

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA



EVALUACION, OPTIMIZACION Y MEJORAMIENTO
DEL SISTEMA HIDRAULICO EN MODELO A
ESCALA DE UNA LAGUNA DE ESTABILIZACION

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO SANITARIO

RICHARD EDUARDO MONTES ESCALANTE
Y OHN WILDER UILLALUA FLORES

LIMA - PERU

ENERO - 1991

SIMBOLOGIA UTILIZADA

| | | |
|------------------|---|-----------------------|
| | Constante adimensional | $a = \sqrt{(1+4Ktd)}$ |
| A | Area | |
| c | Coeficiente de rugosidad de Chezy | |
| C | Coliforme fecal en el efluente | |
| Co: | Coliforme fecal en el afluente | |
| Cs: | Carga superficial | |
| d | Coeficiente de dispersión | |
| D | Coeficiente de dispersión axial | |
| g | Gravedad | |
| h | profundidad de la laguna prototipo | |
| h _m : | profundidad de la laguna modelo | |
| I | Grado de pureza del trazador | |
| k | Coeficiente de rugosidad | |
| K | Constante global de asimilación de DBO o constante de reacción de primer orden | |
| Kb: | Constante de mortalidad bacteriana | |
| Kv: | Constante de Von karman's | |
| l | Longitud de la laguna prototipo | |
| L | Longitud característica de la trayectoria de una partícula típica en un estanque | |
| La: | Carga de DBO aplicada | |
| Lr: | Carga de DBO removida | |
| m | Espacios muertos | |
| M | Flujo mezclado | |

N : Factor de escala

Nf: Concentración del efluente

No: Concentración del afluente

P Flujo pistón

R Radio hidráulico

Re: Número de Reynolds

S : DBO soluble del efluente

So: DBO total del afluente

Sm: DBO máxima para una laguna facultativa

S': Pendiente de la línea de energía

t Tiempo

t Periodo de residencia promedio

to: Periodo de retención teórico

T : Temperatura del agua

Ta: Temperatura del aire del mes más frío

U Velocidad longitudinal promedio

v Velocidad

V : Volumen

W Peso del trazador

σ Tensión superficial

μ : Viscosidad dinámica

γ Viscosidad cinemática

ρ Densidad del agua

SUMARIO

| | Pag. |
|--|------|
| <u>INTRODUCCION</u> | 1 |
| <u>OBJETIVOS Y ALCANCES</u> | 5 |
| <u>ANTECEDENTES</u> | 6 |
| | |
| CAPITULO I - CONCEPTOS FUNDAMENTALES..... | 17 |
| 1.1 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LEYES DE ESCALA. | 18 |
| 1.1.1 Similitud..... | 19 |
| 1.1.2 Relaciones Entre Escala..... | 22 |
| 1.1.3 Escala Derivadas..... | 28 |
| 1.1.4 Modelos Deformados Geométricamente..... | 30 |
| 1.1.5 Efecto De Escala..... | 32 |
| 1.2 MODELOS CINETICOS..... | 35 |
| 1.3 PRUEBA DE TRAZADORES..... | 40 |
| 1.3.1 Sustancias Trazadoras..... | 40 |
| 1.3.2 Procedimiento..... | 42 |

| | pag. |
|---|--------|
| 1.3.3 Limitaciones De La prueba De Trazadores..... | 43 |
| 1.3.4 Análisis de las Características del Reactor..... | 45 |
| a) Periodo de Retención..... | 45 |
| b) Factor De Dispersión Hidráulica..... | 46 |
| c) Teoría De Wolf Resnick..... | 48 |
| d) Análisis de la Curva de Tendencia de Concentración..... | 55 |
| CAPITULO II - MODELAJE..... | 60 |
| 2.1 ELECCION DE LA ESCALA MODELO..... | 61 |
| 2.2 INSTALACION DEL MODELO..... | 71 |
| CAPITULO III - ESTUDIOS REALIZADOS EN EL MODELO..... | 73 |
| 3.1 VERIFICACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO SEGUN EL DISENO ORIGINAL..... | 74 |
| 3.2 EFECTO DE ENTRADAS Y SALIDAS EN LA LAGUNA MODELO..... | 76 |
| 3.2.1 Efecto de una Entrada..... | 76 |
| 3.2.2 Efecto de Dos Entradas..... | 77 |
| 3.2.3 Efecto de Tres Entradas..... | 78 |
| 3.2.4 Efecto de Tres Entradas y Tres salidas..... | 78 |
| 3.3 EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DE LOS EXPERIMENTOS SELECCIONADOS..... | 79 |
| 3.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS..... | 81 |

Página

CAPITULO IV - ANALISIS DE BENEFICIO

COSTO.....96

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....100

ANEXOS.....103

BIBLIOGRAFIA.....131

LISTA DE CUADROS

| <u>DESCRIPCION</u> | <u>Pag.</u> |
|---|-------------|
| 1..Evaluación de las características hidráulicas en la laguna de simulación..... | 85 |
| 2..Evaluación de las características hidráulicas en la laguna de simulación..... | 86 |
| 3..Determinación de las eficiencias de tratamiento en las lagunas de simulación..... | 87 |
| 4..Determinación de las eficiencias de tratamiento en las lagunas de simulación..... | 88 |
| 5..Coeficiente de reacción de primer orden..... | 89 |
| 6..Costo total anual del funcionamiento de la laguna prototipo..... | 98 |
| 7..Costo unitario de las estructuras de entrada y salida..... | 98 |
| 8..Costo total por metro cúbico de agua servida tratada..... | 99 |

LISTA DE FIGURAS

| <u>No</u> | <u>DESCRIPCION</u> | <u>Pag.</u> |
|-----------|--|-------------|
| 1... | Flujo pistón..... | 36 |
| 2... | Flujo de mezcla completa..... | 37 |
| 3... | Relación entre la varianza y el factor de dispersión para uso en prueba de trazadores.... | 49 |
| 4... | Cantidad de trazador que permanece en el reactor..... | 53 |
| 5... | Curva Característica de la prueba de trazadores..... | 57 |
| 6... | Indice de Morrill..... | 57 |
| 7... | Lagunas de estabilización de San Juan de Miraflores..... | 63 |
| 8... | Laguna modelo..... | 64 |
| 9... | Configuración de entrada y salida..... | 84 |
| 10... | Curva de concentración Vs. tiempo..... | 90 |
| 11... | Curva de concentración Vs. tiempo..... | 91 |
| 12... | Curva de concentración Vs. tiempo..... | 92 |
| 13... | Curva de concentración Vs. tiempo..... | 93 |
| 14... | Curva de concentración Vs. tiempo..... | 94 |

