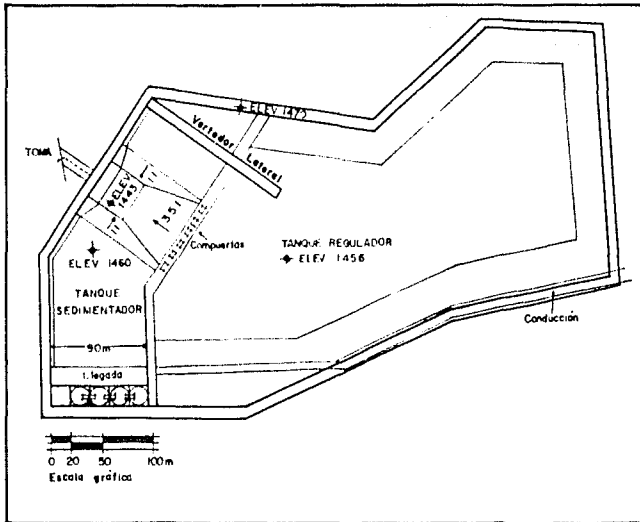


FIG.19 ESQUEMA DEL SEDIMENTADOR 3 - TANQUE REGULADOR - OBRA DE TOMA

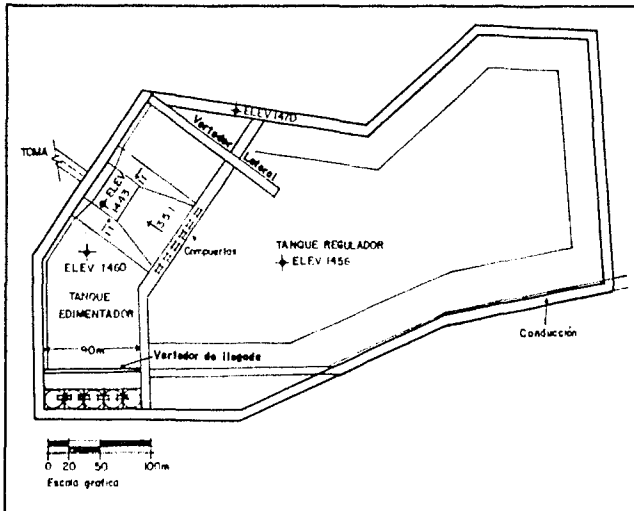


FIG.20 ESQUEMA DEL SEDIMENTADOR 4 - TANQUE REGULADOR - OBRA DE TOMA

dicho mediante pequeños vertedores, la salida está constituida por un vertedor igual al del esquema 1, la relación longitud-ancho es de 3, poco eficiente pero de mucho menor costo constructivo que el esquema anterior; el esquema 3 difiere del 2 en la salida, la cual se conforma por un vertedor lateral de igual longitud al ancho del sedimentador, lo que hace que pensar que distribuya mejor el flujo y aumente la eficiencia de remoción; y el esquema 4, difiere del 3 únicamente en cuanto a que en la llegada, después de los desarenadores, se dispuso un vertedor de la misma longitud que el de salida. La diferencia entre los esquemas 1 y 2, se proponen para identificar, por una parte, el efecto de la relación longitud/ancho sobre la eficiencia hidráulica y por el otro, el efecto del tirante sobre el arrastre de sedimentos. El esquema 2 parece el más económico y factible desde el punto de vista constructivo. En los esquemas 3 y 4, solamente se cambió la entrada y la salida para identificar su efecto sobre la eficiencia hidráulica.

4.3.2.- Técnica Estimulo-Respuesta.

La técnica estímulo respuesta permite evaluar la eficiencia hidráulica. Consiste en aplicar como señal delta, un trazador líquido o sólido disuelto (tinta, material fluorescente o radioactivo, etc.) a la entrada del

sedimentador y tomar muestras a la salida a intervalos que permitan registrar la variación de la concentración de trazador. La curva de concentración contra tiempo es indicador importante de la distribución de tiempos de permanencia del fluido en el sedimentador. Esta curva puede adimensionarse con la concentración inicial C_0 , (cantidad de trazador aplicada entre el volumen del sedimentador) y el tiempo teórico de retención T (volumen del tanque entre el gasto medio en el tanque). A partir de la curva de distribución de tiempos de permanencia, es posible evaluar la eficiencia hidráulica. El tiempo de permanencia real se considera igual a la abscisa del centro de gravedad de la distribución y se considera el principal indicador de zonas muertas. El tipo de flujo para el caso ideal, con distribución de velocidades uniforme y que recorre todo el tanque, es conocido como flujo pistón. Se le llama perfectamente mezclado, cuando equivale al flujo en un tanque agitado mecánicamente. En las refs 5, 6, 29, 30, 44, 50, 52 y 58, se proponen métodos de evaluación de la eficiencia hidráulica, los cuales proporcionan índices de la participación de flujos y del volumen activo del tanque.

En el estudio se utilizó como trazador eosina amarillenta, sustancia fácilmente soluble en agua y que es poco afectada por las sustancias ya disueltas en ella, ref 36. Para medir las concentraciones se utilizó fotolorímetro, con el que

directamente se mide la absorbancia de las diferentes muestras. Con la ayuda de una correlación previamente elaborada entre concentración y absorbancia, se estimó la primera, disponiendo así de los puntos para la elaboración de la curva de distribución, FTC, al estimar el centroide del área bajo esta curva y proyectarlo sobre el eje de las abscisas se obtiene el tiempo de permanencia real.

Para la evaluación de la eficiencia hidráulica se aplicó el método propuesto por Rebhun y Argaman ref 50, se basa en una función $F(t)$, que refleja la fracción de flujo cuyo tiempo de permanencia es menor que t y que para flujo perfectamente mezclado se define como:

$$F(t) = \frac{\int_0^t e^{-t/T} dt}{\int_0^{\infty} e^{-t/T} dt} = 1 - e^{-t/T} \quad (13)$$

Para un sistema real, determinaron que $F(t)$ tiene la siguiente forma:

$$F(t) = 1 - e^{\left\{ \frac{1}{(1-p)(1-m)} \frac{t}{T} - p(1-m) \right\}} \quad (14)$$

donde:

t es el tiempo transcurrido de la prueba.

T es el tiempo teórico de retención.

- m fracción muerta del volumen del tanque.
- 1-m fracción activa del volumen del tanque.
- p fracción de la parte efectiva con flujo pistón.
- 1-p fracción de la parte efectiva con flujo perfectamente mezclado.

Tomando logaritmos y reacomodando, la ec. 14, se tiene:

$$\text{Log } [1-F(t)] = \frac{-\log e}{(1-m)(1-p)} [t/T - p(1-m)] \quad (15)$$

Si se grafica $[1-F(t)]$ contra t/T en papel semilog., se obtiene una recta con pendiente $(\log e)/(1-m)(1-p)$. Para $F(t)=0$, $\text{Log } 1-F(t)=0$ y $t/T=p(1-m)$. Con la pendiente de la recta y el valor de t/T para $F(t)=0$, pueden calcularse m y p .

4.4. ESTUDIO EN MODELO 1:20.

4.4.1. Generalidades.

El estudio en este modelo, (Froude 1:20), ha estado supeditado a los resultados obtenidos en el modelo general y de las pruebas de sedimentación, pues éstas aportaron los parámetros para el diseño del sedimentador, de tal suerte que ha sido el menos estudiado hasta el momento, aunque será el que proporcione los elementos para el diseño de elementos

de detalle de los desarenadores, sedimentador, arrastre de sólidos, geometría del vertedor de salida, etc.

Los estudios que se han realizado son fundamentalmente acerca del funcionamiento de la obra de toma, considerando los elementos críticos, y análisis de eficiencia hidráulica con trazador líquido, esto último como elemento de comparación con el estudio en el modelo 1:80.

4.4.2. Presencia de Vórtices.

Se han efectuado pruebas con los esquemas 2 y 3 del tanque sedimentador, ver figs 18 y 19, con las diferentes elevaciones en el vaso, NAMO a NAMINO, simulando todo el periodo de turbinado, y con los gastos de 52.6 y 105.2 m³/s, para la detección de vórtices se ha utilizado permanganato de potasio como trazador.

4.4.3. Pruebas con trazador.

Para tener una mejor evaluación de la eficiencia hidráulica de los diferentes esquemas de tanque sedimentador se ha utilizado este modelo para reproducir algunos de los ensayos de trazado líquido llevados a cabo en el modelo general. Debido al tiempo de duración de cada prueba, 8 h incluyendo

preparativos; lo laborioso, se obtienen hasta 400 muestras de 200 ml; al alto costo, se requiere la presencia de 5 especialistas, amén de un volumen considerable de trazador (eosina amarillenta) necesario para la prueba y a que el diseño final del sedimentador se ha decidido hasta el mes de Octubre de 1989, sólo se han realizado dos de ellos, esperándose realizar cuando menos 4 más con el diseño definitivo. Los ensayos se efectuaron para el esquema 2 del tanque sedimentador, por ser el más factible desde el punto de vista constructivo. El procedimiento empleado en cada ensayo es el descrito para el modelo general, en los acápite 4.3.1 y 4.3.2., la única diferencia en el procedimiento, consiste en la forma de muestreo en el vertedor que comunica al regulador; debido a las dimensiones del modelo se deben obtener tres muestras de la descarga del vertedor para que sea representativa de la concentración de trazador.

4.5. ESTUDIO DE SEDIMENTACION.

4.5.1. Aspectos Generales.

Con objeto de conocer la naturaleza, composición, y comportamiento de los sólidos transportados en suspensión

por al agua de los ríos Atemajac y San Juan de Dios y con ellos determinar los parámetros de diseño de un tanque sedimentador; se diseñó y construyó una columna de sedimentación, su descripción y del equipo accesorio se ha hecho en el acápite 3.4.3..

El dispositivo experimental está construido de forma tal que se puede operar simulando la operación del vaso regulador de Agua Prieta o bien para la realización de pruebas estándar. Como sea que se opere, es posible obtener del dispositivo monitoreo de la temperatura a lo largo de ella, muestras del agua para la determinación en laboratorio de Csst, Cssp, Csvg, porcentaje de sólidos fijos y volátiles, además es posible conocer las concentraciones de sólidos sedimentables en peso y volumen que ingresan a la columna, los espesores de sólidos depositados, etc.

Las muestras son obtenidas conforme al protocolo de prueba indicado en la ref 60, se analizaron en el Laboratorio de Química Analítica del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., CIATEJ.

Los diferentes análisis químicos realizados se efectuaron conforme a los métodos estándar del APHA, ref 4, debido a que en estudios previos, ref 16, revelaron ser de una importancia tal que deben ser efectuados bajo estrictas normas de calidad.

Cabe notar que el procedimiento de prueba es aplicable a suspensiones con aproximadamente 2000 mg/l de sólidos suspendidos o cantidades menores, pues a partir de este nivel el contacto entre partículas y los efectos de cohesión son más pronunciados, exámenes previos a la realización de las pruebas permitieron verificar que en general se cumple esta restricción.

4.5.2. Simulación del Vaso.

La simulación de la operación del vaso de almacenamiento y regulador real se realiza controlando los niveles del líquido en la dispositivo experimental conforme al hidrograma de ingreso y salida de agua del tanque regulador para un periodo de 24 h.

Parte primordial de los trabajos de simulación es el monitoreo de la variación de la concentración de sólidos suspendidos totales, sedimentables, fijos, volátiles y temperaturas. Esta se realiza durante toda la prueba, al agua que ingresa a la columna, y a la que se encuentra dentro de ella, a intervalos de una hora y a todo lo largo de la columna.

4.5.3. Experimentos.

Se efectuaron 6 ensayos, todos con diferentes características de tiempo de llenado y procedencia del agua.

--Prueba A.- Se inició ésta a la 1.00 A.M. del 16 de agosto, con un hidrograma representativo del mes de agosto, el tiempo de llenado de la columna es de 16 h. Al concluir la prueba, después de 24 h de funcionamiento, la elevación de la superficie libre del agua dentro de ella fue 0.4 m.

La alimentación a la columna se realizó utilizando agua del río Atemajac, las muestras tomadas a cada hora de la columna, para determinación de Csst, son en total 123. Las muestras de 4 l, para determinación de Csst, Cssp, Csvg, y % de fijos, tomadas del agua con que se alimenta la columna fueron 15.

--Prueba B.- La prueba dió inicio a la 1 A.M. del día 18 de agosto, se utilizó agua del río San Juan de Dios. El hidrograma fue del mes de Agosto, se obtuvieron 122 muestras de la columna para la determinación de Csst y 15 del agua agregada para determinación de Csst, Csvg, Cssp y % de fijos y volátiles.

--Prueba C.- El hidrograma usado corresponde al mes de junio con un tiempo de llenado de 19 h, y 5 h de turbinado. Las elevaciones de la superficie libre del líquido dentro de la

columna para cada instante de la prueba se pueden observar en la ref. 17. La prueba dió comienzo el día 22 de agosto a la 1 A.M., con agua del río Atemajac. Se obtuvieron 129 muestras de la columna para determinación de Csst, y 17 muestras del agua agregada para determinación de Csst, Cssp, Csvg, y % de fijos y volátiles.

--Prueba D.-Operando la columna con el mismo hidrograma que la prueba anterior, la prueba se realizó a partir de la 1:00 A.M. del día 23 de agosto, con agua del río San Juan de Dios. Se analizaron 129 muestras de la columna y 17 del agua agregada.

--Prueba E.-Para tener una mejor simulación del tanque se efectuaron dos pruebas con cada uno de los hidrogramas anteriores, pero con una mezcla 1:1 del agua de los ríos Atemajac y San Juan. En ésta, la columna se llena en 16 h, y se vacía en 8 h, se analizaron 123 muestras de 40 ml y 13 de 4 l.

--Prueba F.-El control de niveles corresponde a un hidrograma del mes de junio, 5 h de turbinado y 19 de llenado. La prueba inició a la 1:00 del 28 de agosto. Se agregó agua de los ríos Atemajac y San Juan en proporción 1:1. Se tomaron 129 muestras de 40 ml y 13 de 4 l para el análisis químico.

4.5.4. Pruebas Estándar.

Esta prueba es la recomendada para la obtención de parámetros de diseño en los manuales de proyecto de sedimentadores o clarificadores primarios que manejan partículas floculantes. Todo el protocolo de prueba se presenta en la ref 60, la única variación que se tiene para las pruebas realizadas consiste en el tamaño de la columna, normalmente se estudian y construyen sedimentadores de 2.5 a 4.0 m de profundidad y en este caso el sedimentador y la columna son de 10 m. Esto origina problemas para el muestreo, control de temperatura y homogeneidad inicial del líquido, complicándose la ejecución e interpretación de los resultados de la prueba por estos efectos.

En estas pruebas la columna se llena por gravedad, (280 l) en 3 min, cuidándose que sea lo más homogénea posible. Se espera de 2 a 3 min a que se estabilice la mezcla y se proceda a tomar las muestras iniciales 4, después se toman 10 muestras de 40 ml a cada 25 min, excepto la última que es a los 120 min.

A cada una de las muestras, 54 en total se le determina la Csst. Del agua utilizada para llenar la columna se extrae una muestra de 4 l para determinar en laboratorio; Csst.

Cssp, Csvg y % de fijos y volátiles.

En el escrito se presentan 4, del total de 10, pruebas efectuadas en el dispositivo, a continuación se presenta una brevisima descripción de ellas:

--Prueba S10-1.-Se realizó a las 6:50 A.M., del día 17 de agosto, se utilizó agua del río Atemajac.

--Prueba S.-Se efectuó a las 12:45 P.M., del día 29 de agosto, con agua del río Atemajac.

--Prueba Q.-Llevada a cabo a la 1:20 P.M., del día 30 de agosto, con mezcla en proporción 1:1 de agua de los 2 ríos.

--Prueba R.-Realizada con mezcla 1:1 de agua de los 2 ríos, la prueba inició a las 17:12 del día 30 de agosto.

5.- ANALISIS DE RESULTADOS.

5.1.- FUNCIONAMIENTO GENERAL, TANQUE REGULADOR.

5.1.1.-Ubicación de la Obra de Toma.

En la tabla 2 se presentan los resultados del funcionamiento de las 2 obras de toma, ver fig 11, para 10 diferentes elevaciones de la superficie libre en el vaso. La nomenclatura corresponde a la del American Research Laboratory, ARL. Se observa en la operación de la toma No 1 la presencia de vórtices tipo 1 en la elev 1469, misma que corresponde con el Nivel de Aguas Máximo Ordinario, (NAMO), la intensidad de los vórtices aumenta al disminuir el nivel de tal forma que ocurren del tipo 4 desde la elev 1461 hasta el NAMINO, en forma intermitente. La toma 2 o lateral funciona sin presencia de vórtices desde el NAMO hasta la

T A B L A 2

COMPARACION DEL FUNCIONAMIENTO ENTRE LA TOMA EN TORRE Y LA TOMA LATERAL
EN MODELO EBO. 1961

ELEVACION (m)	FUNCIONAMIENTO DE LA TOMA 1	OBSERVACIONES	FUNCIONAMIENTO DE LA TOMA 2	OBSERVACIONES
1469 NAMO	VT 1		Sin vortices	
1468	VT 2	Intermitente	Sin vortices	
1467	VT 2	Continuo	Sin vortices	
1466	VT 2	Continuo	Sin vortices	
1464	VT 3	Intermitente	Sin vortices	
1462	VT 3	Intermitente	Sin vortices	
1461	VT 4	Intermitente	Sin vortices	
1460	VT 4	Intermitente	Sin vortices	
1459	VT 4		VT 2	Su presencia se debe a la separacion del flujo en el vertice I
1458 NAMIND	VT 4	intermitente	VT 2	Su presencia se debe a la separacion del flujo en el vertice I

elev. 1460, a partir de ese nivel se origina un vórtice, tipo 2, que proviene del vértice I del tanque, causado por separación del flujo.