FE DE ERRATAS

| <u>No.</u> | <u>Linea</u> | <u>Dice</u> | <u>Debe decir</u> |
|------------|--------------|----------------------|----------------------|
| V | 1 | ...adimensional | ...adimensional |
| VI | 13 | periodo de retención | periodo de retención |
| 11 | 17 | Thirimurthy... | Thirimurthi... |
| 71 | 2 | ...en culquier... | ...en cualquier... |
| 75 | 18 | ...figura No 11... | ...figura No 10 |
| 76 | 16 | ...figura No 12... | ...figura No 11 |
| 77 | 21 | ...figura No 13... | ...figura No 12 |
| 78 | 1 | ...figura No 14... | ...figura No 13 |
| 79 | 2 | ...figura No 15... | ...figura No 14 |
| 131 | 16 | YANES... | YANEZ... |
| 132 | 2 | YANES... | YANEZ... |

CONCLUSION

DICE:

6.- La configuración presento un mejor comportamiento hidráulico, **sin embargo,** la configuración se obtuvo un menor costo de tratamiento por metro cúbico de agua residual tratada.

DEBE DECIR:

6.- La configuración P-3 presentó un mejor comportamiento **hidráulico, sin embargo,** en la configuración P-7 se obtuvo un menor costo de tratamiento por metro cúbico de agua residual tratada.

INTRODUCCION

La contaminación y polución de las aguas en el Perú es tan antigua como el desarrollo de las ciudades, por cuanto los ríos, las aguas de mar, sirven como puntos de disposición final para las evacuaciones de las aguas residuales, propias de los pueblos en proceso de desarrollo en el que pueden producir perjuicios por ejemplo: malos olores, sabor al agua potable, muerte de peces. La salud humana puede ser amenazada por la contaminación del agua potable, de los lugares de baño y alimentos que pueden ser regados con este tipo de agua, ya que el cólera, tifoidea, la disentería y otras enfermedades infecciosas encuentran así su modo de propagación.

El objeto del tratamiento del agua residual es evitar el perjuicio a los cauces receptores y la propagación de enfermedades transmisibles del tipo gastrointestinal.

Entre los múltiples procesos que se han empleado

para el tratamiento de aguas residuales, el proceso biológico por medio de lagunas de estabilización es el más usado debido a su alta eficiencia de remoción de carga orgánica y de bacterias patógenas así como a su bajo costo de construcción, operación y mantenimiento.

Una laguna de estabilización se puede definir como estanques pocos profundos, en donde a través de procesos naturales controlados, se establecen condiciones para la reducción de la materia orgánica y destrucción de organismos patógenos en las aguas residuales (Marais 1970).

La eficiencia del tratamiento o el alcance de la conversión de los componentes elementos no deseables de las aguas residuales en una laguna de estabilización depende de las características del desague carga orgánica, condiciones ambientales como la temperatura, velocidad del viento, cantidad de luz y el comportamiento hidráulico dentro de la laguna.

En la **literatura** abundan informes sobre investigaciones para determinar el comportamiento de las lagunas de estabilización, éstos se concentran en la determinación de eficiencias en la remoción de DBO, patógenos y otros parámetros en función de la carga orgánica aplicada y de los tiempos de retención disponibles, en algunos estudios se hace referencia a la

profundidad de la laguna y a la temperatura observada durante el período de estudio.

En el pasado no se tomó mucha importancia a las características hidráulicas, habiéndose dado muy poca atención en la mayoría de los modelos de cinética de reacción de las lagunas de estabilización y así mismo cómo este factor es afectado por la forma de la laguna, la presencia de espacios muertos, cortocircuitos y ubicación de las estructuras de entrada y salida .

Las características hidráulicas obviamente tienen un efecto sobre la dispersión del agua residual, también como en el tiempo promedio de retención, y por consiguiente sobre la eficiencia de remoción de la materia orgánica y organismos patógenos.

En este estudio se evalúa la influencia que tiene el número y ubicación de las estructuras de entrada y salida sobre las características hidráulicas de mezcla, que a la vez determina el grado de eficiencia de remoción de una laguna de estabilización.

Estos análisis se realizaron en un modelo a escala de laboratorio utilizando las leyes de escala hidráulica comparándola con una de las lagunas del complejo de lagunas facultativas de San Juan, ubicadas en el distrito de San Juan de Miraflores.

Esta determinación de las características del flujo pudo ser fácilmente obtenido por inyección de un trazador conocido cuantitativamente en la entrada de la laguna modelo midiendo la concentración del trazador en la salida en función del tiempo.

Los resultados de concentración versus el tiempo proporciona una idea de las características y tipo del flujo que se producen en las lagunas.

OBJETIVOS Y ALCANCES

El presente estudio tiene por finalidad:

Determinar las características hidráulicas de una laguna de estabilización (tipo de mezcla, volúmenes muertos, corto circuitos, período de retención útil, etc.) a partir de mediciones y observaciones efectuadas en una laguna de estabilización a escala de laboratorio.

Proporcionar mayores elementos de juicio al Ingeniero Sanitario para el desarrollo de proyectos.

ANTECEDENTES

la bibliografía sobre lagunas de estabilización presenta un número impresionante de trabajos y reportes de investigación a escala de laboratorio y de campo.

El énfasis en el pasado ha sido la evaluación de lagunas para compuestos orgánicos carbonáceos, nutrientes orgánicos indicadores, bajo la suposición de equilibrio continuo y un submodelo hidráulico de mezcla completa. La interpretación de esos resultados ha sido difícil y muchas veces contradictorio, en especial para organismos microbiano como es el caso del coliforme; mientras que la mayoría de trabajos publicados son en relación con el comportamiento lagunar en la reducción de DBO. Se ha dado muy poca atención al estudio de la reducción de parásitos y bacterias y al comportamiento hidráulico de lagunas.

Como primer esfuerzo por tratar de aplicar un procedimiento racional en el diseño de lagunas de estabilización se utilizó una carga o tasa de trabajo,

la cual respondía a los resultados observados en la operación de múltiples lagunas. Hasta la fecha este procedimiento se sigue por muchos diseñadores. Para ello se puede optar por dos caminos: considerar la carga a utilizar como dato bibliográfico o considerar dicha carga como resultado de trabajo experimental en lagunas piloto.

El primer modelo describe el comportamiento de lagunas en la reducción de compuestos orgánicos fue desarrollado en 1958 por Hermann & Gloyna^{9,14,15} y fue basado en la dependencia de la temperatura y rapidez de oxidación, a través de la ley de Arrhenius modificada. Se obtuvo lo siguiente:

$$V = 0.035 \times Q \times S_a \times 1.085^{(35-T)} \dots (1)$$

En donde:

- V = es el volumen de la laguna (m³)
- Q = caudal del efluente (m³/día)
- S_a = es la DBO última del afluente (mgr/lit)
- T = es la temperatura del agua (°C) correspondiente al mes más frío.

la fórmula anterior fue desarrollada bajo la suposición de mezcla completa y una remoción de DBO soluble de alrededor del 90%. Las primeras objeciones para el uso de esta fórmula, es que se aplica en instalaciones de un sólo reactor y los requisitos de área son grandes en comparación con otros métodos.

Yanez comenta que la ecuación (1) ofrece dificultades

debido al desconocimiento de valores de concentración promedio de deshecho, sugiriendo considerar la carga orgánica tomando una contribución per cápita de 54 Kgr.DBO/Hab-día. Menciona también, que para el cálculo del **área** a partir de la carga superficial C_s en KgDBO/Hab-día es de mayor importancia que el cálculo del volumen puesto que el ingeniero usualmente tiene que efectuar consideraciones sobre profundidad adicional para el almacenamiento de lodos, la misma que es expresada:

$$C_s = Q \times S_a \times 10^3$$

Reemplazando en la ecuación (1):

$$V = \frac{0.035 \times C_s \times 1.085^{(35-T)}}{S_a \times 0.05}$$

Como:

$$V = A \times h$$

$$A \times h = \frac{35 \times S_a \times 1.085^{(35-T)}}{0.05} \dots (2)$$

En 1970 Marais y Shaw propone un modelo basado en una cinética de primer orden y flujo completamente mezclado:

$$S = \frac{S_a}{1 + K \times t_o} \dots (3)$$

En donde:

S_a = la DBO total del efluente (mg/lt)
= la DBO soluble del efluente (mgr/lt)
- la constante de degradación de primer orden (días)⁻¹
 t_o - el periodo de retención en días.

Posteriormente Marais propone que la DBO máxima para una laguna facultativa (S_m), antes que prevalezcan

condiciones anaeróbicas, es:

$$S_m = 700 / (0.18h+8) \dots (4)$$

En relación con el valor de K, la bibliografía indica discrepancias, mientras que Gloyna reportó un valor de $K=0.6 \text{ días}^{-1}$ para 35 C y $K=0.176 \text{ días}^{-1}$ para 20°C . Estudios posteriores de Chang y Gloyna reportaron valores de 0.619 , 0.472 y 0.295 días^{-1} para una serie de tres lagunas con periodos de retención de 32 y 62 días respectivamente.

Se han reportado correlaciones empíricas de la forma:

$$L_r = A+BxL_a \dots (5)$$

En donde:

L_r y L_a son las cargas de DBO removida y aplicada
 A y B son los símbolos de constantes empíricas

En 1970 Mc Garry y Pescod reportaron valores de $A=10.35$ y $B=0.79$. Mientras la fórmula anterior permite calcular la remoción de DBO en forma aproximada la siguiente correlación empírica, describe la máxima carga aplicada en función a la temperatura:

$$L_a = 400.5 \times 1.0993 \times T^{-20} \dots (6)$$

En donde:

T - temperatura del aire del mes más frío

El uso de las dos correlaciones anteriores ha sido aceptado por muchos diseñadores pero la fórmula (5) ha sido inadecuada para lagunas en serie, sin corregir la DEO soluble a la DEO total, en cada efluente.

Estudios realizados por Yáñez en las lagunas de San Juan^{7,14,15} determinó las siguientes relaciones:

$$L_r = 7.67 + 0.8063 * L_a \text{ (PRIMARIA)...(7)}$$

$$L_r = -0.8 + 0.76 * L_a \text{ (SECUNDARIA)...(8)}$$

En 1967 y 1969 tanto Murphy como Thirumurthi^{9,4} fueron los primeros investigadores en considerar que en la práctica la hidráulica de las laguna no obedece a un régimen de flujo pistón ni de mezcla completa, sino en realidad se comportan como un flujo intermedio, basándose en el modelo de dispersión axial:

$$\frac{dN}{dt} = D \cdot \frac{d^2N}{dx^2} - U \cdot \frac{dN}{dx} - K_b \cdot N \dots \dots (9)$$

La ecuación fue integrada por Wehner y Wilhelm que representa reactores químicos con propiedades de mezcla no ideal:

$$N = \frac{4xax e^{(0.5xax)}}{(1+a)^2 x e^{ax/2 \cdot d} - (1-a)^2 x e^{-ax/2 \cdot d}} \dots \dots (10)$$

Donde:

$$a = (1 + 4xK_x t x d)^{0.5}$$

$$d = D / (U \times L \times \underline{D} \times t)$$

Donde:

- K_b = la Cte. de reacción de primer orden
- D = el coeficiente de dispersión axial (m²/día),
- L = longitud característica de la trayectoria de una partícula típica en el tanque(m)
- t = tiempo promedio de retención
- No = DBO en el afluente
- N = DBO en el efluente.

Thirimurthy¹⁶ propuso la simplificación de esta ecuación señalada anteriormente para valores de "d" menores a la unidad:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{4 * a * e^{((1-a)/2 * d)}}{(1+a)^2} \dots (11)$$

Sáenz Forero considera la misma simplificación anterior para "d" menores que 2, situación usual en lagunas de estabilización

Thirimurthy condujo pruebas de trazadores a escala de laboratorio usando una solución sobre saturada de cloruro de sodio deduciendo:

(1) Que las lagunas de estabilización no puede diseñarse racionalmente si se considera como flujo pistón o sistema de flujo con mezcla completa. Sin embargo, el grado de aproximación del comportamiento dentro del reactor es menor cuando la ecuación de flujo pistón es utilizada para lagunas rectangulares.