Como se observa la toma lateral funciona mucho mejor que la toma central, por lo que se recomienda sólo seguir analizando la primera de ellas. Eliminando el vértice I el funcionamiento general sería más satisfactorio.

5.1.2.- Funcionamiento Hidráulico.

Se realizaron 4 ensayos, en todos ellos la descarga se ubica en el vértice D y mediante una rápida se lleva el agua hasta el piso del tanque. Se estudiaron las siguientes condiciones hidráulicas, ref 12;

-Elev, NAMO, Hidrograma, abril gasto por la toma $52.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

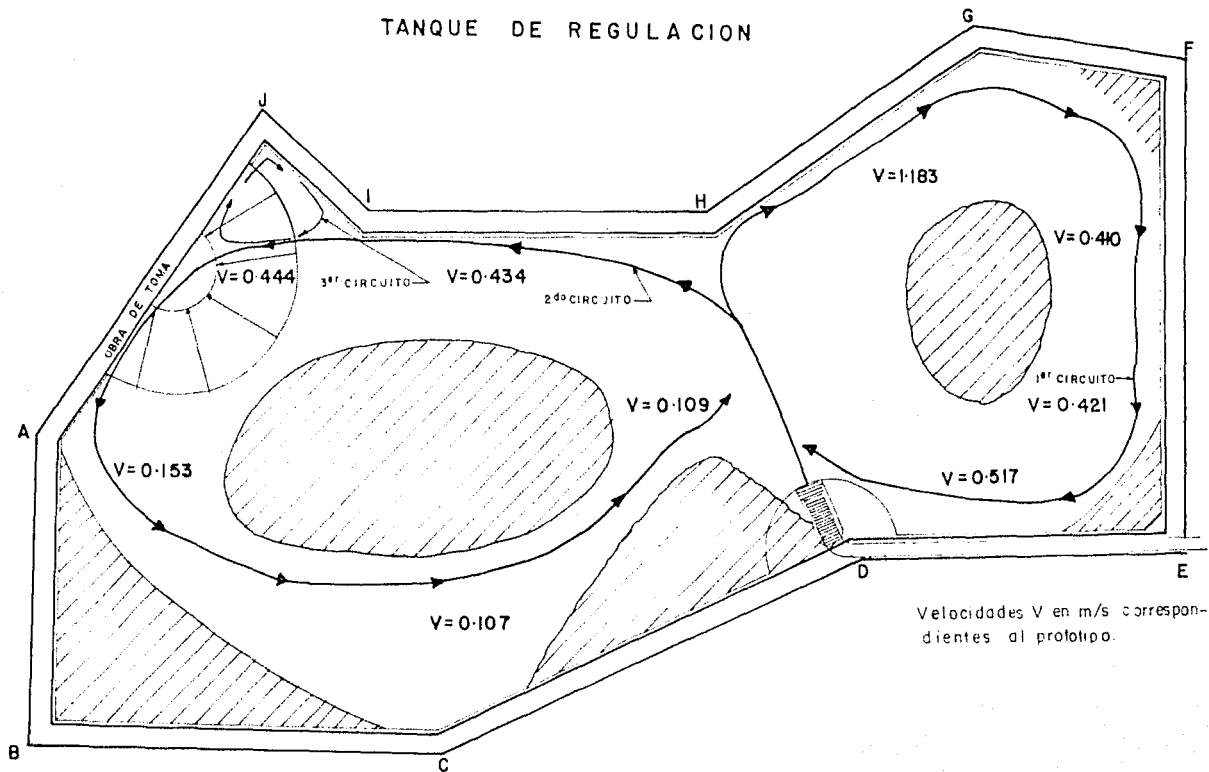
-Elev, NAMINO, Hidrograma abril, sin operar la toma.

-Elev, NAMO, Hidrograma, julio, gasto de $52.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

-Elev, NAMINO, Hidrograma, julio, sin operar la toma.

En todos los casos se presentan 3 circuitos de circulación del flujo, ver fig. 21, se muestran los resultados del 4to ensayo, las velocidades máximas estimadas son del orden de 1.18 m/s , con un mínimo de 0.05 m/s . El vértice I presenta separación del flujo, y genera una estela vorticiosa en

ESQUEMA DEL MODELO HIDRAULICO ESCALA 1:80 DEL
TANQUE DE REGULACION



Velocidades V en m/s correspondientes al prototipo.

ENSAYO: tipo 4

FECHA: 5-XI-86

FIG 21 FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO

dirección a la Toma.

Los resultados sugieren eliminar la separación del flujo del vértice I y estimar el impacto de las zonas muertas en el distribución de sedimentos en el vaso.

5.1.3.- Depósito de sedimentos.

Se presentan los resultados de los ensayos con trazadores sólidos, baquelita, arena, arcilla y caolín.

La baquelita se deposita formando una duna cerca de la descarga, una parte se mantiene flotando en forma de "flóculos", que tardan en caer. El depósito de la arena es muy próximo a la descarga. Consiste en una duna mayor a la formada por la baquelita y avanza muy lentamente por el fondo. La arcilla tiene un patrón distinto al de los otros materiales; una parte se deposita en forma de duna cerca de la descarga y otra se distribuye uniformemente en el resto del tanque.

Se observa que ninguno de los materiales simula el comportamiento observado en el vaso de la Experiencia, por lo tanto y en base al análisis del inciso 4.2.2. se decidió probar al caolín micronizado, que al no ser arcilloso no presenta floculación importante.

5.2.- ESTUDIO DE TRAZADO.

5.2.1.- Localización de la Descarga

Como uno de los objetivos iniciales era analizar la influencia de la ubicación de la descarga en la distribución de los sedimentos en el vaso se analizaron dos posiciones de ésta, ver fig 14.

Los depósitos asociados son muy similares entre ellas de 13 a 30 cm de espesor en ambos casos, y los volúmenes de sólidos retenidos son prácticamente iguales 87 % .

Con estos resultados se infieren dos aspectos de interés, la posición de la descarga es irrelevante para la distribución del sedimento y del volumen de lodos que llegue al tanque, aprox. 6000 m³/día el 87% se quedará en él. El problema de limpieza y disposición de sólidos será muy grave y sobre todo costoso, sin olvidar otros aspectos que se ocurren como la descomposición de la materia orgánica y la consecuente generación de ácido sulfhídrico, metano, etc.

En vista de la gravedad del problema se realizó un ensaye más para detectar si con mayor tiempo de operación las cosas cambian. Se simularon 8 días de funcionamiento, el volumen

retenido es del 90% respecto al que ingreso al vaso.

Por esto mismo y por las observaciones de campo se considera indispensable preveer en el diseño la forma de facilitar la evacuación de los lodos en un área restringida y disponer de un sistema de limpieza económico.

5.2.2.- Confinamiento de los sedimentos.

A partir de las conclusiones anteriores se estudiaron diferentes estructuras sedimentadoras dentro del tanque regulador. La primera de ellas se muestra en la fig. 15, se encuentra muy alejada de la toma, se observaba como factible y económico, concentrar los lodos en esta zona y después verterlos hacia la barranca que se ubica hacia el fondo del sedimentador.

Se realizaron varios ensayos concluyéndose que el 63% de los lodos se deposita en el sedimentador, 32% pasa al vaso regulador y 5% pasa por la obra de toma. Parece factible la idea de confinar los sedimentos en un área reducida, incluso con un buen diseño debe poderse mejorar el porcentaje retenido. Por otro lado, si el tanque sedimentador se diseña de manera que quede dentro de él la obra de toma, puede incrementarse la proporción de sedimentos que sean arrastrados durante la operación de ésta.

Con este esquema del tanque, todo el vaso regulador necesitaría limpiarse eventualmente reduciendo considerablemente los costos por mantenimiento.

La fig 22 muestra un esquema como el sugerido, para éste se simularon 3 días de operación continua, obteniéndose como resultado que el tanque sedimentador retiene el 42.5 % del total de sedimento, 51.6 % para el tanque regulador y sólo el 5.9 % de los lodos pasa por la obra de toma. Es probable que se produzca poco arrastre debido a los tirantes tan grandes, bajas velocidades, en el sedimentador en el periodo de generación.

Como puede observarse es necesario profundizar en el diseño de tanques sedimentadores para aspirar a tener uno que garantice eficiencias mayores al 60 o 70 %, que son los valores que manejan los diseñadores de plantas de tratamiento de aguas negras. Por tanto se procedió a analizar otros esquemas con dos análisis en paralelo trazador sólido y trazador líquido.

5.2.3.- Análisis de alternativas.

Siguiendo las recomendaciones de la literatura sobre el tema se configuraron 4 esquemas de sedimentador, descritos en el acápite 4.3.1. La carga superficial de ellos es de

aproximadamente $50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$, la relación longitud-ancho óptima es de 10, ref 54. El tiempo de permanencia es en todos los casos mayor a 2 h. Durante el vaciado se operó de tal suerte que existan tirantes pequeños. Aunque en la literatura se habla de que la profundidad es un parámetro poco importante, lo cierto es que los sedimentadores normales no pasan de 4 m. En este caso se tienen tirantes del orden de 7 a 9 m, estos mismos conceptos se discuten ampliamente en la refs 7 y 51.

La simulación consiste en agregar una cierta cantidad de sólidos sedimentables al agua, se descargan en un extremo del tanque sedimentador, donde permanecen aproximadamente 2 h. Mediante un vertedor dispuesto al otro extremo del sedimentador pasan al tanque regulador, hasta que los dos tanques alcancen el NAMO. En este momento se abre la compuerta de la obra de toma de la turbina y se inicia el vaciado del tanque sedimentador primero, poco después se abren las 6 compuertas que comunican ambos tanques y se establece el flujo del regulador hacia el sedimentador. En esta etapa durante la última hora se presentan tirantes pequeños que permiten la resuspensión de parte del material depositado en el fondo y es arrastrado hacia la obra de toma y enviado hacia la turbina. Como resultado de la simulación se puede concluir lo siguiente:

Esquema 1.- El depósito de sedimento al final del estudio se presenta en la fig 23. Del total de sólidos sedimentables el 75.8 % fue enviado hacia la obra de toma, 11.5 % se queda depositado en el sedimentador y 12.7 % se quedó depositado en el vaso regulador.

Esquema 2.- Un 9 % de los sólidos se quedó sedimentado en el vaso regulador, 51 % se deposita en el sedimentador y un 40 % es enviado a la turbina, ver fig 24.

Esquema 3.- El estado al final del ensaye es que un 16 % se sedimenta en el vaso de almacenamiento y regulación, 37 % pasa por la turbina y un 47% se deposita en el sedimentador, ver fig 25.

Esquema 4.- Los resultados mostrados en la fig 26, indican que 52 % quedó depositado en el piso del tanque sedimentador, 21 % pasa al vaso de regulación y 27 % es enviado hacia la turbina.

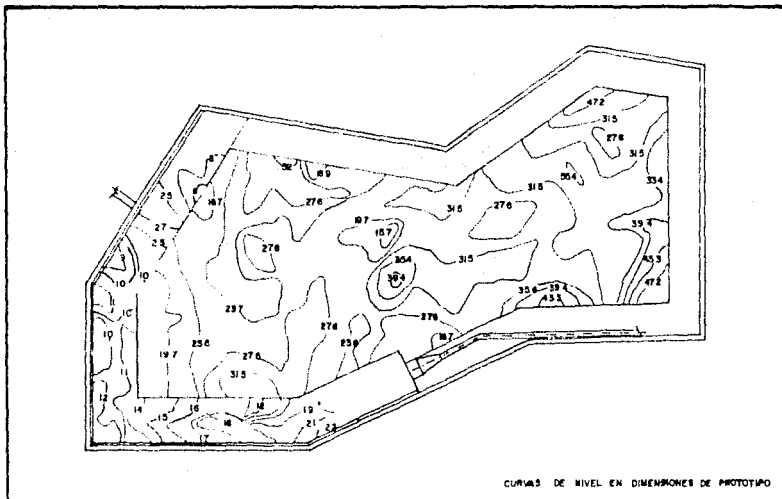


FIG. 23 Depósito de sedimentos en el esquema 1.

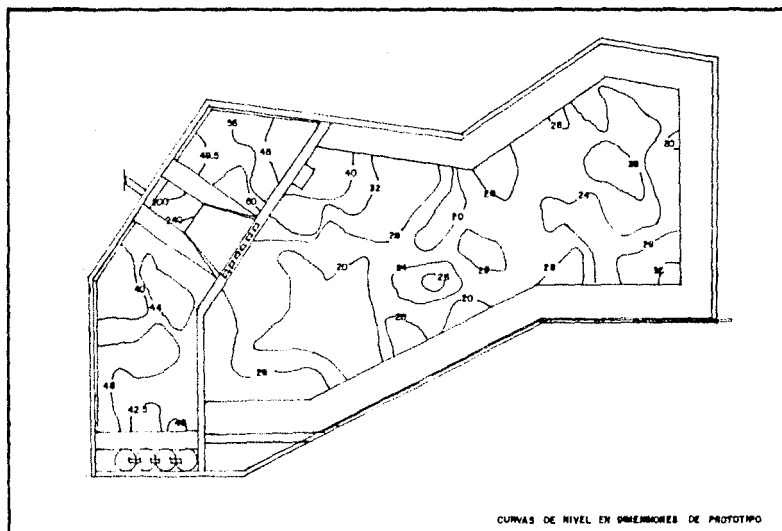


FIG. 24 Depósito de sedimentos en el esquema 2.

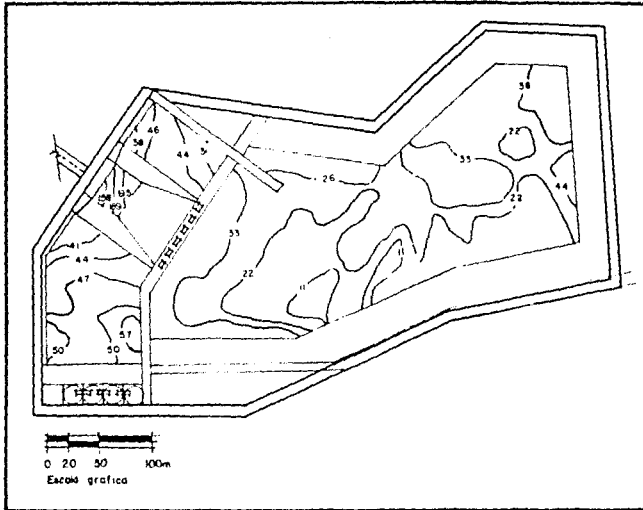


FIG.25 DEPOSITO DE SEDIMENTOS EN EL ESQUEMA 3

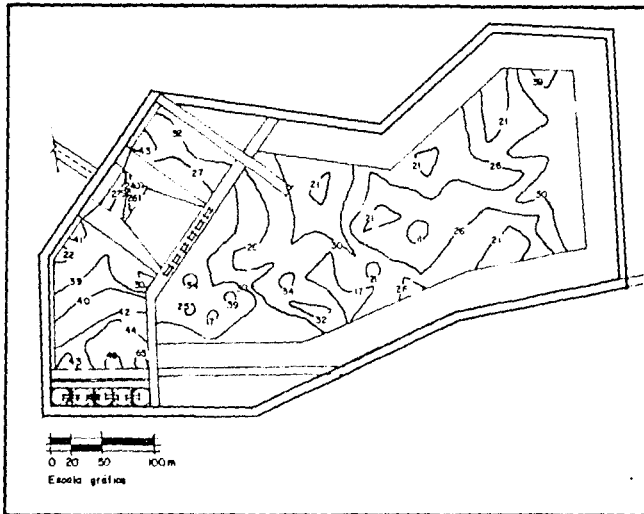


FIG.26 DEPOSITO DE SEDIMENTOS EN EL ESQUEMA 4

5.3.- DETERMINACIÓN DE TIEMPO DE PERMANENCIA Y EFICIENCIA HIDRAULICA CON TRAZADOR LIQUIDO.

En lo siguiente se presentan y analizan los resultados obtenidos del estudio de cada uno de los esquemas anteriores pero ahora utilizando eosina como trazador líquido, la técnica estímulo - respuesta y el método de Argaman y Rebhun para evaluar la eficiencia hidráulica, ref 26.

Esquema 1.- La proporción activa del volumen del sedimentador fue de 66%, es decir 34 % son zonas muertas. De la proporción activa 66 % tiene flujo pistón, es decir 44 % del total del volumen y 34 % flujo perfectamente mezclado o sea 22 % del total. El tiempo de permanencia real t_r , es de 1.43 h, esto es 65 % del teórico, en las figs 27 y 28 se muestran las curvas de distribución de tiempos de permanencia y $F(t)$ vs t , respectivamente.

La alta proporción de zonas muertas puede atribuirse a los cambios de dirección por la geometría del sedimentador, se puede mejorar suavizando las esquinas.