(2) La Ec. Wehner Wilhem y el cuadro correspondiente para flujos no ideales constituyen los argumentos básicos apropiados para el diseño de una laguna de oxidación.

El coeficiente de remoción de DBO de primer orden, K debe constituirse en el criterio básico para los proyectos.

En 1972 Mangelson Wetters³, condujeron experimentos a escala de campo en tres lagunas de Logan Utah, EEUU. con estos datos se reportan periodos de retención experimentales promedio del orden 51.1 - 65.2% del teórico para lagunas con relación largo ancho del orden de 2. Los datos de Logan indican que el pico de la curva de concentración/tiempo se produce alrededor del 10% del tiempo de residencia teórico. Los mismos autores condujeron experimentos a escala piloto para investigar la influencia de la forma y localización de estructuras de ingreso y salida en la eficiencia hidráulica. Estos autores presentan las siguientes importantes conclusiones:

(1) Factores ambientales como la temperatura y en especial el viento, tienen marcada influencia en la prueba de trazadores, de modo que se debe considerar la falta de repetibilidad experimental (esto implica que es importante conducir muchas pruebas de trazadores).

(2) La configuración de los mecanismos de entrada y salida tienen un efecto significativo en el desempeño hidráulico de la lagunas y su eficiencia.

(3) La mayor influencia en el desempeño de lagunas es la relación largo/ancho. El mejor desempeño hidráulico fue obtenido en lagunas subdivididas por pantallas.

(4) La hidráulica de lagunas de estabilización juega un papel muy importante en la determinación de la eficiencia del tratamiento.

en 1981 Dissanayake propuso la utilización del modelo de Thirimurthy para reducción de bacterias con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{1 + 4 \times k_b \times t}} \dots (12)$$

$$C_0 = \frac{C \times \sqrt{1 + 4 \times k_b \times t}}{1 - a} - \frac{C \times \sqrt{1 + 4 \times k_b \times t}}{1 + a}$$

$$\sqrt{1 + 4 \times k_b \times t} \dots (13)$$

En donde:

C_0 y C - son los conteos de coliformes fecal en afluente y efluente (NMP/100 ml.)

El modelo de dispersión axial propuesto por Wehner & Wilhelm presentó la dificultad de determinar la constante de dispersión "d" llegando a considerar muy difícil su aplicación. Sin embargo en 1985 Polprasert & Hattarai⁴, propuso una ecuación para determinar la constante de dispersión "d" en flujos parcialmente mezclados o flujo disperso. Esta ecuación está propuesta para usar en diseños de lagunas para reducción de materia orgánica y bacterias. Esta ecuación considera los efectos de tiempos de retención hidráulica (t), coeficiente del grado de reacción y el factor de dispersión,

incluyéndolos cortos circuitos y además el proceso del transporte hidráulico con influencia del funcionamiento de la laguna:

Partiendo de la Ec. de Fischewr(1980)

$$D = 0.225 \times V_a \times L_c^2 \dots \dots \dots (14)$$

$$K_v^2 \times R$$

Donde:

- Lc - distancia hidráulica ó h/2 profundidad media
- Kv - Cte. Van Karman's = 0.4 para flujos homogéneos.
- Va= velocidad asterisco = $V_x \cdot (f/8)$
- f = $24 \times Re$
- Re= $V_x \times d_o = 4 \times L \times W \times Z / (W + 2 \times Z) \times t$.
- γ = viscosidad cinemática.

Reemplazando:

$$d = \frac{0.184 \times (t \times V_x \times W + 2 \times Z)^{0.487} \times W^{1.511}}{(LZ)^{1.487}} \dots \dots (15)$$

Sáenz tranformó esta ecuación para expresar la viscosidad cinemática en función de la temperatura del agua (T) en °C.

$$d = \frac{1.158 \times t \times (W + 2 \times Z)^{0.487} \times W^{1.511}}{(T + 42.5)^{0.734} \times (LZ)^{1.487}} \dots \dots \dots (16)$$

Actualmente, Sáenz Forero propone un procedimiento de diseño que considera, además de la cinética, el comportamiento hidráulico de la laguna.

Dicho procedimiento considera un cálculo preliminar basado en una relación ancho, largo a la dispersión.

las ecuaciones fundamentales que utiliza son:

$$N = \frac{4xax_0e^{((1-a)/2 \cdot d)}}{(1+a)^2} \text{ para contaminantes. (17)}$$

$$N_0 = \frac{4xax_0e^{((1-a)/2 \cdot d)}}{(1+a)^2}$$

$$C = \frac{4xabx_0e^{((1-ab)/2 \cdot d)}}{(1+ab)^2} \text{ para bacterias. (18)}$$

$$C_0 = \frac{4xabx_0e^{((1-ab)/2 \cdot d)}}{(1+ab)^2}$$

$$a = \sqrt{(1+4xKxtd)}$$

$$ab = \sqrt{(1+4xK_b \cdot xtd)}$$

Una vez hecho los diseños preliminares se determinará un valor de "d" más real mediante la ecuación (16).

Donde:

K_b = Constante de remoción de Coliformes fecales
 K = Constante de remoción de DBO.

En los estudios de San Juan, se ha reconocido la importancia de evaluar el aspecto hidráulico de las lagunas se han programado pruebas con Rhodamina y Yodo cada mes. Hasta el momento se han realizado 15 pruebas de trazadores en lagunas primarias, secundarias y terciarias de varias formas, en condiciones de invierno y verano. Las conclusiones más importantes fueron:

(1) observaron grandes corto circuitos en todas las lagunas evaluadas principalmente en verano, por la **estratificación** térmica producidas por alta temperatura del medio ambiente.

(2) La **prueba** con trazadores radiactivos en lagunas son muy caras y tediosas que las pruebas con colorante como la Rhodamina WT. Con trazadores como el es necesario aplicar técnicas de concentración a las

muestras, la cual demanda un gran esfuerzo.

(3) Se desarrollo un tipo de trazador de características similares a la Rhodamina WT diluyendo Rhodamina B (en polvo) En alcohol acidificado. Este trazador presenta características de no biodegradable y ausencia de adsorción de sólidos.

C A P I T U L O I

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1.- CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LEYES DE ESCALA

La historia de la hidráulica ha dependido enormemente de los datos experimentales por que algunos flujos reales pueden ser resueltos exactamente por métodos analíticos, las soluciones a los problemas reales involucra una combinación de los métodos y de la información experimental.

Un modelo representa de una manera simplificada la complejidad de la naturaleza. Esta simplificación o mejor esquematización, es perfectamente lícita puesto que para la solución de cualquier problema es necesario construir un modelo. La palabra modelo no debe entenderse únicamente con el significado restringido que tiene la hidráulica, sino que el modelo es toda esquematización de la realidad con fines de estudio.

Para representar las condiciones del prototipo en la manera más justa en el modelo es necesario tener un conocimiento profundo de la mecánica de los fluidos. Este conocimiento también es necesario para hacer interpretaciones correctas de los resultados del modelo.

Es obvio que además del conocimiento de la mecánica de fluidos es necesario el conocimiento de la técnica de modelos. En esto, el cálculo de las escalas constituye un elemento muy importante del cual se tratará en los párrafos siguientes.

1.1.1. SIMILITUD

Existe similitud entre un modelo y el prototipo cuando la proporción de las magnitudes de éste es igual la proporción de las magnitudes correspondientes al modelo. Entendiéndose como magnitudes básicas: La longitud, masa y tiempo. Existe tres clases de similitud:

Similitud Geométrica: Dos objetos son geoméricamente similares cuando son iguales las proporciones de todas las medidas correspondientes. Para las tres dimensiones X, Y, Z de un objeto rige:

$$\frac{X_p}{X_m} = N_x$$

$$\frac{Y_p}{Y_m} = N_y$$

$$\frac{Z_p}{Z_m} = N_z$$

Donde:

p = prototipo
m = modelo
N = factor de escala.

Entonces hay similitud hidráulica cuando:

$$N_x = N_y = N_z$$

Similitud Cinemática: Dos objetos o masas en movimiento son cinemáticamente conformes cuando la trayectoria del movimiento es matemáticamente similar y además es igual la proporción de velocidad de las partes correspondientes de los objetos en movimiento. Por ejemplo la celeridad de un barco y la velocidad del flujo de retorno del agua al lado del barco tienen valores de 4 y 0.5 m/s respectivamente en el prototipo y de 0.8 y 0.1 m/s respectivamente en el modelo.

Las condiciones de similitud cinemática para un modelo son:

Trayectoria en escala geométrica.

Escala de tiempo en el modelo deberá tener el mismo valor en todas partes.

Escala de velocidad en el modelo deberá tener el mismo valor en todas partes.

Entonces para una situación de:

$$l = v \times t$$

Debe regir la ley de escala siguiente:

$$N_x = N_y \times N_z$$

En un modelo distorsionado, cuando la escala horizontal y la escala vertical no son iguales:

$$N_x = N_y \neq N_z$$

No hay similitud cinemática en la dirección vertical.

Observaciones realizadas han demostrado que los movimientos verticales son muy pequeños respecto los movimientos horizontales, esta falla (un efecto de escala) en muchos casos son despreciables.

Similitud Dinámica: hay similitud dinámica cuando las masas correspondientes tienen similitud cinemática bajo influencia de las fuerzas correspondientes.

Esta similitud está basada en la segunda ley de Newton:

$$F = m \times a$$

Donde:

F= fuerza en Newton
m= masa en kg.
a= aceleración en m/s²

En las investigaciones en modelos existe la exigencia general de que determinadas fuerzas se deben representar en la misma escala.

El factor de escala de la fuerza es:

$$N_F = N_m \times N_L$$

En todas las investigaciones en modelo las fuerzas son importantes (como la fuerza de gravedad) y por lo tanto son magnitudes determinantes.

1.1.2 RELACIONES ENTRE ESCALAS.-

La fuerza ejercida sobre un cuerpo generalmente están compuesta de varias fuerzas, sin embargo una o más fuerzas del sistema completo pueden dominar las demás fuerzas .

En los fenómenos que se presentan en los movimientos de los fluidos pueden ser importantes las siguientes fuerzas:

Fricción de pared en flujo a lo largo de paredes.

Fuerza de arrastre por viscosidad.

La gravedad (el peso del fluido).

Fuerza externas (entre otras presentándose en compresión de fluidos). Fuerzas superficiales

(por tensión superficial).

La relación entre escalas se puede derivar de:

Leyes físicas.

La exigencia de que sea igual la proporción de determinadas fuerzas en el modelo y en el prototipo.

Relaciones determinadas experimentalmente.

La condición de la existencia de la relación es que ley dada rige tanto en el modelo como en el prototipo.

Como ejemplo de una relación determinada experimentalmente se puede mencionar la ecuación de Chezy:

$$v = c \times \sqrt{(R \wedge S)} \dots \dots \dots (19)$$

para canales anchos $\Rightarrow R = Y - h$

$$v = c \times \sqrt{(h \wedge S)}$$

$$v_p = c_p \times \sqrt{(h_p \wedge S_p)} \dots \dots (a)$$

$$v_m = c_m \wedge \sqrt{(h_m \wedge S_m)} \dots \dots (b)$$

Dividiendo (a) / (b) se tiene:

$$N_v = N_c \times \sqrt{(N_h \times N_s)}$$

para $N_c = 1$:

$$N_v = \sqrt{(N_h \times N_s)} \dots \dots \dots (20)$$

Otras leyes de escala son determinadas de la proporción de las fuerzas dominantes del modelo y del prototipo. Este tipo de leyes de escala se tratará en los párrafos siguientes.

a) LAS LEYES DE FROUDE:

En la ley de escala de Froude se asume que el movimiento del fluido es causado exclusivamente por la gravedad. Otras fuerzas como la viscosidad y la tensión superficial no son consideradas.