Esquema 2.- La proporción activa es de 99 %, prácticamente no hay zonas muertas. De la parte activa 45 % es flujo pistón y 55 % perfectamente mezclado. El tiempo de

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

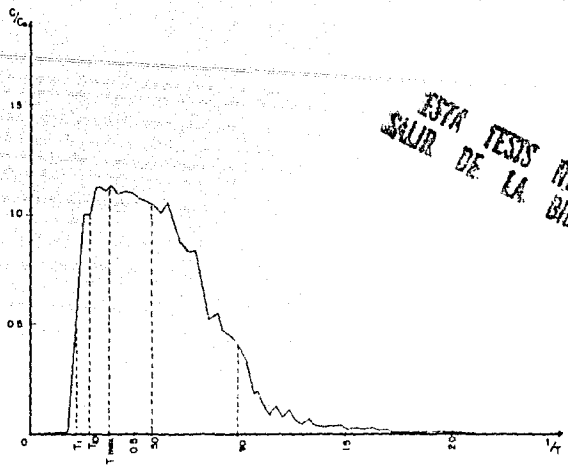


FIG. 27 Distribución de tiempo de permanencia del esquema I.

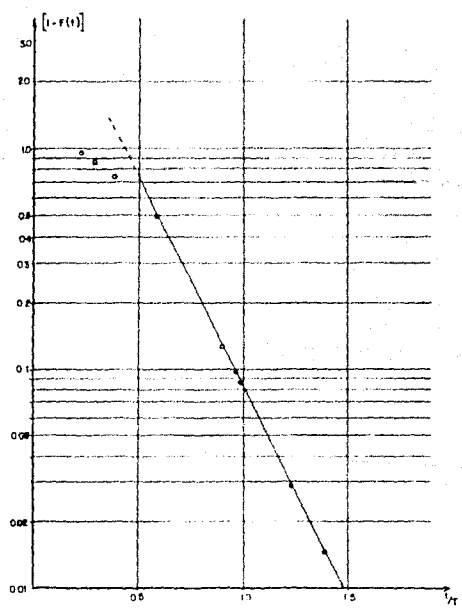


FIG. 28 Curva $(1-F(t))$ vs t/T del esquema I.

permanencia real fué de 2.92 h, es decir 98 % del teórico. Las figs 29 y 30 muestran las curvas de distribución de tiempos de permanencia y $F(t)$ vs t . Debe notarse que a pesar de tener tan alta proporción de zona activa, se tiene alta proporción de flujo perfectamente mezclado, esto es corrientes secundarias, muy probablemente por las condiciones de llegada y salida.

Esquema 3.- La parte activa es de 67 %, de ésta 29 % es flujo pistón o "uniforme", y en el 71 % de la parte activa se tiene flujo perfectamente mezclado. El tiempo de permanencia real es de 2.99 h, 91% del teórico. En este esquema se presenta una mayor proporción de zonas muertas, debido al cambio de tirante y de condiciones de salida.

Esquema 4.- 52 % del volumen es zona muerta. La proporción con flujo "uniforme", de la parte activa, fue 42 % y con corrientes secundarias 58% y respecto del total 20 % y 28 %. El tiempo de permanencia real es de 2.46 h, 75 % del teórico. Este esquema comparado con el 3 tiene mayor proporción de zonas muertas, puede atribuirse al cambio en las condiciones de llegada.

Puede observarse que el esquema 1 tiene una considerable proporción de flujo pistón, aunque una considerable cantidad de zonas muertas, esto obedece a su relación longitud ancho

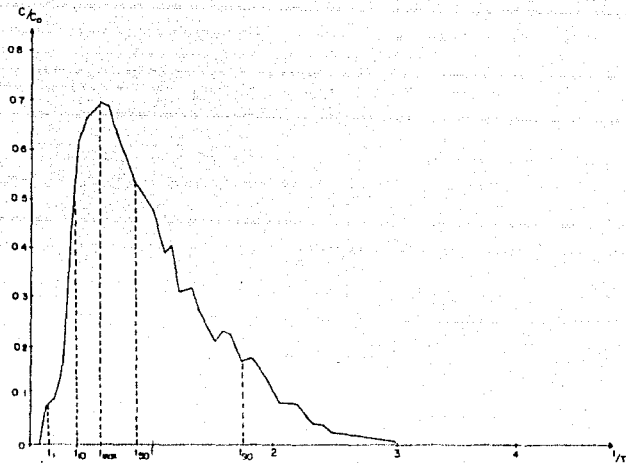


FIG. 29 Distribución de tiempo de permanencia del esquema 2.

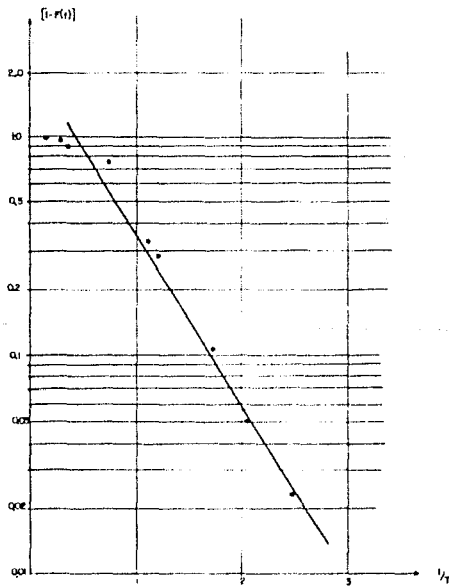


FIG. 30 $(1 - F(t))$ vs t/T del esquema 2.

se aproxima al óptimo. Debido a ésto y a su menor tirante se produce mayor arrastre de sedimentos que en los otros esquemas y deja pasar poco sedimento al regulador. Sin embargo, constructivamente es más costoso que las otras opciones, como en el aspecto de retención de sólidos su eficiencia es del mismo orden que los otros esquemas se descartará y en lo sucesivo se trabajará en la optimización de esquemas como los 2,3 y 4. En éstos se tiene resultados satisfactorios en cuanto a la retención de sólidos. El trabajo debe concentrarse en la forma de facilitar la remoción de lodos, de forma tal que la mayor proporción posible pase automáticamente por la obra de toma.

Debe tenerse especial cuidado en las condiciones de llegada y salida, en la profundidad del tanque y en la determinación de las velocidades de arrastre de los lodos.

5.4.- ESTUDIO EN MODELO 1 :20.

5.4.1.-Presencia de Vórtices.

A lo largo de los ensayos en este modelo no se ha presentado vorticidad en ninguno de los ensayos efectuados (tabla 3). Cabe destacar que actualmente se realizan estudios con

diferentes operaciones de las 6 compuertas que se tienen para comunicar regulador con sedimentador, y en principio no se han presentado problemas, solo resta analizar con gasto distorsionado, para poder garantizar que en ningún caso exista vorticidad.

De los casos estudiados, la diferencia se presenta en el fondo del sedimentador, el caso critico fué piso con pendiente de 0.025, la elev. a la salida del desarenador es 1462 y en la zona antes de la obra de toma es la elev. 1458.

5.4.2.- Pruebas de trazado

Se efectuaron dos ensayos con trazado líquido, para el esquema 2 del tanque, se obtuvieron los siguientes resultados:

Ensayo 1.- La fracción activa es de 53.4 %, las zonas muertas son 46.6 %, de la parte activa del tanque 41.2 % es flujo pistón y el 58.8 % es flujo perfectamente mezclado. Esto es, sólo en el 22 % del total del tanque presenta flujo pistón. El tiempo de retención real es de 2.37 h, que es el 77% del tiempo teórico.

Ensayo 2.- La fracción activa resulta del 45.1 %, las zonas muertas el 54.9 % . De la parte activa el 57.0 % es flujo pistón y el 43.0 % es flujo perfectamente mezclado. El 25.7

T A B L A 3

FUNCIONAMIENTO DE LA OBRA DE TOMA EN MODELO 1:20

ELEVACION (m)	FUNCIONAMIENTO DE LA TOMA LATERAL	OBSERVACIONES
1469.00	-----	Sin vórtices
1467.87	-----	"
1466.71	-----	"
1465.51	-----	"
1464.26	-----	"
1462.96	-----	"
1461.62	-----	"
1460.26	-----	"
1458.86	-----	"
1458.00	-----	"
1456.00	-----	"

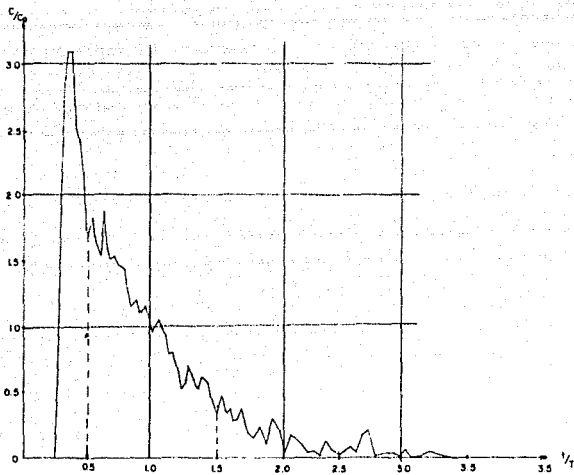


FIG. 31 Distribución de tiempo de permanencia del esquema 2, en modelo I-20

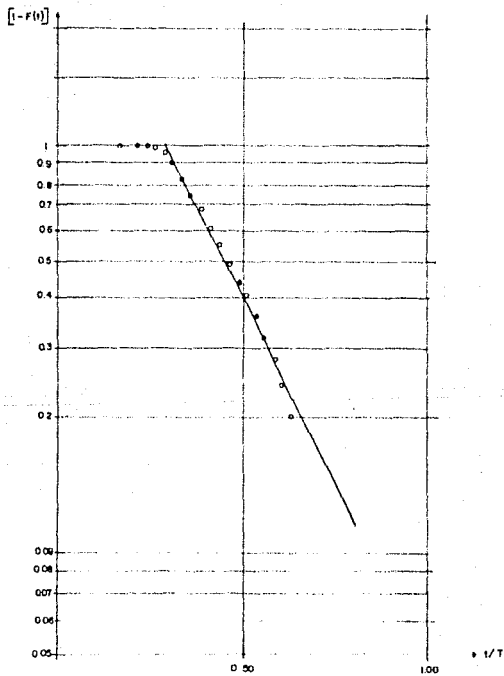


FIG. 32 $[1-F(t)]$ vs $1/T$ del esquema 2, en modelo I-20

% del total del flujo es "uniforme". Las figs 31 y 32 presentan las curvas de distribución de tiempos de permanencia y los de $F(t)$ vs t para este caso, el tiempo de retención real fue de 2,68 h (87 % del teórico).

Se destaca la enorme diferencia entre los resultados en este modelo comparados con los del modelo 1 : 80. Por ejemplo, la parte activa varía de 99 % a 50 %, sin duda el efecto de escala es muy importante y los efectos de temperatura pueden afectar el ensayo en el modelo 1 : 20, la eosina es muy sensible a ella. Las condiciones de llegada y salida son mucho más importantes en el modelo 1:20, o cuando menos parecen serlo, éste efecto será favorable para definición de detalles finales en estudios posteriores.

Puede concluirse que es necesario realizar más ensayos en el modelo 1 : 20 para definir los tiempos de permanencia real de los esquemas que finalmente sean los factibles de construcción, el estudio deberá enfocarse al análisis de las condiciones de llegada, por ser el parámetro más importante de diseño desde el punto de vista de funcionamiento hidráulico.

5.5.- ESTUDIO DE SEDIMENTACION.

5.5.1.- Simulación del vaso.

Resultados. Todos los resultados de las pruebas se presentan en la ref 17, por cuestiones de espacio sólo se presentan los de las pruebas E y F. Las tablas 4 y 5 muestran los registros de las temperaturas del medio ambiente, y del agua en toda la columna, y la concentración de sólidos suspendidos totales Csst (durante las 24 h que duraba cada ensaye). En las tablas 6 y 7 se presentan los resultados de los análisis realizados al agua que se agregaba a la columna. Los espesores de depósito en el piso son para cada para cada prueba; A.- 2.5 cm, B.- 11.6 cm, C.- 3 cm, D.- 12.8, E.- 7.5 cm, F.- 6.8 cm.

Análisis.- El método de alimentación y en general el experimento permitió simular el proceso de sedimentación tal y como se daría en el tanque regulador real. Se evitó la formación de corrientes secundarias por efecto de la alimentación. Como se esperaba, se presentaron importantes cantidades de materia inorgánica sobre todo en el río Atemajac. Sin embargo, de la mezcla 1:1 que es la importante por ser la que llega al tanque sedimentador tiene entre 54 % y 65 %. Se presenta poca generación de gas en

PRUEBA E (AGOSTO 25) INICIO 1:00 HS. HIDROGRAMA DE AGOSTO, LLENADO EN 16 HORAS CON MEZCLA 50-50
 Concentracion de Solidos Suspendidos Totales (Csst. mg/l), Temperatura en la toma respectiva (Temp. C)

TIEMPO, hrs.	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
# TOMA / PROF. #	Csst	Csst	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp
1	9.0											
2	8.0											
3	7.0											
4	6.0										50.0	22.0
5	5.0									50.0	22.5	45.0
6	4.0									57.5	23.0	35.0
7	3.0									52.5	21.5	50.0
8	2.0									45.0	22.5	57.5
9	1.0									50.0	21.0	97.5
10	0.5									67.5	22.0	127.5
TEMP. ANB. C	19.6	19.8	19.0	18.0	17.8	18.5	19.0	19.5	20.0	22.0	22.0	23.0
ELEV. m.	0.7	0.9	1.4	1.9	2.4	2.8	3.5	4.1	4.8	5.4	6	6.7

TIEMPO, hrs.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
# TOMA / PROF. #	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp
1	9.0											
2	8.0											
3	7.0											
4	6.0											
5	5.0											
6	4.0											
7	3.0											
8	2.0											
9	1.0											
10	0.5											
TEMP. ANB. C	23.0	23.5	22.8	23.0	22.0	22.0	22.0	22.0	21.5	20.2	20.0	20.0
ELEV. m.	7.5	8.3	9.2	10.0	8.8	7.6	6.4	5.2	4.0	2.8	1.6	0.4

T A B L A 4

PRUEBA F (AGOSTO 23) INICIO 1:00 HS. HIDROGRAMA DE AGOSTO, LLENADO EN 19 HORAS CON MEZCLA 50-50

Concentración de Sólidos Suspending Totales (Csst, mg/l), Temperatura en la tona respectiva (Temp. C)

TIEMPO, hrs.	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
# TONN / PROF. #	Csst	Csst	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp
1	9.0											
2	8.0											
3	7.0											
4	6.0											
5	5.0											75.0 26.1
6	4.0									85.0 22.0	57.5 23.0	75.0 24.6
7	3.0							75.0 19.0	70.0 20.0	80.0 22.0	82.5 23.1	67.5 24.6
8	2.0					62.5 18.8	80.0 19.0	75.0 19.0	92.5 20.2	75.0 21.6	97.5 23.1	75.0 24.3
9	1.0		60.0 18.5	62.5 18.8	75.0 18.5	75.0 18.5	75.0 19.0	85.0 18.8	107.5 20.0	90.0 21.3	170.0 22.8	110.0 24.0
10	0.5	92.5	82.5 75.0	82.5	67.5	72.5	80.0	92.5	145.0	90.0	182.5	97.5
TEMP. AMB. C	17.8	18.0	17.8	18.0	17.8	18.0	18.8	19.5	24.0	25.0	24.9	27.0
ELEV. m.	0.6	0.8	1.2	1.5	1.9	2.3	2.8	3.3	3.9	4.4	4.9	5.4

TIEMPO, hrs.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
# TONN / PROF. #	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	Csst	Temp	
1	9.0					60.0	45.0 25.2						
2	8.0				72.5 27.2	47.5 26.0	47.5	50.0 24.7	70.0 24.3				
3	7.0			75.0 27.1	72.5 27.1	67.5 26.2	85.0	57.5 25.1	77.5 25.0	60.0 24.8			
4	6.0	57.5 25.5	37.5 25.9	47.5 26.2	70.0 26.8	67.5 26.0	62.5	52.5 25.1	67.5 25.1	60.0 24.5			
5	5.0	70.0 27.0	65.0 29.0	62.5 27.6	67.5 26.8	67.5 25.2	55.0	50.0 23.9	67.5 23.2	72.5 22.5	80.0 22.8		
6	4.0	52.5 25.9	67.5 26.9	55.0 27.0	62.5 26.9	62.5 26.0	75.0	57.5 24.9	75.0 24.1	65.0 23.6	82.5 23.0	62.5 23.5	
7	3.0	52.5 25.8	72.5 26.3	72.5 26.6	57.5 26.1	67.5 25.7	80.0 25.0	67.5 24.2	72.5 24.0	65.0 23.3	82.5 23.0	65.0 22.9	
8	2.0	72.5 25.5	75.0 26.2	85.0 26.8	67.5 26.5	60.0 26.0	92.5 25.4	72.5 25.0	72.5 24.2	60.0 23.9	75.0 23.4	57.5 23.1	77.5 22.8
9	1.0	85.0 25.2	60.0 25.8	90.0 26.3	80.0 26.2	72.5 25.7	97.5 25.0	90.0 24.2	70.0 24.2	62.5 23.8	82.5 23.3	62.5 23.0	72.5 22.4
10	0.5	117.5	100.0	85.0	125.0	95.0	110.0	95.0	105.0	60.0	142.5	75.0	75.0
TEMP. AMB. C	26.8	28.6	26.9	25.6	24.0	23.3	22.0	21.5	20.6	20.0	20.8	20.0	
ELEV. m.	6.1	6.8	7.4	8.1	8.8	9.5	10.0	8.5	7.1	5.6	4.1	2.7	