En la derivación de la ley de escala de Froude se parte del factor de escala de la influencia de la gravedad:

$$K = m \times g$$

$$N_K = N_m \times N_g$$

Pasando a unidades dimensionales:

$$N_K = N_\rho \times N_1^3 \times N_g$$

Como: $N_g = \frac{N_1}{N_t^2}$ ó $N_t^2 = \frac{N_1}{N_g}$

Entonces: $N_K = N_\rho \times N_1^3 \times \frac{N_1}{N_t^2}$

Donde:

- K = peso
- m = masa
- g = gravedad
- ρ = densidad

Asumiendo que la fuerza de gravedad "g" es

igual en todo el mundo ($N_G = 1$) se obtiene:

$$N_e = (N_1)^{0.5}$$

El factor de escala de la velocidad se puede derivar de:

$$N_e = (N_1)^{0.5}$$

$$N_e^2 = N_1 \Rightarrow N_e = \frac{N_1}{N_e}$$

Pero: $N_v = \frac{N_1}{N_e}$

Entonces:

$$N_e = N_v = N_1^{0.5} \dots \dots \dots (21)$$

LEY DE ESCALA DE FROUDE

b) LEY DE ESCALA DE REYNOLDS:

Cuando dominan las fuerzas causadas por la viscosidad del fluido, no se puede aplicar la relación de escala basada en la ley de Froude.

En modelos donde predominan la viscosidad (por ejemplo canales ancho de flujo laminar) se selecciona la escala según la ley de escala de Reynolds.

La tensión de arrastre es el producto de la

viscosidad dinámica por el gradiente de velocidad:

$$T_o = \mu \times \frac{dV}{d_1}$$

En la que:

T_o = tensión superficial de arrastre en newton/mt
 μ = viscosidad dinámica en newton.seg/mt.
 dV/d_1 = gradiente de velocidad

La fuerza interna debida a la tension superficial de arrastre en un área del tamaño de "A" es:

$$k = A \times \mu \times \frac{dV}{d_1}$$

Para cálculo hidráulico en lugar de viscosidad dinámica " " muchas veces se utiliza la viscosidad cinemática():

$$\mu = \rho \times \nu$$

Entonces:

$$N_k = N_1^2 \times N_p \times N_v \times \frac{N_v}{N_1}$$

Igualando N_k la escala de "la fuerza de inercia" ($m \times a$) se deriva:

$$N_k = N_p \times N_1^3 \times \frac{N_1}{N_1^2} = N_1^2 \times N_p \times N_v \times \frac{N_v}{N_1}$$

$$N_v = \frac{N_v}{N_1} \dots \dots \dots (22) \text{ LA LEY DE ESCALA DE REYNOLDS}$$

Para fluidos iguales en el modelo y en el prototipo:

$$N_v = 1$$
$$N_v \propto N_1^{-1} \dots\dots\dots(23)$$

De ello se define que las leyes de escala de Froude y Reynolds no coinciden, por que las fuerzas de la gravedad y las fuerzas de viscosidad no pueden representarse en la misma escala en un solo modelo. En el caso en que las fuerzas de gravedad sea importante, la fuerza de viscosidad debe ser tan pequeña como sea posible, en otras palabras: En un modelo que predomina las fuerzas de gravedad, el efecto de escala debido a fuerzas de la viscosidad deben limitarse a un mínimo.

c) LEY DE ESCALA DE WEBER:

La ley de Weber rige en estudios en modelos en los que la tensión superficial es determinante para la selección de escalas.

La fuerza que presenta la tensión superficial por unidad de longitud es:

$$K = \sigma \times l$$

En que:

σ = tensión superficial en newton/m.

el factor de escala para fuerzas es:

$$N_k = N_f \times N_l$$

Igualando al factor de escala de la "Fuerza de inercia" ($m \times a$) se deriva:

$$N_p \times N_l^2 \times N_v^2 = N_\sigma \times N_l$$
$$n_v = \left(\frac{N_\sigma}{N_p \times N_l} \right)^{0.5} \dots \dots (24)$$

Si se aplica el mismo fluido en el modelo y en el prototipo: $N_\sigma = N_p = 1$

Entonces:

$$N_v = \left(\frac{1}{N_l} \right)^{0.5} \dots \dots (25) \text{ LEY DE ESCALA DE WEBER}$$

Comparando esta relación con la ley de escala de Froude se puede ver que no es posible representar en un solo modelo simultáneamente la influencia de la gravedad y la influencia de la tensión superficial.

1.1.3. ESCALAS DERIVADAS

En los párrafos anteriores se han derivado tres leyes de escala: Ley de Froude, Ley de Reynold y Ley de Weber, cuando se asume un valor para la escala de longitudes N_l (factor de escala de longitudes) como escala básica.

También se ha determinado una escala derivada de ello, es decir, la escala de velocidad (el factor de escala) N_v , luego otras escalas derivadas pueden ser determinadas de manera sencilla, por ejemplo, partiendo de la ley de escala de Froude:

$$N_v = (N_1)^{0.5}$$

Se deriva el valor de escala de tiempo utilizando la relación:

$$t = \frac{1}{v}$$

$$N_t = \frac{N_1}{N_v}$$

$$N_v = (N_1)^{0.5}$$

$$N_t = \frac{N_1}{(N_1)^{0.5}}$$

$$\Rightarrow N_t = (N_1)^{0.5} \dots (26)$$

Para la escala de caudal rige:

$$Q = v \times A$$

$$N_Q = N_v \times N_A = N_v \times N_1^2$$

$$N_Q = N_1^{0.5} \times N_1^2$$

$$\Rightarrow N_Q = (N_1)^{2.5} \dots (27)$$

1.1.4. MODELOS DEFORMADOS GEOMETRICAMENTE

Distorsionar un modelo, es seleccionar la escala vertical diferente de la escala horizontal ($N_v < > N_h$).

Se distorsiona un modelo por motivos económicos o para disminuir y/o prevenir determinados efectos de escala.

En modelos de fondo fijo, en los que se estudia la distribución horizontal del flujo y en los que está determinado principalmente por la gravedad y por la resistencia que encuentra por la rugosidad del fondo, se debe cumplir con la ley de escala de Froude (basadas en las fuerzas de gravedad):

$$N_v = (N_h)^{0.5}$$

Y con la ley de escala derivada de la relación experimental $C \propto \sqrt{(h \times S)}$ (Ecuación de Chezy) en la que se representa la influencia de la rugosidad del flujo:

$$N_v = N_c \propto \sqrt{(N_h \times N_s)}$$

$$S = \frac{h}{N_1} \Rightarrow N_s = \frac{N_h}{N_1}$$

$$N_v = (N_1)^{0.5} \quad (\text{FROUDE})$$

Se deriva:

$$N_c = \frac{(N_1)^2}{N_h} \dots \dots \dots (28)$$

Para una escala horizontal arbitraria se puede de manera sencilla satisfacer la ley de Froude mediante una selección justa de caudal.

Respecto a la condición de la rugosidad del fondo existe una cierta libertad de seleccionar e influenciar esta rugosidad y con esto influenciar N_c , por esto es posible seleccionar la escala horizontal del modelo diferente de la escala vertical.

En la práctica generalmente $N_h < N_1$ (por motivos económicos) en la selección N_h hay que encontrar que en el modelo el número de Reynolds que depende de la profundidad, tenga un valor suficientemente grande para evitar efectos de escala por fuerza de viscosidad.

Para la distorsión del modelo en la que $N_1 > N_h$ se introduce un aumento de la pendiente lo que mostrará lo siguiente.

De la ecuación de Chezy se deriva:

$$N_v = N_c \times \sqrt{(N_h \times N_B)}$$

Satisfaciendo las condiciones de rugosidad:

$$N_c^2 = \frac{N_1}{N_h}$$

Remplazando en la ecuación de Chezy:

$$N_v^2 = N_1 \times N_B$$

Se obtiene:

$$N_B = \frac{N_h}{N_1}$$

Esto quiere decir que la variación de los niveles de la superficie de agua en el modelo también se **representa según** la escala de profundidad.

Además se concluye de lo anterior que para modelos en que rige la ley de Froude también se debe satisfacer la condición de la rugosidad:

$$N_c^2 = \frac{N_1}{N_h}$$

1.1.5.EFECTO DE ESCALA

Un efecto de escala se presenta en un modelo cuando difiere la escala de un punto a otro o cuando no se ha cumplido con una ley de escala vigente para un determinado fenómeno.

Cuando por ejemplo no se representa bien el patrón de flujo en el modelo, la escala de velocidad (N_v), no puede ser igual en todas partes del modelo, la relación mutua de las escalas de las diversas magnitudes están dadas por las leyes de escala, las cuales están basadas en ecuaciones que rigen para movimiento de agua con o sin materia. En los párrafos anteriores se mostró que el número de condiciones (relaciones de escala) es tan grande que no es posible satisfacer simultáneamente todas estas relaciones en un sólo modelo.

En la práctica para tal caso, se relaciona valores que cumplen con las condiciones tanto como sea posible. Sin embargo, el desviarse de las relaciones de escala ocasiona la presencia de efectos de escala hasta de una magnitud aceptable mediante una correcta selección.

También es posible construir varios modelos en los que se puede investigar separadamente cada fenómeno, cada uno según sus propias leyes de escala.

Existen algunos medios para disminuir y/o influenciar los efectos de escala en determinadas

circunstancias como:

Aplicación de un fluido ideal con densidad, viscosidad y tensión superficial de tal forma que las leyes de escala sean aplicadas, sin embargo aún cuando exista tal fluido, ello no siempre es una solución atractiva puesto que hay otros medios que producen casi el mismo efecto, los cuales se encuentran con mayor facilidad.

Eliminación de ciertas influencias en canales abiertos y profundos, si se hace una selección justa de la escala, no habrá necesidad de tomar en cuenta los efectos de escala debido a las fuerzas de viscosidad y de tensión superficial.

En casos de conductos cerrados muchas veces son despreciables la influencia de la gravedad y la tensión superficial.

1.2. MODELOS CINETICOS DE FLUJOS HIDRAULICOS

Para el diseño de planta de tratamiento de agua como de desague, la Ingeniería Sanitaria a utilizado los modelos químicos de reacción.

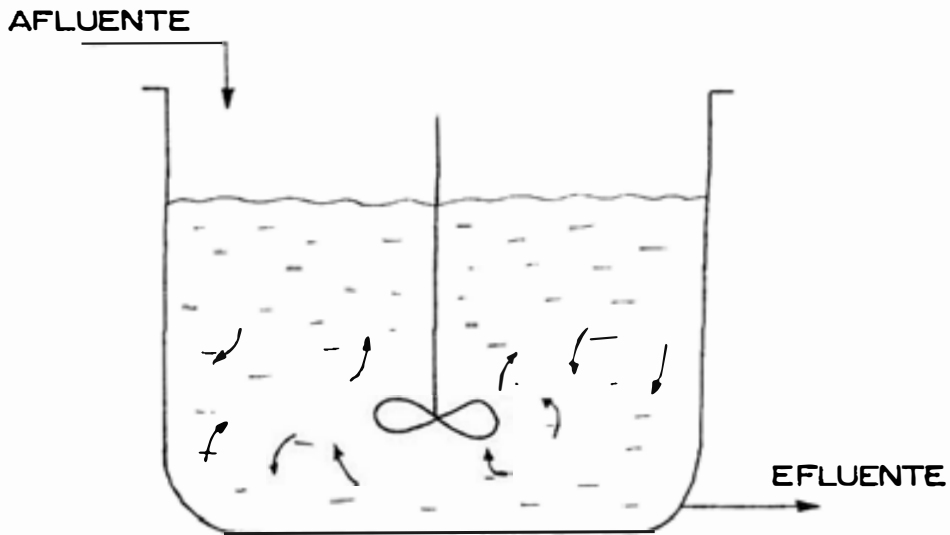
En primer lugar se considera un caso ideal: Un líquido que fluye a través de un tanque rectangular largo como se observa en la figura No.1, no existe difusión lateral **alguna** y una masa determinada de líquido pasa a través del tanque sin producir perturbaciones **laterales**. Ningún elemento en el sistema puede adelantar a otro debido a que todos ellos se desplazan a igual velocidad. Los *Ingenieros Químicos* denominaron a este modelo, flujo tipo pistón y se caracteriza por la siguiente fórmula (para reacciones químicas del primer orden).

$$\frac{N}{N_0} = (e)^{-k \cdot t} \dots \dots \dots (29)$$

En donde:

- N -- concentración en el efluente
- N₀ -- concentración en el afluente
- Cte. de reacción de primer orden
- = tiempo promedio de residencia

La ecuación (29) ha sido utilizada en diseño de tratamiento de aguas residuales, sin embargo por razones obvias, no puede existir un flujo