T A B L A 5

T A B L A 6

FRUEBA E						
SIGLAS	Cssed (1) s/desarenar [ml/l]	Cssed (1) desarenado [ml/l]	Cssed (2) desarenado [ml/l]	Css tot (2) [mg/l]	Cssed (2) [mg/l]	Cssed regresion [mg/l]
ES-1		3.50	2.00	270.00	167.50	152.78
ES-2		3.40	2.00	380.00	280.00	266.08
ES-3		2.20	1.50	300.00	168.00	183.68
ES-4		10.50	3.50	370.00	217.50	255.78
ES-5		7.50	6.00	235.00	140.00	116.73
ES-6		4.00	3.00	170.00	102.50	49.78
ES-7		2.50	3.50	155.00	52.50	34.33
ES-8		22.00	40.00	960.00	877.50	863.48
ES-9		18.00	15.00	510.00	442.50	399.98
ES-10		6.00	6.00	390.00	252.50	276.38
ES-11		4.50	3.00	395.00	235.00	281.53
ES-12		4.50	3.50	275.00	123.60	157.93
ES-13		3.50	3.00	265.00	127.90	147.63

Regression Output:	
Constant	-125.32
Std Err of Y Est	33.14
R Squared	9.98
No. of Observations	13.00
Degrees of Freedom	11.00
X Coefficient(s)	1.03
Std Err of Coef.	0.05

T A B L A 7

FRUEBA F						
SIGLAS	Cssed (1) s/desarenar (ml/l)	Cssed (1) desarenado (ml/l)	Cssed (2) desarenado (ml/l)	Css tot (2) (mg/l)	Cssed (2) (mg/l)	Cssed regresion (mg/l)
FS-1		7.50	5.50	795.00	660.00	691.93
FS-2		1.50	3.00	600.00	450.00	438.13
FS-3		0.50	0.50	280.00	100.00	169.33
FS-4		9.00	12.00	410.00	275.00	278.53
FS-5		10.50	9.00	465.00	350.00	324.73
FS-6		12.00	10.00	575.00	410.00	417.13
FS-7		3.25	2.50	160.00	67.50	68.53
FS-8		1.50	2.00	140.00	65.00	51.73
FS-9		2.00	2.00	125.00	60.00	39.13
FS-10		2.50	2.50	110.00	42.50	26.53
FS-11		2.25	2.50	395.00	285.00	265.93
FS-12		5.25	5.50	1100.00	910.00	925.33
FS-13		3.25	2.50	510.00	355.00	362.53
FS-14		2.30	2.00	450.00	277.50	312.13

Regression Output:	
Constant	-65.87
Std Err of Y Est	31.17
R Squared	0.99
No. of Observations	14.00
Degrees of Freedom	12.00
X Coefficient(s)	0.84
Std Err of Coef.	0.03

parte por el poco tiempo de permanencia del fluido en la columna y en parte por la presencia de gran parte de sólidos fijos. La influencia de la temperatura no es factor tan importante como en columnas de menores dimensiones.

De los resultados de Csst, se deduce que el comportamiento de los sólidos suspendidos dentro de la columna, tiende a concentrarse en la parte inferior. En las figs 33 y 34, se presentan la variación de la Csst, durante las 24 h de prueba, para la elevación 0.5, en las pruebas E y F.

Las figs 35 y 36, muestran la distribución de Csst, a lo largo de la columna en el momento de máximo llenado, se observa la tendencia del sedimento a concentrarse en la parte baja. La fig 36 resulta de particular interés para constatar que aún cuando hay mayor espesor de depósito en el fondo 12.8 cm para la prueba D (San Juan de Dios), y sólo 2.5 cm en la prueba C (Atemajac), la concentración de sólidos suspendidos en peso es mayor en la prueba C, se explica esto con la presencia de mayor cantidad de sólidos inorgánicos en la prueba C. Esto confirma el razonamiento de que este río, Atemajac, por tener su cauce en una zona con menor densidad de población, arrastre mayores cantidades de arenas, limos, arcillas, que el San Juan De Dios que se supone es esencialmente urbano.

DISTRIBUCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

AGOSTO ($h=0.5$ m)

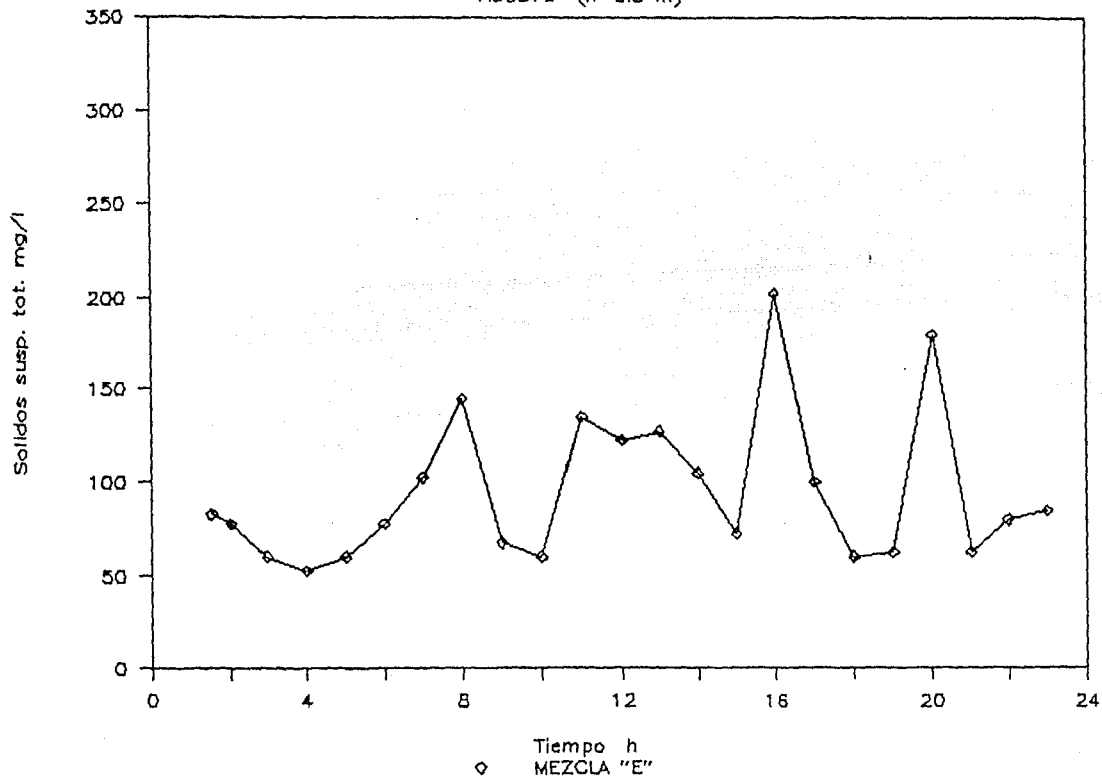


FIGURA 33

890831

DISTRIBUCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

AGOSTO (h=0.5 m)

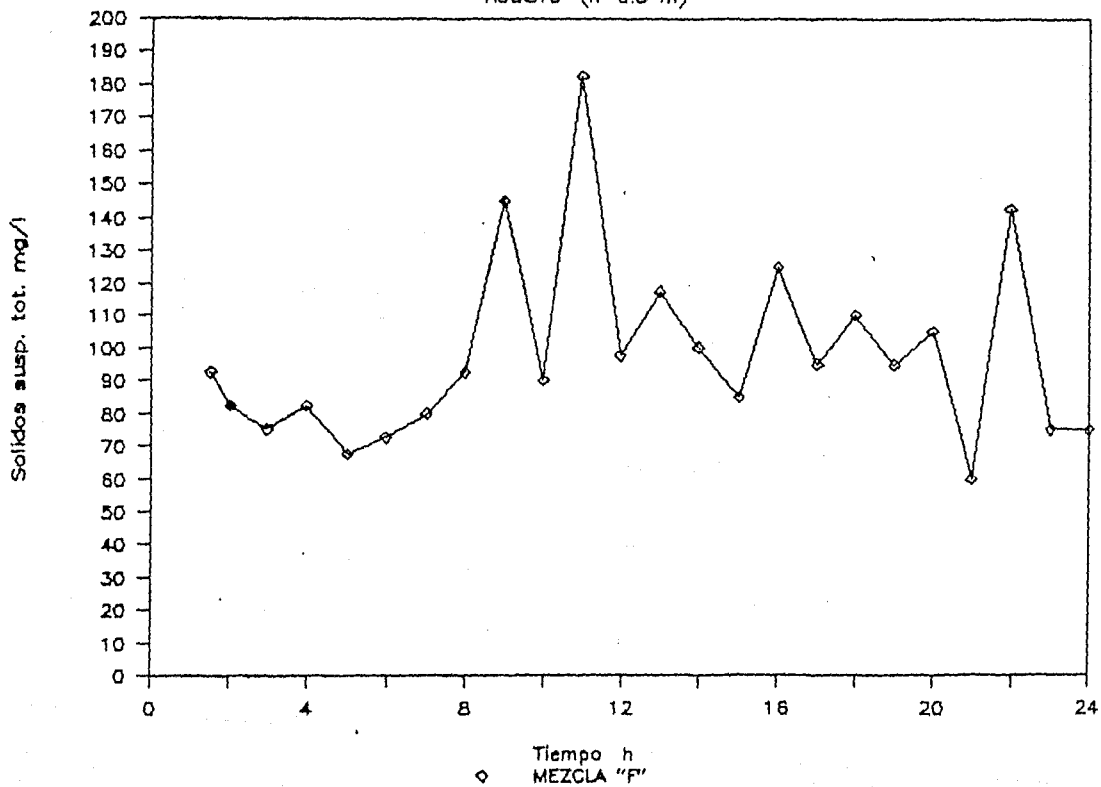


FIGURA 34

890831

DISTRIBUCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

AGOSTO (t=16 h)

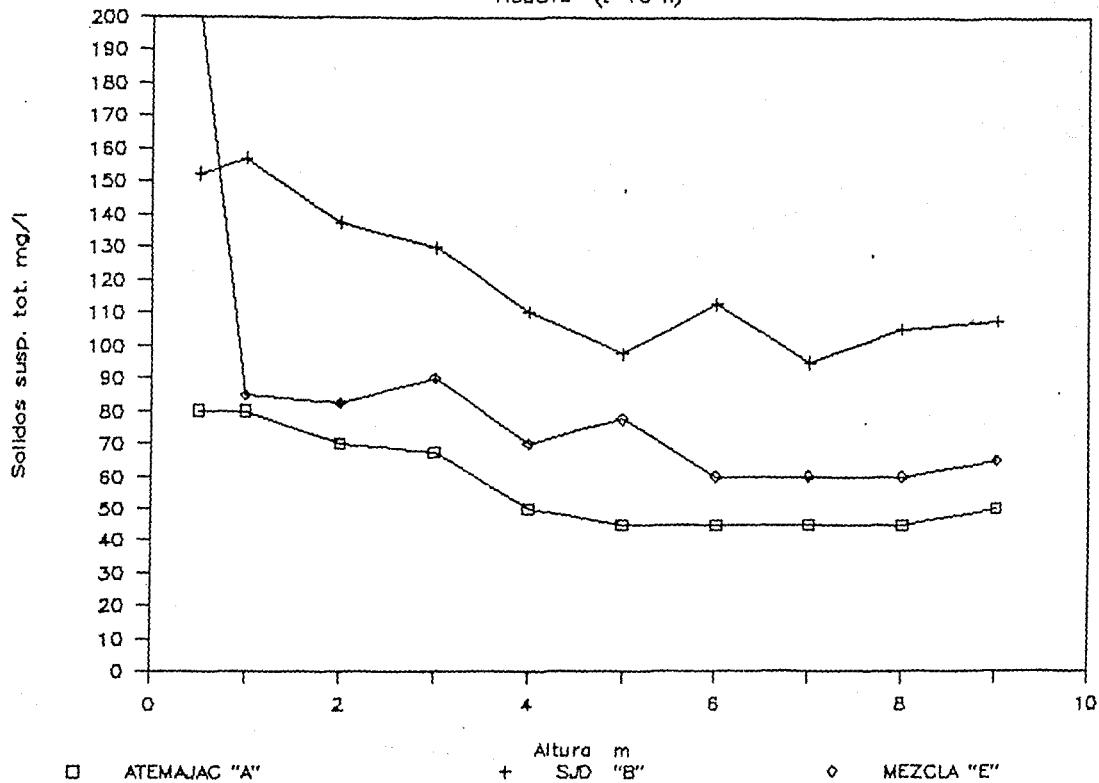


FIGURA 35

890831

DISTRIBUCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

AGOSTO (t=18 h)

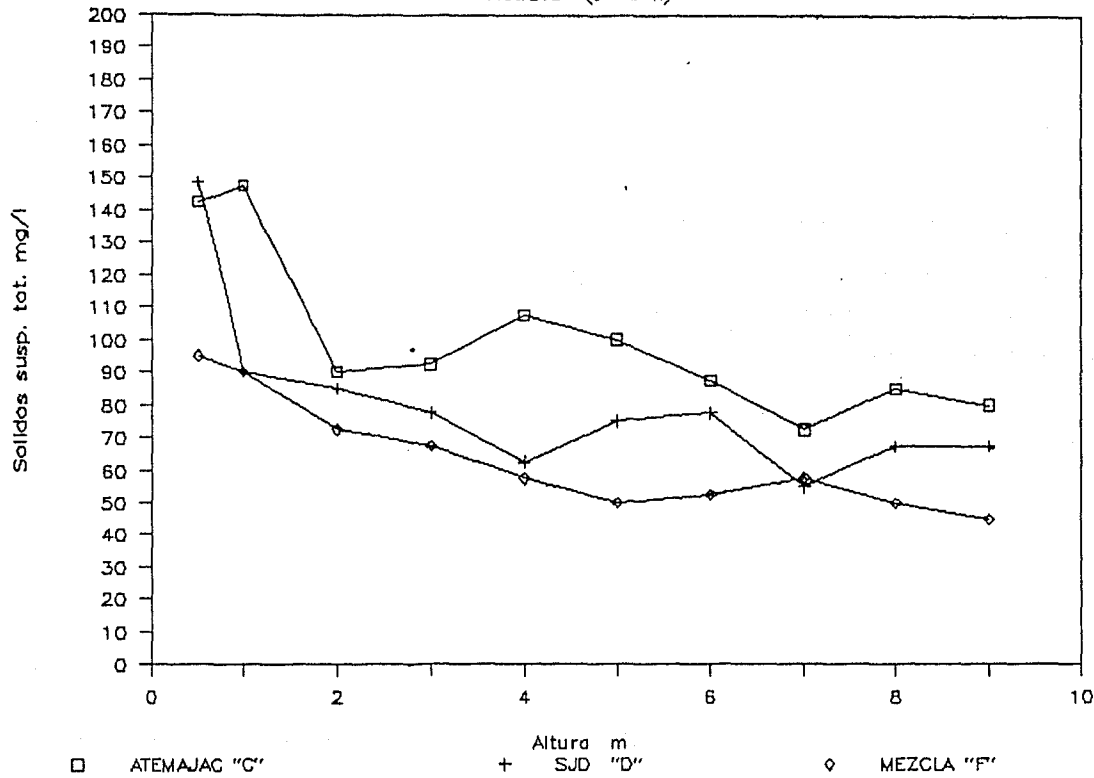


FIGURA 36

890831

Para estimar la influencia del tiempo de llenado en la distribución de la Csst, se realizó una comparación entre las pruebas que utilizaron agua del mismo río, se adimensionaron para evitar componentes no relevantes, ver figs 37 a 39, se destaca que se tiene comportamiento similar entre cada par de pruebas y entre todas, por lo que se concluye que el tiempo de llenado no afecta a la distribución de la Csst.

La determinación de la concentración de sólidos sedimentables en peso C_{ssp}, se comparó con los resultados reportados por Tebbutt, ref 55, quien en análisis similares encontró una correlación entre la Csst y C_{ss}, permitiéndose así verificar la bondad de los resultados de las pruebas.

Dicho ajuste mostró ser muy bueno en las pruebas realizadas con una ecuación lineal con la forma:

$$C_{ss} \text{ (mg/l)} = m * C_{sst} - k \quad (16)$$

donde m fluctúa entre 0.67 y 1.0 y k entre 3.59 y 125.32, los coeficientes de correlación están entre 0.85 y 1.00, ver fig 40, y la Csst está dada en mg/l.

DISTRIBUCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

COMPARACION A TIEMPOS DE LLENADO

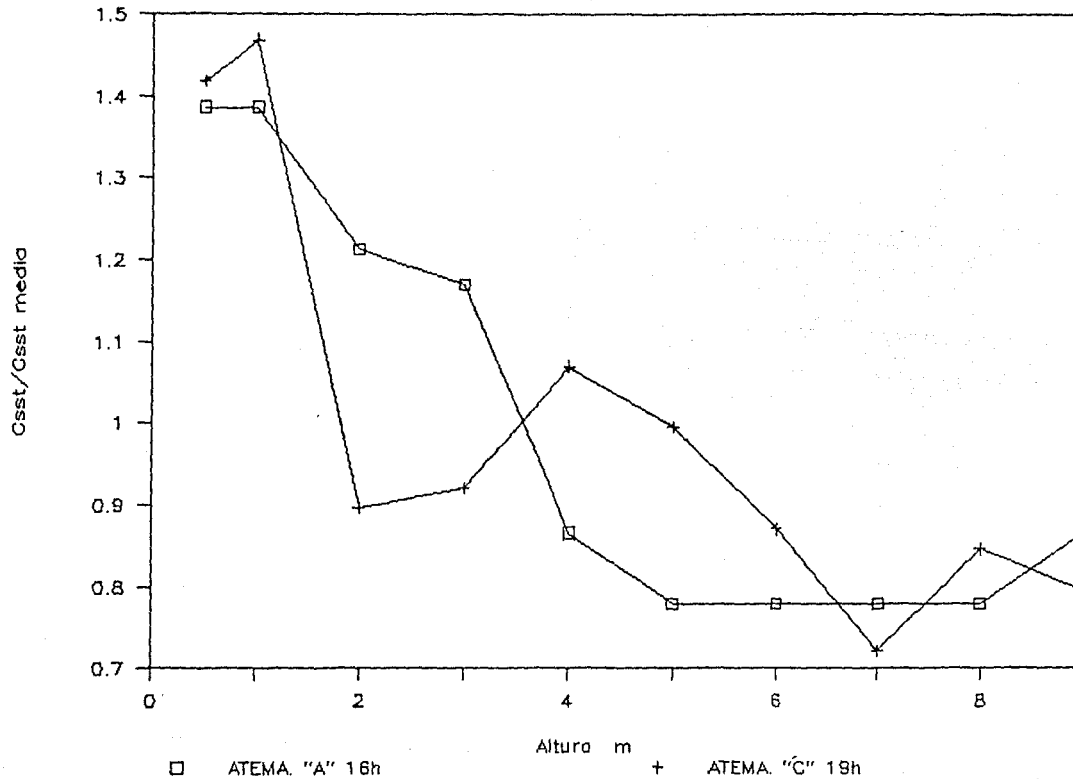


FIGURA 37

DISTRIBUCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

COMPARACION A TIEMPOS DE LLENADO

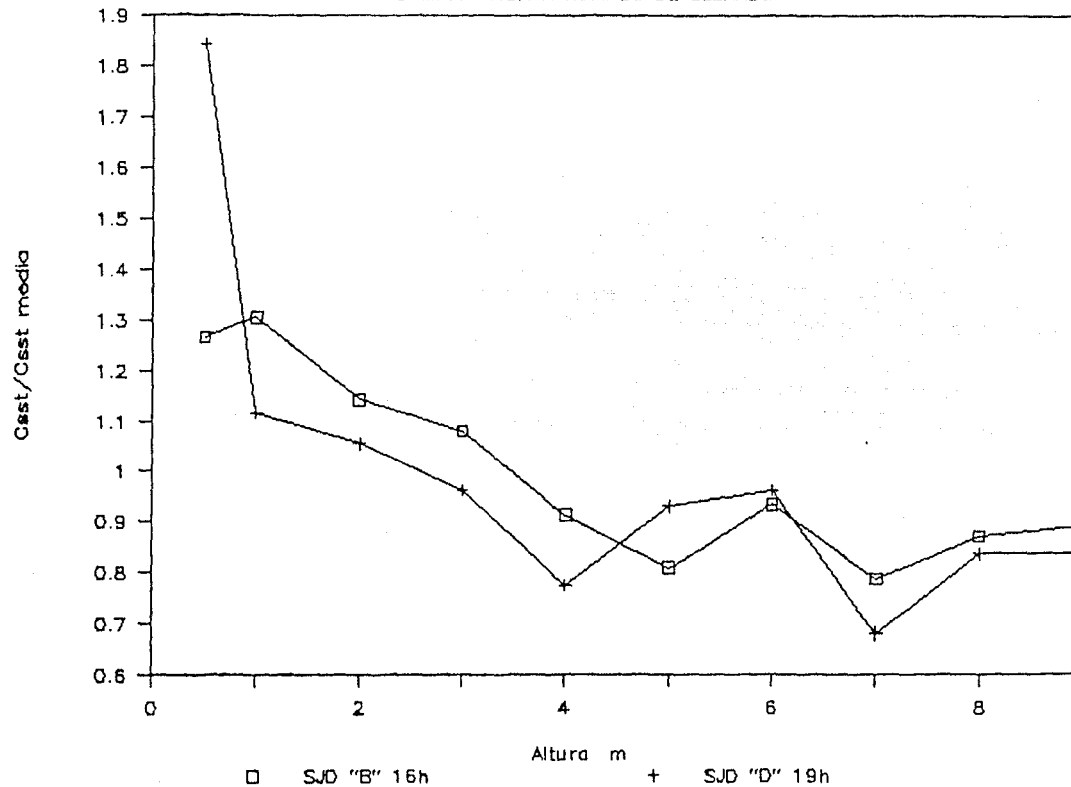


FIGURA 38

DISTRIBUCION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS

COMPARACION A TIEMPOS DE LLENADO

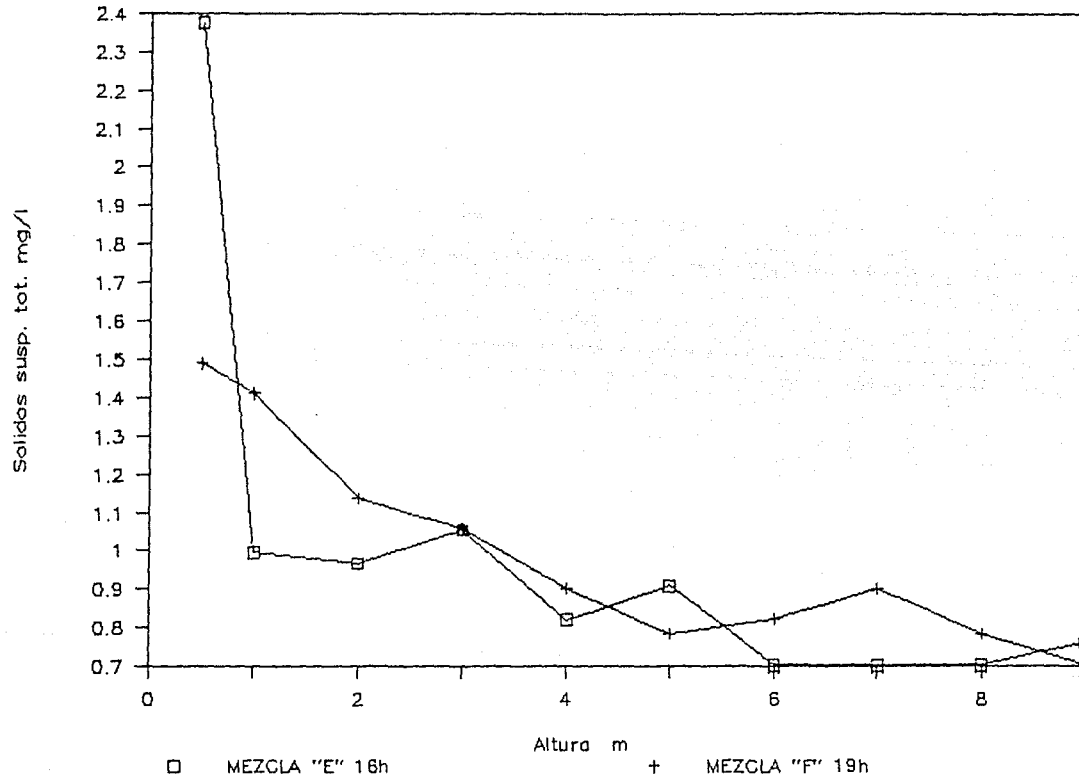


FIGURA 39

REGRESION LINEAL TOTAL

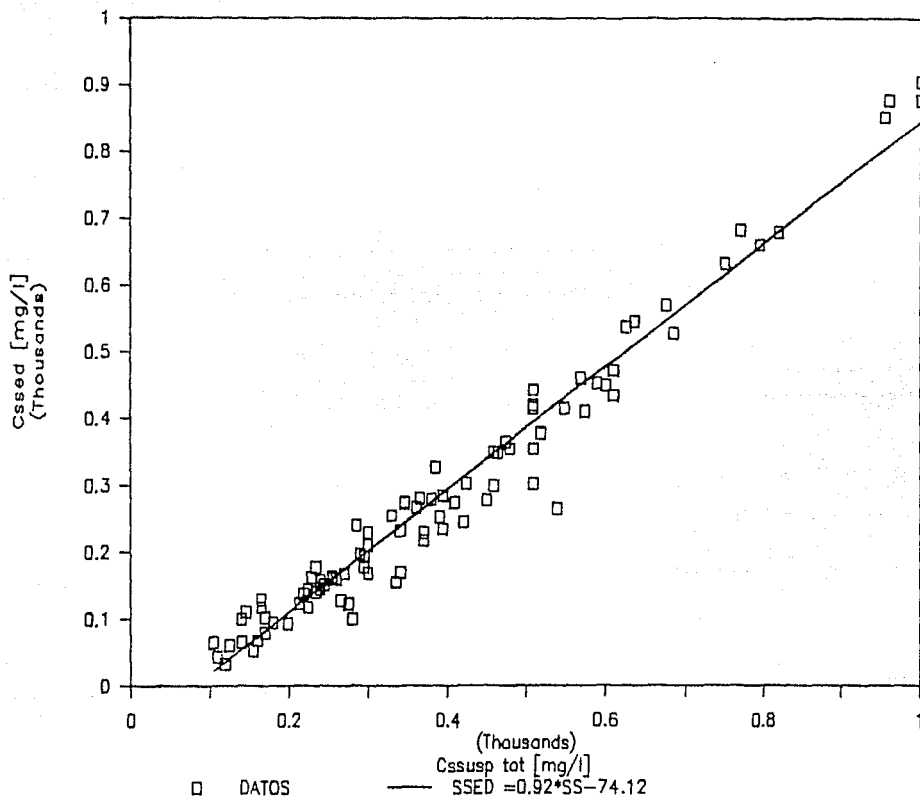


FIGURA 40

Con esto se verifica la bondad de las pruebas, se sabe que a mayor Csst, mayor cantidad de sólidos sedimentables. Además de acuerdo con los resultados, se observa que un 65 o 70% de los sólidos suspendidos es materia sedimentable, el resto son sólidos de muy pequeña velocidad de caída que aún y cuando pasen al vaso muy probablemente no se depositen en 24 h y serán susceptibles de ser arrastradas de regreso al sedimentador. La materia sedimentable es retenida en la base de la columna, en 24 h por lo que se confirma la posibilidad de utilizar el sedimentador.

La experiencia en sólidos floculantes indica tiempos de permanencia de 2 h para que se depositen en el fondo de cualquier sedimentador. Se efectuaron las pruebas estándar para verificar ésto y su similitud con los volúmenes para 24 h en el piso, líneas abajo se describen las pruebas.

5.5.2.- Pruebas Estándar.

Se presentan los resultados de las 4 pruebas en las tablas 8 a 11, incluyen los registros de temperaturas y Csst, para las 2 h de prueba. También se incluye el porcentaje de sedimentación que se alcanza en cada periodo de muestra. De éstos vale la pena mencionar las eficiencias para cada caso:

T A B L A 8

PRUEBA S10-1 Csst en mg/l (Altura de 10 m) CFE
17/08/88 6:50 AM ATENAJAC

FRUF	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.
0.0												
1.0	21.00	284.00	21.00	277.00	21.00	172.00	21.50	120.00	21.50	167.00	21.50	
2.0	21.00	284.00	21.00	203.00	21.00	188.00	22.00	120.00	21.50	143.00	21.50	
3.0	22.00		22.00	243.00	22.00	196.00	22.00	136.00	22.00	125.00	22.00	
4.0	22.00	244.00	22.00	227.00	22.00	176.00	22.00	136.00	22.00	110.00	22.00	
5.0	20.00	298.00	20.00	237.00	20.50		21.00	132.00	21.00	131.00	21.00	
6.0	21.50	252.00	21.50	210.00	21.00	240.00	22.00	126.00	22.00	97.00	22.00	
7.0	21.50	265.00	21.50		21.00	204.00	22.00	168.00	22.00	187.00	22.00	
8.0	22.50	315.00	22.00	253.00	22.00	184.00	22.00	129.00	22.10	129.00	22.00	
9.0	22.50	330.00	22.00	229.00	22.00	76.00	22.00	56.00	22.00	137.00	22.00	
9.5		395.00				200.00		88.00		189.00		
TEMP. AMB.	19.00		19.50		20.50		21.50		21.00		20.00	
TIEMPO, MIN	0		25		50		75		100		120	

Co = 575.00

PRUEBA S10-1 Porcentaje de Sedimentación (Altura de 10 m)
17/08/88 6:50 AM ATENAJAC CFE

FRUF	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed
0.0						
1.0		0.51	0.52	0.70	0.77	0.71
2.0		0.51	0.65	0.67	0.77	0.75
3.0			0.58	0.66	0.76	0.79
4.0		0.58	0.61	0.69	0.76	0.81
5.0		0.64	0.57		0.77	0.77
6.0		0.56	0.63	0.58	0.78	0.83
7.0		0.54		0.65	0.71	0.67
8.0		0.45	0.56	0.69	0.79	0.79
9.0		0.41	0.62	0.87	0.90	0.76
9.5		0.31		0.65	0.85	0.69
PROM. %	0.00	0.50	0.59	0.69	0.79	0.76
TIEMPO, MIN	0.00	25	50	75	100	120

T A B L A 9

PRUEBA S Csst en mg/l (Altura de 10 m) CFE
29/08/87 12:45 PM ATEHAJAC

PROF	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.
0.0												
1.0	26.50	180.00	26.50	150.00	26.80	195.00	27.10	140.00	27.50	125.00	27.80	
2.0	26.20	215.00	26.50	170.00	26.50	210.00	27.00	145.00	27.50	125.00	27.60	
3.0	26.80	200.00	26.80	135.00	27.00	215.00	27.20	190.00	27.50	135.00	27.60	
4.0	26.00	230.00	26.50	215.00	26.50	215.00	26.80	205.00	27.00	150.00		
5.0	26.00	250.00	26.80	185.00	26.80	215.00	27.50	170.00	28.00	145.00		
6.0	26.50	310.00	26.80	200.00	27.00	230.00	27.00	205.00	27.50	170.00		
7.0	26.00	200.00	26.20	200.00	26.20	230.00	26.50	230.00	27.00	95.00	27.00	
8.0	26.20	250.00	26.00	185.00	26.70	245.00	27.00	200.00	27.00	135.00	27.00	
9.0	26.00	290.00	26.50	215.00	26.00	170.00	26.20	205.00	26.20	170.00	26.50	
9.5		260.00		210.00		175.00		200.00		225.00		
TEMP.AMB.		26.50		26.20		26.00		26.50		27.00		27.20
TIEMPO, MIN	0		25		50		75		100		120	

Co = 313.00

PRUEBA S Porcentaje de Sedimentacion (Altura de 10 m)
29/08/87 12:45 PM ATEHAJAC CFE

PROF	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed
0.0						
1.0		0.42	0.52	0.38	0.55	0.60
2.0		0.31	0.46	0.33	0.54	0.60
3.0		0.36	0.57	0.31	0.37	0.57
4.0		0.27	0.31	0.31	0.35	0.52
5.0		0.20	0.41	0.31	0.39	0.54
6.0		0.01	0.36	0.27	0.35	0.62
7.0		0.36	0.36	0.27	0.27	0.70
8.0		0.20	0.41	0.22	0.36	0.57
9.0		0.07	0.31	0.39	0.35	0.46
9.5		0.17	0.33	0.44	0.36	0.28
PRODI, %	0.00	0.24	0.40	0.32	0.39	0.54
TIEMPO, MIN	0.00	25	50	75	100	120

T A B L A 10

FRUEBA Q Csst en mg/l (Altura de 10 m) CIAIEJ
30/08/87 1:20 FM MEZCLA 1:1

FRUF	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.
0.0												
1.0	26.80	170.00	27.10	150.00	27.60	150.00	28.20	155.00	28.70			27.39
2.0	27.30	190.00	27.30	170.00	27.60	150.00	28.00	175.00	28.50	140.00		28.80
3.0	27.40	235.00	28.00	160.00	28.00	155.00	28.30	140.00	28.50	160.00		29.00
4.0	27.70	225.00	27.90	160.00	27.90	155.00	27.90	150.00	28.00	130.00		28.30
5.0	27.80	210.00	28.00	180.00	28.00	140.00	28.60	155.00	29.20	155.00		29.70
6.0	27.60	205.00	28.00	215.00	28.20	150.00	28.10	160.00	29.00	155.00		29.00
7.0	27.40	230.00	27.40	260.00	27.80	140.00	28.00	170.00	28.00	155.00		28.10
8.0	27.80	220.00	27.80	195.00	28.00	150.00	28.00	150.00	28.10	120.00		28.10
9.0	27.00	240.00	27.20	180.00	27.40	150.00	27.50	150.00	27.50	130.00		27.60
9.5		280.00		210.00		170.00		160.00		140.00		
TEMP. AHB.		27.00		27.30		26.80		27.00		27.50		26.60
TIEMPO, MIN	0		25		50		75		100		120	
Co =	300.00											

FRUEBA Q Forcentaje de Sedimentacion (Altura de 10 m)
30/08/87 1:20 FM MEZCLA 1:1 CIAIEJ

FRUF	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed
0.0						
1.0		0.37	0.50	0.50	0.48	
2.0		0.37	0.43	0.50	0.42	0.53
3.0		0.22	0.47	0.40	0.53	0.47
4.0		0.25	0.47	0.48	0.50	0.57
5.0		0.30	0.40	0.53	0.48	0.48
6.0		0.32	0.28	0.50	0.47	0.48
7.0		0.23		0.53	0.43	0.48
8.0		0.27	0.35	0.50	0.50	0.60
9.0		0.20	0.40	0.50	0.50	0.57
9.5		0.07	0.30	0.43	0.47	0.53
FRUM, %	0.00	0.26	0.40	0.50	0.48	0.52
TIEMPO,	0.00	25	50	75	100	120

T A B L A 11

PRUEBA R Csst en mg/l (Altura de 10 m) CIAIEJ
30/08/89 5:12 PM MEZCLA 1:1

PROF	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.	Csst	temp.
0.0												
1.0	23.10	190.00	23.00	220.00	22.90	280.00	22.90	180.00	22.80	200.00	22.80	
2.0	23.30	290.00	22.10	300.00	22.20	240.00	23.00	180.00	22.10	180.00	22.10	
3.0	23.30	220.00	23.00	320.00	23.10	240.00	23.00	180.00	22.90	180.00	22.90	
4.0	24.00	270.00	23.80	290.00	23.50	280.00	23.20	140.00	23.00	240.00	22.90	
5.0	20.50	470.00	20.50	280.00	21.00	210.00	20.50	270.00	21.00	140.00	22.40	
6.0	22.80	310.00	22.60	390.00	22.60	270.00	23.60	260.00	22.50	150.00	21.20	
7.0	22.00	420.00	21.90	320.00	22.20	290.00	22.00	230.00	22.00	170.00	22.20	
8.0	22.00	340.00	23.00	400.00	23.00	210.00	22.90	240.00	22.50	160.00	22.50	
9.0	23.40	240.00	23.20	300.00	23.00	230.00	22.90	250.00	22.50	230.00	22.50	
9.5		400.00		220.00		330.00		240.00		150.00		
TEMP. AMB.		19.50		19.50		19.40		19.40		19.40		19.40
TIEMPO, MIN	0		25		50		75		100		120	

Co = 480.00

PRUEBA R Porcentaje de Sedimentacion (Altura de 10 m)
30/08/89 5:12 PM MEZCLA 1:1 CIAIEJ

PROF	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed	%Sed
0.0						
1.0		0.60	0.54	0.42	0.63	0.58
2.0		0.40	0.38	0.50	0.63	0.63
3.0		0.54	0.33	0.50	0.63	0.63
4.0		0.44	0.40	0.42	0.71	0.50
5.0		0.02	0.42	0.56	0.44	0.71
6.0		0.35	0.19	0.44	0.46	0.69
7.0		0.13	0.33	0.40	0.52	0.65
8.0		0.29	0.17	0.56	0.50	0.67
9.0		0.50	0.38	0.52	0.48	0.52
9.5		0.17	0.54	0.31	0.50	0.69
FROM. %	0.00	0.34	0.37	0.46	0.55	0.63
TIEMPO,	0	25	50	75	100	120

Prueba S10-1.- La curva de sedimentación promedio fig 41 muestra una eficiencia de 76 %, de sólidos suspendidos retenidos. Al trasladar los datos a curvas de carga superficial vs % de remoción, ver fig 42, se observa que con cargas superficiales de $125 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ se tiene la misma eficiencia, el depósito final de sedimentos fué al final de la prueba de 5 cm.

Prueba S.- La tabla 9 muestra los resultados, la eficiencia es de 54 %, y la carga superficial vuelve a ser de $125 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$.

Prueba Q.- La eficiencia es de 52 % y se presenta con una carga superficial de $125 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$. Los valores de las eficiencias de las pruebas son congruentes con las que reporta en las refs 33 y 57 .

Prueba R.- La eficiencia es de 63 % y la carga superficial asociada es de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$, ver figs 43 y 44.

Se observa que la eficiencia, medida como una relación de la C_{sst} , en un cierto tiempo entre la C_{sst} inicial, en casi todos los casos es muy similar a la relación de sedimentables entre suspendidos totales.

CURVA DE SEDIMENTACION PROMEDIO

PRUEBA S10-1

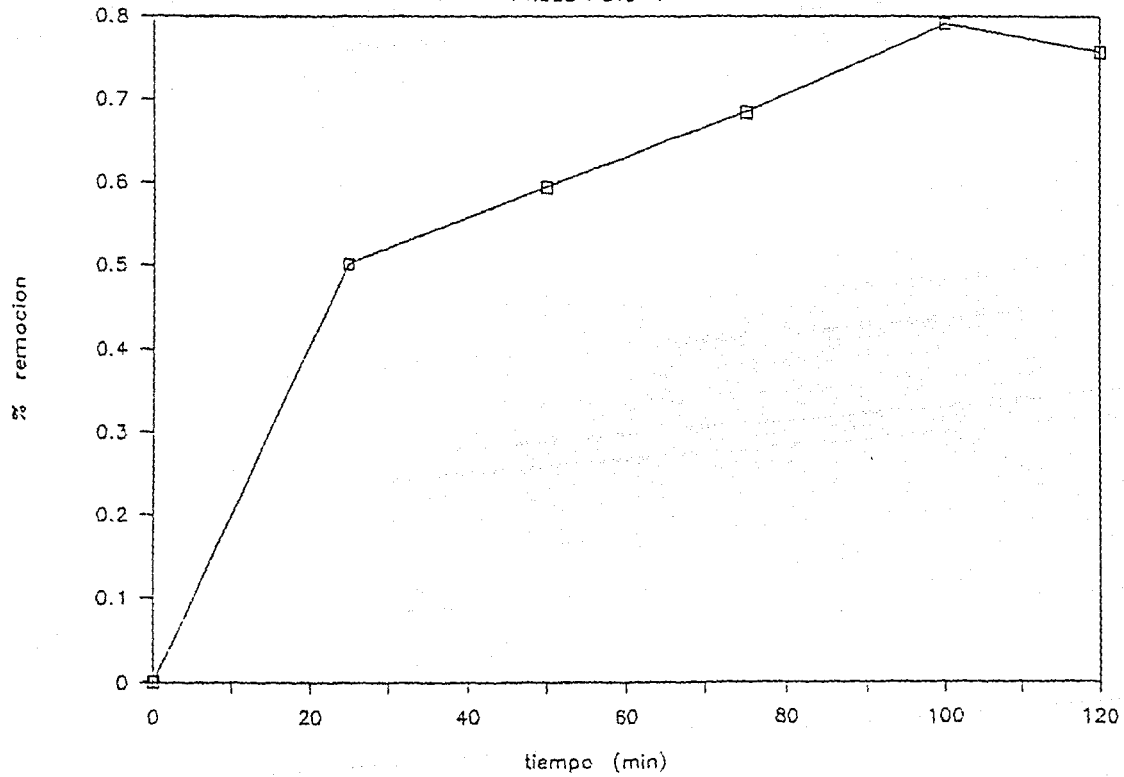


FIGURA 41

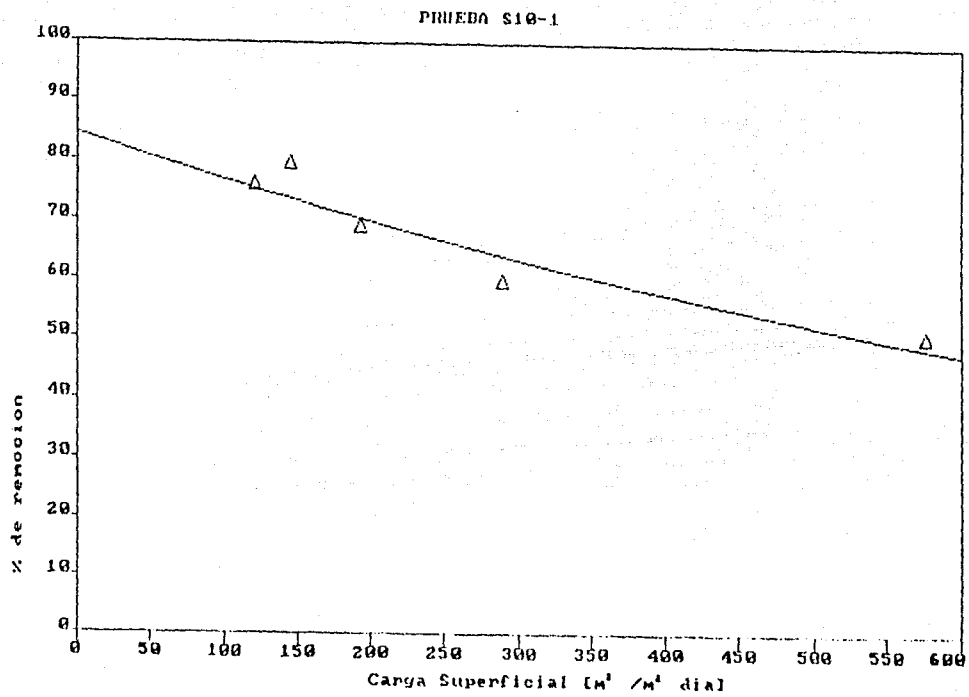


FIGURA 42

CURVA DE SEDIMENTACION PROMEDIO

PRUEBA R

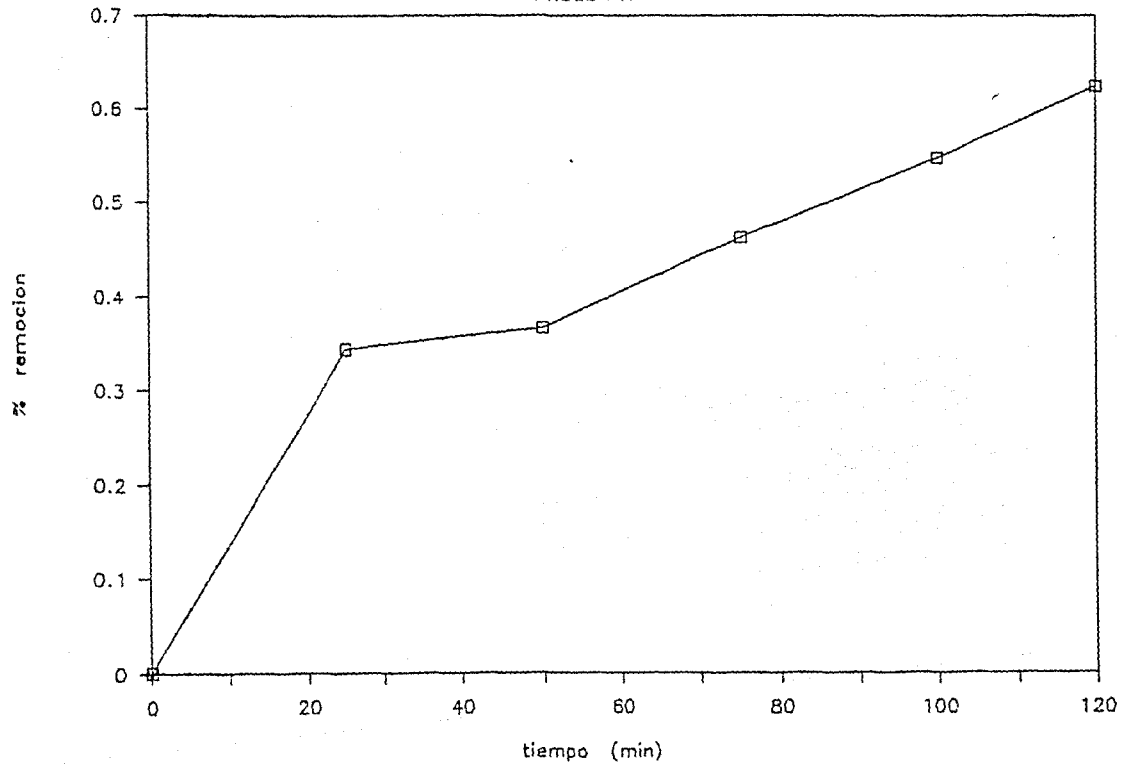


FIGURA 43

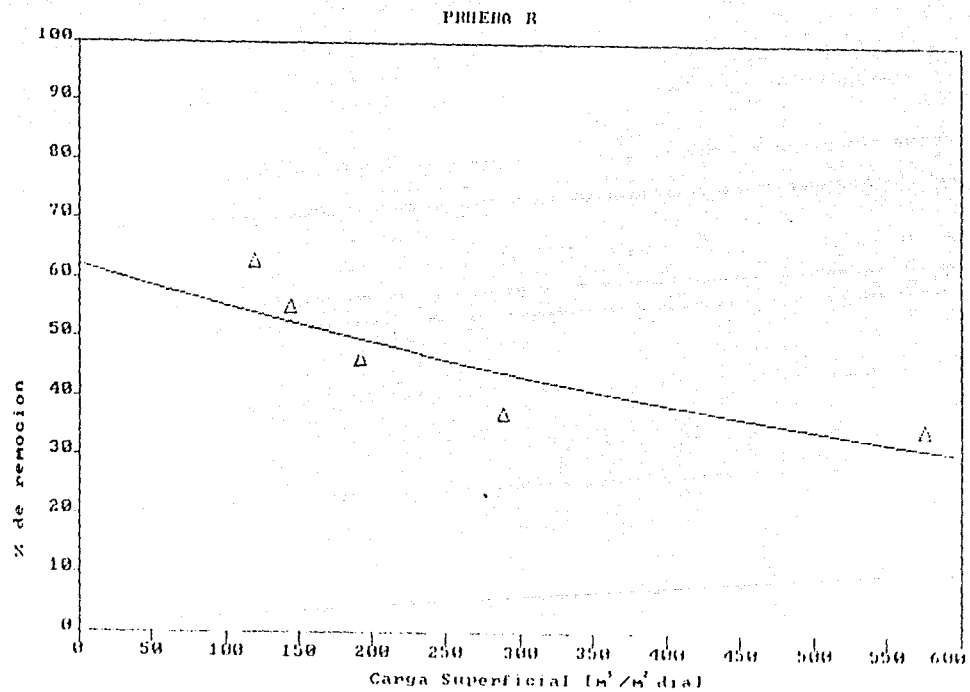


FIGURA 44

Las cargas superficiales son similares $125 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$, con lo cual se tienen los parámetros de diseño deseados, o bien si se desea mejores eficiencias modificar ligeramente las características del tanque. En las figs 42 y 44 se presentan elementos para obtener una mayor eficiencia asociado a una carga superficial.

5.6.- METODOS DE LIMPIEZA.

Entre los objetivos del proyecto de tanque regulador-sedimentador se encuentra el de facilitar el manejo de los sólidos de manera que se realice en forma práctica y económica y no se convierta en un problema mayúsculo para los operadores de la planta y una causa constante de paro.

Por lo mismo, se analizaron diversas alternativas la primera de las cuales no consideraba un tanque sedimentador en su lugar se proponía la utilización de una draga, que circulará por todo el tanque, succionando los lodos y los depositará en algún lugar previamente seleccionado fuera del vaso, claro el problema se trasladaba al área fuera del tanque, a dónde enviar $6000 \text{ m}^3/\text{día}$ o más de lodos de aguas residuales. Pero esto no es todo, la falta de elementos, en su momento, para determinar la distribución del sedimento, además de la dificultad de operar con la variación de niveles y en un medio agresivo obligó a

~~desechar esta opción y buscar alternativas.~~

Posteriormente se observó conveniente el concentrar los sedimentos y se estudiaron tres alternativas para su remoción : - la utilización del tradicional equipo mecánico que se utiliza en los sedimentadores de plantas de tratamiento (ref 20), -la utilización de inyectores de aire, -y el arrastre hidráulico.

El equipo mecánico, rastras, presentó de inmediato el problema del tamaño que se requería, no existen equipos de similar tamaño, 90 m de ancho, 300 m de largo, y 9 m de profundidad. Por supuesto varios equipos podían haberse utilizado, pero dado que existe el inconveniente de la velocidad con que debe moverse, que el volumen teórico de sedimentos a manejar era demasiado se dificultaba su ubicación, debía colocarse un equipo y a cierta distancia otro, el complicado manejo de varios equipos requería consideraciones adicionales, el diseño de equipos novedosos y por lo mismo costosos, etc. Por todo esto hubo de desecharse esta alternativa.

La opción de inyectores de aire se presentó como alternativa viable, colocar una vasta red de tubos con orificios que conectados a compresores de aire, fueran capaces de levantar todo los sólidos depositados en el piso cuando se tuvieran

tirantes de 1 m en el tanque sedimentador, al final de la etapa de turbinado. Parece una opción práctica que ha sido desechada por la incertidumbre en el diseño, no hay parámetros para un diseño confiable, esto es, no se puede estimar con cierto grado de confiabilidad el tamaño de los compresores, el número de tubos; los orificios, a que distancia, de que tamaño, etc. Por esto y porqué hay una alternativa más económica se descartó este sistema de limpieza.

Por último se consideró la operación del tanque de tal forma que se indujerán velocidades que propiciarán la resuspensión del material depositado en el piso. En modelo hidráulico se vió factible, en prototipo se utiliza en el vaso de la Experiencia, en forma artesanal, pero funciona, entonces porqué no utilizarlo, además no representa un gasto adicional se efectúa conforme con una operación normal del vaso. El punto importante es garantizar que en todo el tanque se presenten velocidades mayores a 15 o 20 cm/s durante el tiempo suficiente para arrastrar todos los sedimentos.

6.- DISEÑO HIDRAULICO.

6.1.- ASPECTOS GENERALES.

En esta parte se definen las acciones a tomar en el diseño del tanque de almacenamiento, a través del escrito se ha planteado la existencia de un problema de sedimentación, proceso de gran relevancia en procesos donde se trabaja con agua residual. La manera tradicional de remover las partículas en suspensión es a través de tanques sedimentadores, éstos a pesar de representar el 30 % (ref 53), de la inversión en plantas de tratamiento, son diseñados en base a fórmulas empíricas.

Como ya se ha mencionado se incluye en el vaso regulador un tanque sedimentador primario, este nombre se debe a que sólo se pretende separar los sólidos sedimentables que son transportados en suspensión. Los parámetros de diseño más

importantes son el tiempo de retención T , y la carga superficial C.S, definidos como:

$$T_o = \frac{V}{Q} \quad (17)$$

$$C.S. = \frac{Q * 86,400}{A} \quad (18)$$

donde T_o es el tiempo de retención teórico, en s

V es el volumen de almacenamiento del tanque, en m^3

Q es el gasto medio diario de agua residual, en m^3/s

A es el área superficial del tanque, en m^2

La estimación del tiempo de retención a través del empleo de técnicas de trazado permite adicionalmente la obtención de patrones generales de flujo y en cierta forma la eficiencia hidráulica del tanque, mientras menores zonas muertas, cortos circuitos y flujos secundarios ocurran mejor sedimentación se tendrá. En el trabajo se presentan las curvas de flujo en el vaso, FTC por sus siglas en inglés, éstas tienen la forma

$$C = C_o e^{(-t/T_o)} \quad (19)$$

pequeña velocidad de caída hacia el resto del vaso. Se espera que de las partículas que pasan al vaso sólo una pequeña parte se sedimentará, aproximadamente un 5 o 10 %, $350 \text{ m}^3/\text{día}$ de mezcla, (3.5 ton de material seco), que representan menos del 1 % de la capacidad muerta del vaso y el resto regresa al sedimentador y pasa a la obra de toma en la etapa de turbinado para descargar al cauce del río Santiago.

El 70 % que se retiene en el vaso (6722 Ton de mezcla, 245 ton de material seco), se deposita en el fondo, en una capa de 30 cm en promedio, que dada su bajo peso específico 1022.71 kg/m^3 y su escasa consolidación, es fácil resuspender mediante un arrastre hidráulico (con velocidades mayor a 14 cm/s), dicho material será atraído y succionado por la obra de toma. Por lo tanto, los trabajos de limpieza se reducen al mínimo y el lapso entre limpieza se alarga en forma considerable, facilitándose la operación de la planta y reduciéndose los costos de mantenimiento al mínimo.

6.2.- TANQUE SEDIMENTADOR.

El diseño final del tanque sedimentador, ver fig 45 tiene las siguientes características :

a) Localización.- Se ubica en la parte norte del tanque

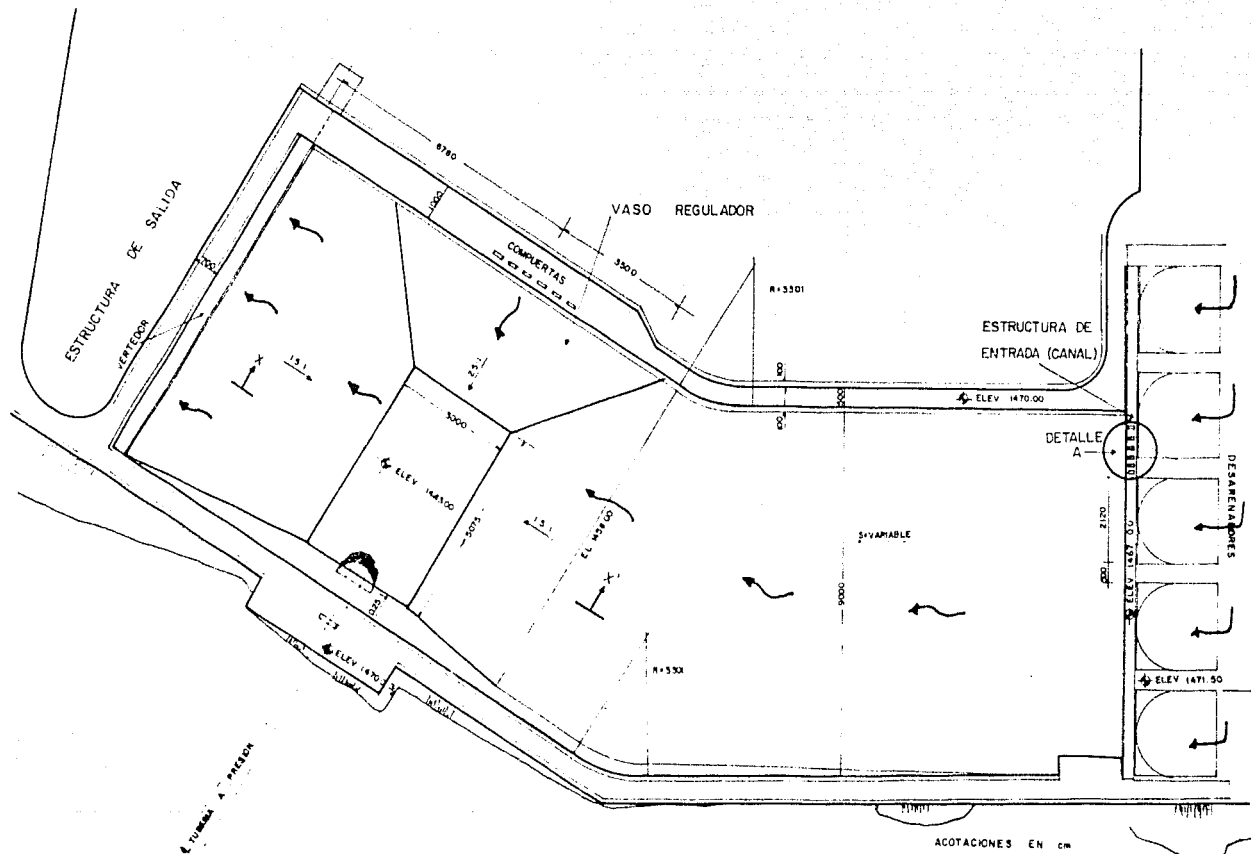


FIG 45 PLANTA DEL TANQUE SEDIMENTADOR. PH AGUA PRIETA, JALISCO ESQUEMA DEFINITIVO

regulador, como se observa, la obra de toma se encuentra dentro del sedimentador, se comunica con el regulador en la etapa de llenado mediante un vertedor de 90 m de longitud de cresta y mediante 6 compuertas planas en la fase de turbinado.

b) Carga Superficial.- Las experiencias obtenidas en las pruebas de sedimentación, el conocimiento del comportamiento de los materiales que viajan en suspensión y el objetivo del tanque sedimentador, permiten proponer una estructura un poco diferente a las que se reportan tradicionalmente en la literatura (ref 46).

Normalmente un sedimentador forma parte de un sistema de tratamiento de aguas negras donde se pretende eliminar prácticamente todos los sólidos, de esta manera el sedimentador retiene normalmente el 50 o 70 % de todos los sólidos suspendidos (refs 1, 18 y 45). Para este caso, la filosofía de diseño, es otra muy diferente, no interesa clarificar el agua, sólo interesa que la materia sedimentable sea eliminada lo más económicamente posible sin producir alteraciones en el sistema hidroeléctrico, y reducir los efectos de contaminación ambiental.

Lo anterior es posible lograrlo con cargas superficiales de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$, considerando un factor de reducción de 1.25

debido al efecto dinámico, este factor considera que las pruebas se realizan en estado "batch" y en el tanque real el agua se encuentra en movimiento, respecto al valor obtenido en las curvas de diseño experimentales, ver figs 42 y 44.. Esta eficiencia esta asociada a un tiempo de permanencia real cuando menos de 2 h. En la literatura de aguas residuales, por definición los sólidos sedimentables son aquellos que depositan en menos de 2 h.

c) Tiempo de permanencia real.- Existe la duda sobre si en 2 h de permanencia del agua en un tanque tan profundo, los sólidos llegan al piso o si necesita más tiempo (e.g.3 o 4 hs. En las pruebas estándar, es claro que la gran mayoría del sedimento llega al piso en 1^{ra} h (75 %), el 25 % restante en la 2^{da} h. Para los sedimentadores estudiados, y en particular el de la fig 45, que se ha denominado final, el tiempo de permanencia real es de aproximadamente 2.4 h, con lo cual se espera que se depositen el 100 % de los sólidos sedimentables.

d) Profundidad.-Aún está en debate la conveniencia de emplear en el diseño la influencia de la profundidad en la eficiencia (refs 53 y 56), la razón es que aparentemente se logra mayor eficiencia diseñando un sedimentador más grande en planta que más profundo, además es muy probable que sea más caro construir un sedimentador de gran profundidad que

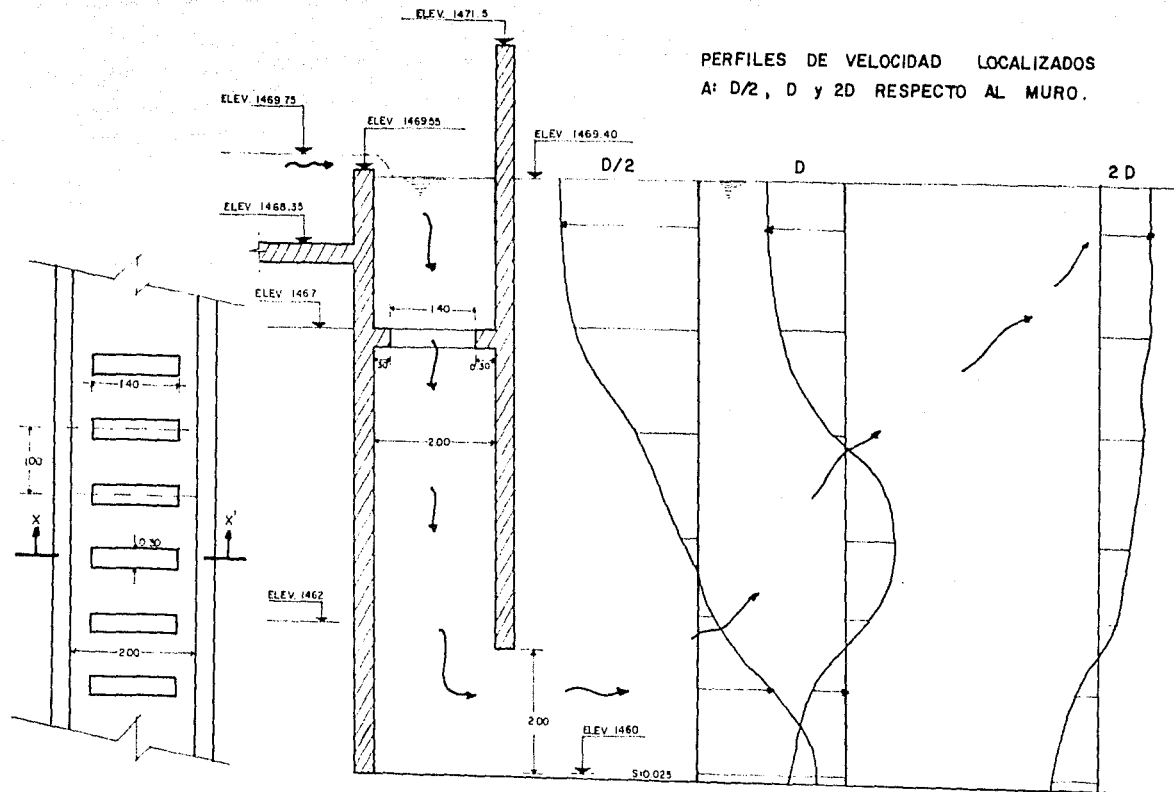
más grande en planta. De cualquier forma hay poca experiencia en éste punto, por ésto las pruebas en columna son valiosas, pues permiten observar que aún con profundidades tan grandes se obtiene una buena eficiencia en la remoción de lodos.

e) Relación longitud-ancho.-Debido a limitaciones en el procedimiento constructivo y económicas, se ha diseñado con una relación de 3, esto es, lejos del óptimo 10 (ref 48). No obstante, se pueden alcanzar eficiencias razonables cuidando que las estructuras de entrada y salida garanticen una buena distribución del flujo.

f) Estructura de entrada.-Consiste de un canal rectangular ubicado a la salida de los desarenadores, con una cresta en la elev. 1469.5 y con orificios en el piso elev. 1467.5. Conforme con las recomendaciones (ref 38), ésta es una de las geometrías que mejor distribuyen el flujo, ver fig 46, en las pruebas preliminares en modelo ha demostrado ser buena esta opción.

g)Estructura de salida.-Consiste en un vertedor, de 90 m de longitud de cresta, trabajará con una carga máxima de 10 cm, ver fig 47.

h).-Volumen de sólidos.-A partir de la concentración por



PLANTA DEL DETALLE A

CORTE Y-Y'

FIG 46 ESTRUCTURA DE ENTRADA C/DISTRIBUCION DE VELOCIDADES

- ⊖ FLUJO Q SALIDA
- ⊕ FLUJO Q ENTRADA

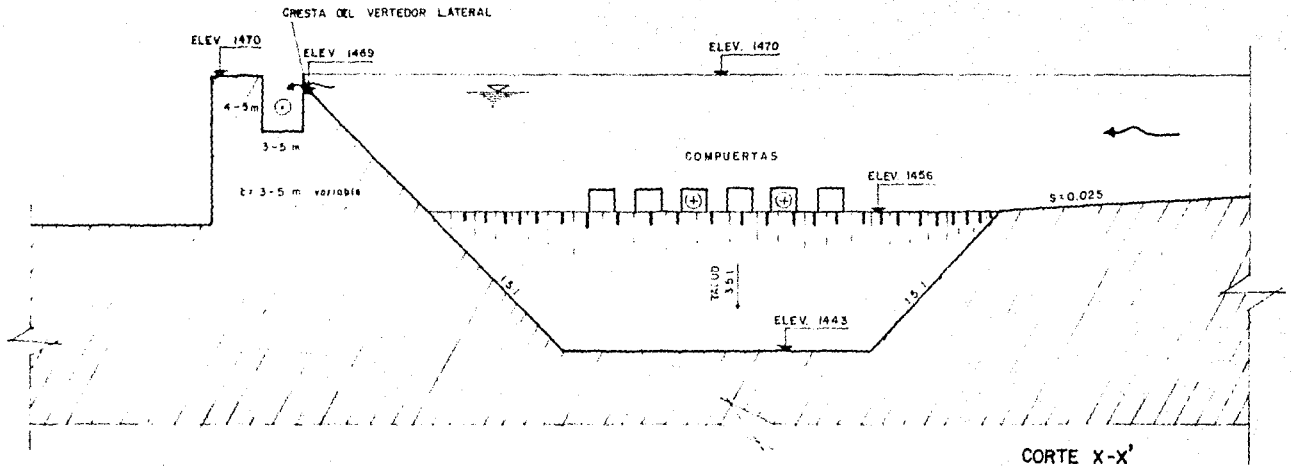


FIG 47 VERTEDOR DE CANAL LATERAL, ZONA DE SALIDA

peso C_{s2} que es de 36.49 kgf/m^3 y considerando el volumen diario de $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua residual, se tienen 245.28 ton/ día de sedimento en estado seco, ahora bien si se considera el valor de la concentración como un por ciento en peso C_{s3} , (ref 48), que en este caso es de 3.58 %, se tiene que:

$$C_{s3} = \frac{\gamma_a V_a}{\gamma_m V_m} \quad (20)$$

esto es

$$W_m = \gamma_m V_m = \frac{245.28}{0.0357} = 6875.26 \text{ ton/día} \quad (21)$$

y como γ_m es 1022.71 se tiene

$$V_m = \frac{W_m}{\gamma_m} = 6722.5 \text{ m}^3/\text{día} \quad (22)$$

Es decir se debe esperar un promedio diario anual de 6722.5 m^3 de lodo que se depositarán en el sedimentador, el intervalo de variación es muy amplio, se dispone de poca información pero puede decirse que va de 4000 a 9000 m^3 / día.

6.3.- OBRA DE TOMA.

El diseño de la obra de toma no sufre modificación respecto del diseño original, ver fig 4, al no presentarse vórtices durante la simulación de la operación. Sólo se amplía la zona considerada en la elev 1443, piso de la toma horizontal, y los talúdes laterales que por restricciones de estabilidad y economía son 1.5 : 1.

6.4 ARRASTRE DE SEDIMENTOS.

Para arrastrar o mejor dicho resuspender todo el lodo retenido en el sedimentador por medios hidráulicos, evitando el costoso equipo mecánico, es preciso determinar la velocidad mínima de arrastre. En la literatura sobre el tema se recomiendan valores desde 15 cm/s hasta 1.0 m/s (refs 25 y 56). Por la naturaleza de operación del tanque es necesario determinar un intervalo más pequeño y estimar cuánto tiempo opera el sedimentador con velocidades tales que arrastre el lodo hacia la toma. Se dispuso la realización de ensayos con sedimento del prototipo, con poco tiempo de permanencia, de 1 a 2 h, en un canal de pendiente variable de Laboratorio, concluyéndose que con velocidades de entre 13 y 16 cm/s se produce el arrastre de todos los

sedimentos depositados. Sin embargo la rugosidad de la plantilla del sedimentador (piso con recubrimiento rocoso), puede afectar este límite por lo que se recomienda utilizar un valor entre 20 y 30 cm/s para el inicio de arrastre. El tiempo que opera el sedimentador con velocidades iguales o mayores a la indicada es de 40 min, mismos que se consideran suficientes para que produzca arrastre de prácticamente todo el sedimento.

7.- CONCLUSIONES.

La realización de estudios experimentales sigue siendo una parte vital en áreas donde la aplicación de la teoría es aún limitada. En particular el proyecto Agua Prieta por ser pionero en el aprovechamiento de aguas residuales para la generación de energía eléctrica, ha enfrentado en su diseño problemas sin precedentes en el medio y ha generado la realización de estudios específicos, entre los cuales se encuentran los presentados en este trabajo.

Partiendo de escasa información de campo y de literatura sobre el tema, se ha realizado investigación básica en la simulación de depósito de sedimentos, la utilización de técnicas de trazado y el desarrollo y aplicación de la técnica de sedimentación en columna para el caso específico del proyecto.

Se ha llegado a una propuesta de diseño, del sistema

regulador sedimentador, que considerando numerosos factores técnicos, satisface con creces las expectativas iniciales de manejo de grandes volúmenes de aguas residuales y sedimentos orgánicos, proponiéndose una esquema , como el mostrado en la fig 45 que consiste; en un desarenador antes del tanque, una estructura repartidora en la entrada, un tanque sedimentador de 90 m de ancho por 250 m de largo y 9 m de profundidad en promedio, a la salida se tiene un vertedor de 90 m de longitud de cresta, con lo cual se contribuye a uniformizar el flujo, y en consecuencia la eficiencia de remoción, para después pasar el agua prácticamente sin sedimentos al vaso regulador. Se considera una geometría sencilla, funcional y por ser autolimpiable será muy económica su operación.

Se ha logrado obtener información de las concentraciones de sólidos que transportan los afluentes principales (Atemajac y San Juan de Dios), detectando magnitudes y composición. Se determinaron los diferentes comportamientos de sedimentación que presentan los sólidos transportados por cada uno de los afluentes, y del agua mezclada en una relación 1:1. La estimación de volúmenes de lodos, factor de gran relieve en el diseño puede realizarse en base a las pruebas de sedimentación y a las expresiones descritas en la ref 42, determinándose con razonable aproximación el valor promedio diario, 6700 m³.

La utilización de los modelos hidráulicos mostró ser una herramienta fundamental para el diseño final. En este caso en particular asociado al análisis de sedimentación con trazadores sólidos, el caolín demostró ser un trazador confiable y que en buena medida ayudó a la comprensión del fenómeno de sedimentación dentro del tanque regulador y posteriormente en el análisis de alternativas de ubicación del tanque sedimentador. El profundizar en su aplicación en otros casos o con otra escala de líneas en modelo es uno de los trabajos que se tienen pendientes por desarrollar.

Se estima que resultará muy interesante la determinación de los efectos de escala que se presentan al simular el fenómeno de sedimentación en los modelos 1:20 y 1:80, en el trabajo se esbozan las diferencias notables en el estudio de trazado con eosina para los dos casos, desafortunadamente por cuestiones de tiempo no fue posible profundizar en este sentido, y será una de las actividades a realizar próximamente. El análisis de presencia de vórtices al operar la obra de toma resultó satisfactorio y convincente, gracias a la selección de una escala de líneas que garantizó una correcta simulación al reducir los efectos de escala al mínimo, el diseño de la toma al cumplir con las recomendaciones de la literatura no presentó problemas en su operación, excepto al analizarse en un modelo con grandes

efectos de escala, el modelo 1:80.

Para el análisis de alternativas y determinación de la eficiencia del tanque sedimentador se utilizaron: a) la técnica estímulo-respuesta, utilizando eosina como trazador líquido, y b) el método de Rebhun y Argaman. Esta técnica es muy utilizada en el análisis de sedimentadores de plantas de tratamiento y en principio proporciona elementos de evaluación satisfactorios. No es motivo de este trabajo determinar si son los mejores alternativas de evaluación pero sin duda sería un estudio de gran interés el compararlos y en su caso mejorarlos.

AGRADECIMIENTOS.

La totalidad del estudio ha sido financiada y elaborada por la Comisión Federal de Electricidad, en particular la Gerencia de Proyectos Hidroeléctricos por medio de la Subgerencia de Diseños Hidroeléctricos, deben señalarse y agradecer todo el apoyo brindado a los Ings Agustín Cárdenas B., Sergio Palafox R, y Humberto Marengo M.. Fundamental para la concepción de buena parte de los estudios y el proyecto del tanque regulador-sedimentador ha sido el Prof. Raúl Marsal, en particular el estudio de sedimentación fue concebido bajo su dirección, siendo por supuesto parte esencial en el análisis de resultados y diseño final del tanque.

Al Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. que en lo general proporcionó asesoría técnica e incluso equipo, en especial al Prof. J.L. Sánchez B., a los Dres. Gabriel Echávez A., Blanca Jiménez C. y al M. en I. Victor Franco. Al Dr Jesús

Gracia especial referencia por sus valiosas y decisivas aportaciones, sus consejos sobre la concepción del estudio y la dirección de esta tesis

Al personal del Laboratorio de Hidráulica ya que ellos realizaron los estudios experimentales y contribuyeron en el desarrollo de los dispositivos con valiosas aportaciones. Deben señalarse a los Ings. Juan A. González C., José A. González V., Gerardo Garcés F., Alfonso Camacho G., Eduardo Córdoba A., y Franz Rojas O.. En la realización de los ensayos intervinieron los Sres J.L. Calderón, Mariano Ojeda, y la Sra Isabel Flores C.. El apoyo en dibujo y mecanografía de todo el estudio ha corrido a cargo de la Sra Dalía Mendoza y la Srita. Verónica Moreno respectivamente. A todos ellos agradezco su entusiasta participación.

Al CONACYT, ya que gracias a una beca de esta institución me fue posible realizar los estudios de maestría.

REFERENCIAS.

- 1.-Anderson, N.E. : "Design of Final Settling Tanks for Activated Sludge", Sew. Works., Vol 17, 50, 1945.
- 2.-Anwar, H. O.; "Prevention of Vortices at Intakes", Water Power, Vol 10, No 1, Oct. 1968.
- 3.-Anwar, H.O., Weller, J.A. and Amphlett, M.B.; "Similitary of free vortex at horizontal intake", Journal of Hydraulic Div./ vol. 16 No. 2, 1978, pp 95-105.
- 4.-American Public Health Association, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, 19th ed. 1975.
- 5.-Bradley R.A. and Krone R.B., "Shearing Effects on Settling of Activated Sludge", Proc. ASCE, Vol. 97, No. SA1, Feb. 1971.
- 6.-Billmeier, E. "Verbesserte Bemessungsvorschläge für horizontal durchströmte Nachklärbecken von Belebungsanlagen", Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Institut für Bauningenieurwesen, Technische Universität München, Nr 21, 1978.

7.-Camp, T. R., "Sedimentation and Design of Settling Tanks", Transactions ASCE, Vol. 3, No. 2285, pp 445-486, 1945.

8.-Camp, T.R.; "Sedimentation and the Design of Settling Tanks", Transactions, ASCE, Vol. 111, Paper No.2285, 1946,pp 895-958.

9.-Castro, P.; "An investigation of Scale Effects in Vortex Modeling by Model and Prototype Comparison", Master's Thesis Alden Research Laboratory, Worcester Polytechnic Institute, Nov. 1979.

10.-Clark, J.W.,Viessman, W., Jr., and Hammer, M. J. ; "Water Supply and Pollution Control", and ed., International Textbook Co., Scranton, Pa., 1971.

11.- C.F.E., LAPEM; "Estudio de Aguas para el P.H. Agua Prieta", Irapuato, Gto.,1985.12.-C.F.E., Laboratorio de Hidráulica ; "2^{do} Reporte del Funcionamiento del Modelo Físico 1:80, P.H. Agua Prieta, Jal.", Informe Interno, Cuernavaca, Mor., Dic. 1986.

13.- C.F.E., Laboratorio de Hidráulica ; "Modelo Hidráulico de la Obra de Toma del P.H. Agua Prieta", Informe Interno, Cuernavaca, Mor., Junio 1987.

14.-C.F.E.,Laboratorio de Hidráulica ; "Consideraciones sobre el comportamiento de los sedimentos en el tanque de regulación del P.H. Agua Prieta", Informe Interno, Cuernavaca, Mor. 1987.

- 15.-C.F.E., Laboratorio de Hidráulico, ; "Estudio Experimental en el Modelo 1:80 del Tanque de Regulación del P.H. Agua Prieta, Informe de avance durante 1987.", Cuernavaca, Mor., Enero, 1988.
- 16.-C.F.E., Laboratorio de Hidráulica ; "Columna Harvard, Pruebas de Sedimentación, Junio-Julio de 1989 ", Informe Interno, Cuernavaca, Mor. julio 1989.
- 17.-C.F.E., Laboratorio de Hidráulica; "Pruebas de Sedimentación en Columna, agosto-sept. 1989", Informe Interno, Cuernavaca, Mor., Octubre 1989.
- 18.-Christie I.F. and Harbinson R.W., "Model tests of circular sewage sedimentation tanks", Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 1978, 65, Mar., 71-84.
- 19.-Daggett, L.L., and Keulegan, G.H.; "Similitudes in free surface vortex formation", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 110, No. HY11, Nov. 1974, pp 1565-1581.
- 20.-Degrémont, "water Treatment Handbook", Société Générale d'Épuration et d'Assainissement, France 1973.
- 21 -Dhillon, G.S., Sakhuja, V.S. and Paul T.C. ; "Modelling criteria for vortex formation at pipe intakes", Int. Assoc. for Hydraulic Research, XIX Congress, New Delhi, India, 1981, pp 223-233.
- 22.-Echávez G., "Apuntes de Modelos Hidráulicos", apuntes de clase, DEPFI, UNAM, 1984.
- 23.-Eckenfelder, W. and O'Connor, D.; "Biological Waste

Treatment", Pergamon Press, New York, N.Y., 1961.

24.-Environmental Engineering Unit Operations and Unit Processes Laboratory Manual, J.T. O'Connor, ed., Association of Environmental Engineering Professors, July, 1972.

25.-Franco V. and Berezowsky M.V., "Transition Critical Velocity in Pipes Transporting Slurries With Non-Newtonian Behavior", 4th Miami International Symposium Multi-Phase Transport Particulate Phenomena, Dec. 1986, Miami U.S.A.

26.-González Castro J. A., "Estudio experimental del tanque sedimentador del P. H. Agua Prieta", DEPEFI, UNAM, sept 1988.

27 -González, V.J., Espinoza. A.J. y Bourguett,O.V.; "Criterios de modelacion de obras de toma", X Congreso Nal. de Ingenieria Hidráulica, Morelia, Mich. Oct 1988.28.-Gracia S. J.; "Estudio Experimental del comportamiento del material en suspensión dentro de un embalse". Proy. 6305, Instituto de Ingenieria, UNAM, México, D.F., 1987.

29.-Groche, D. "Die messung von Fließvorgängen in angeführten Bauwerken der Abwasserreinigung mit Hilfe von künstlichen Isotopen und ihre Auswertung sowie Rückschlüsse auf die Konstruktionselemente". Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, München 1964.

30.-Hirsch, A.A.; "Basin Tracer Curves Interpreted by Basic Analytics", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol. 95, No. SA6, Proc. Paper 6951, p.p. 1031-1050, Dec.,1965.

31.-Horváth Imre; "Modelling in the Technology of Wastewater

Treatment", Pergamon Press, Budapest, Hungria, 1984.

32.-Hughes, R.L.; Discussion of "Similitude conditions in free surface vortex formations", Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol 101, NO. HY9, Proc. Paper 11535, Sept. 1975, pp 1287-1288.

33.Humenick, M.J., "Water and Wastewater Treatment Calculations for Chemical and physical Processes", Marcel Dekker, Philadelphia, Pa. 1977.

34.-Ivicsics Lajas; "Hydraulic Models", VITUKI, Budapest, Hungria, 1975.

35 -Jain, A.K., Garde, R.J. and Ranga Raju, K.G.; "Similitude in vortex formation at pipe intakes", Proc. 47th Research Session of Central Board of Irrigation and Power, New Delhi, Vol. II, HYD., Nov., 1978, pp 50-60.

36.-Jiménez C.B., et al "Estudio del funcionamiento de un sedimentador de alta tasa ", Proy. 6309, I.I., UNAM, México, D.F., mayo, 1987.

37.-Langhaar, H.L.; "Dimensional Analysis and Theory of Models", Chapman and Hall Ltd., Third Printing 1957.

38.-Larsen, P., "On the Hydraulics of Rectangular Settling Basins - Experimental and Theoretical Studies", Report NO 1001, Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, Lund Sweden, 1977.

39.-Marengo M. H., "The Agua Prieta Hydro Project in Mexico", Proc. Hydro 88, Water Power & Dam Construction, México 1988.

- 40.-Maza A.J. y Franco V., "Técnicas Experimentales", Manual de Diseño de Obras Civiles, A.2.15, C.F.E., Méx. 1983.
- 41.- Maza A. J.A. y García F. M., "Hidrodinámica, bases para Hidráulica Fluvial", No. D-20, Inst. de Ingeniería, UNAM, México, mayo 1984.
- 42.-Maza A. J. A., "Introducción to River Engineering", D-71, DEPMI, UNAM, México, D.F., marzo 1987.
- 43.-Maza A.J.A., "Hidráulica Fluvial, apuntes de clase", DEPMI, UNAM, México 1985.
- 44.-McCorquodale, J.A., "Hydraulic Study of the Circular Settling Tanks at the West Windsor Pollution Control Plant", A report submitted to La fontaine, Cowie, Burato & Associates Ltd., Consulting Engineers, Windsor, Ontario.
- 45.-Mc Laughlin T.R., "The Settling Properties of Suspensions", Proc. ASCE, Vol 85, No. HY 12, Dec. 1959.
- 46.-Metcalf and Eddy, "Wastewater Engineering Collection, Treatment, Disposal", mc Graw Hill Book Co., Inc., N.Y., 1972.
- 47.-O'Connor, D. and Eckenfelder, W., "Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes", Vol. II, McCabe and Eckenfelder, gr, eds., Reinhold Publishing Corp., New York, N.Y., 1961.
- 48.-Pankhurst, R.C. ; "Dimensional Analysis and Scale Factors", Chapman and Hall Ltd., London 1964.
- 49.-Prossor, M.J., "The Hydraulic Design of Pump Sumps and Intakes", BHRA/CIRJA, Fluid Engineering, July 1977.

50.-Rebhun, M., and Argaman, Y.; "Evaluation of Hydraulic Efficiency of Sedimentation Basins", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, VOL. 91, No. SA5, Proc. Paper 4523, p.p. 37-45, october, 1965.

51.-Resch, H., "Untersuchungen an vertikal durchströmten Nachklärbecken von Belebungsanlagen", berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Institut für Bauingenieurwesen, Technische Universität München, Nr. 29, 1981.

52.-Reynolds, D.T.; "Unit Operations and Process in Environmental Engineering", Brooks/Cole Engineering Division, Wadsworth Inc. Monterey, Cal.,1982.

53.-Stamou A.I. & Rodi W., "Review of Experimental Studies on Sedimentation Tanks", Sonderforschungsbereich 210, Universität Karlsruhe, August 1984.

54.-Tay, Joo-Hwa, "Effects of Length to Width ratio on Hydraulic Behavior of Settling Tanks", Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics and Hydraulics, ASCE, Proc. p. p. 135-145, June 1986.

55.-Tebbutt, T.H.Y., "Primary Sedimentation of Wastewater", University of Birmingham, United Kingdom, Journal W.P.C.F., Vol. 51, No. 12, Dec. 1979.

56.-Technical Practice Committee; "Manual of Practice for Water Pollution Control, Clarifier Design", Water Pollution Control Federation, Washington, D.C., 1985.

57.-Van Leussen W., "Laboratory Experiments on the Settling

Velocity of Mud Flocs", Third International Symposium on River Sedimentation, University of Mississippi, March 31 - April 4, 1986.

58.-Villemonte, J. R., Rohlich, G.A. & Wallace, A.T., "Hydraulic and Removal Efficiencies in Sedimentation Basins", Internationaler Kongress über Wasserverunreinigung, Proc. of the International Conference on Water Pollution Research, München, 1966.

59.-Wallace A.T. and Zollman D. ;"Characterization of Time-Varying Organic Loads.", Journal of Sanitary Engineering Division, SA3, June, 1971.

60.-Zanoni E.A. and Blomquist M.W.; "Column Settling Tests for Flocculant Suspensions", Journal of The Environmental Engineering Division, No.ee3, June 1975, pp 309-318.