FLUJO DE MEZCLA COMPLETA

figura No. 2

La ecuación de diseño que representa el flujo con mezcla completa incluida en los textos de Ingeniería Química y utilizada con frecuencia en la práctica de Ingeniería Sanitaria, es la siguiente:

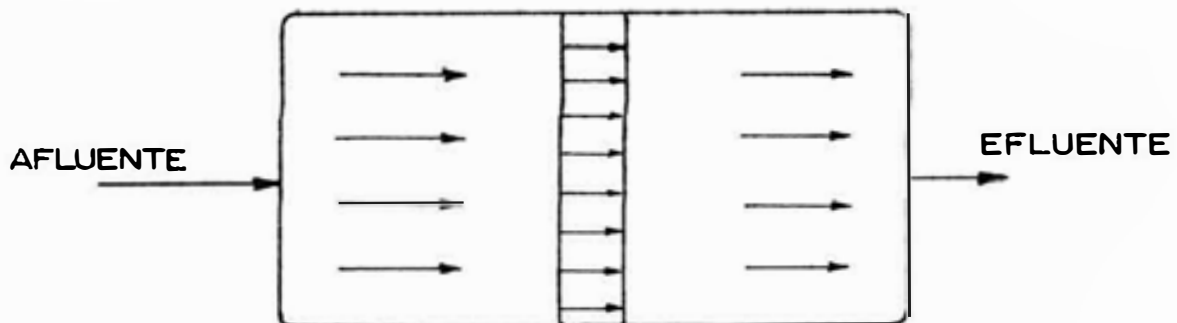
$$N_{\text{d}} = \frac{Q \mu}{k} \dots \dots (30)$$

No. l+k.t.

La ecuación (30) se utiliza comunmente en el diseño de lagunas aereadas, lagunas de estabilización de aguas residuales y procesos de lodos activados. Cuando se utiliza la ecuación (30), se supone que existe mezcla completa, lo

tipo pistón en filtros percoladores o rociadores o lagunas de estabilización de aguas residuales. En consecuencia, las ecuaciones de diseño existentes que se basan en el flujo tipo pistón son sólo aproximadas.

Considerando otra condición ideal de flujo en el otro extremo del espectro. Los tanques o lagunas de forma cuadrada o circular, equipados con paletas de mezclas, presentarán características de tanques con mezcla completa con un alto valor de mezclado. El contenido del tanque tendrá una composición uniforme (figura No. 2)



MODELO DE FLUJO PISTON

figura No. 1

cual no es cierto en el caso de una laguna de estabilización alargada, una laguna aereada o un tanque de aereación del proceso de lodos activados.

Por lo general las operaciones unitarias de importancia Sanitaria no presentan un flujo tipo pistón, ni de mezcla completa, sino un flujo disperso.

$$N = \frac{4 \times a \times e^{(1/2 \cdot d)}}{(1+a)^2 \times e^{(a/2 \cdot d)} - (1-a)^2 \times e^{(-a/2 \cdot d)}} \dots (31)$$

$$N_0 = \frac{4 \times a \times e^{(1/2 \cdot d)}}{(1+a)^2 \times e^{(a/2 \cdot d)} - (1-a)^2 \times e^{(-a/2 \cdot d)}}$$

Donde:

$$a = \sqrt{(1+4 \times K_b \times t \times d)} \quad \text{y} \quad d = \frac{D}{UL} = \frac{D \cdot t}{L^2} \dots (32)$$

Donde:

- d = Factor de dispersión
- D = Coeficiente de dispersión axial (m²/día)
- U = Velocidad del fluido (m/día)
- L = Longitud característica de trayectoria de una partícula típica en el tanque (m)

Los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales podrán ser diseñados haciendo uso de la ecuación (31). Los cortocircuitos en tanques, mecanismos hidráulicos de entrada y salida y otras características de mezcla hidráulica pueden ser representados mediante el valor de "d" (los valores de "d" son de cero hasta el infinito en el caso del flujo pistón y de sistema con mezcla completa respectivamente).

La temperatura, tipo de agua residual, deficiencias nutritivas, carga orgánica y otros factores biológicos pueden ser tomados en cuenta por los valores de "K". La carga hidráulica por cierto se representa por medio del valor del tiempo *verdadero* (promedio) de residencia o tiempo de retención t.

1.3. PRUEBA CON TRAZADORES

La prueba con trazadores comúnmente ha sido utilizado como medio para determinar el tipo de flujo en canales, ríos, etc.

En la actualidad son muy comúnmente usados estos ensayos para determinar los tiempos reales de retención, las principales características del flujo, espacios muertos y cortocircuitos en unidades de tratamiento, así como en modelos de reactores en etapa de diseño para conocer su comportamiento hidráulico y deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de enorme utilidad práctica.

1.3.1. SUSTANCIAS TRAZADORAS

Para elegir el tipo de trazador a utilizar se debe determinar la concentración de estas sustancias en la masa de agua a estudiar y seleccionar aquellas que estén presentes en concentraciones constantes o muy bajas.

Es conveniente además escoger como trazador aquella sustancia que no reaccione con los compuestos presentes en la masa de agua a estudiar.

Las sustancias trazadoras pueden ser:

Colorantes (fluoresceína ,rodhamina,etc.)

Elementos radioactivos (isótopos)

Otras sustancias químicas (alizarín, sapirol,
naptol)

En la evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales es ventajoso el uso de colorantes debido a que son sustancias no biodegradables, además no se encuentran presentes en las aguas residuales

En evaluación de plantas tratamiento de agua potable es ventajoso el uso de sustancias químicas debido a su fácil determinación

El uso de radioisótopos, a pesar de ser un sistema bastante sofisticado, tiene grandes ventajas:

- a) Es mucho más preciso para los detectores de radiación, son más sensibles.
- b) La determinación de los trazadores puede hacerse en forma continua sin necesidad de recoger muestras.
- c) Puede efectuarse aún en los casos en que no se tiene acceso al interior del sistema pues la radiación puede ser medida a través de determinados tipo de materiales.
- d) Se adapta mejor a las investigaciones.

Una de las grandes desventajas de este sistema es que requiere utilizar equipo y personal especializado, lo cual representa un alto costo.

1.3.2. PROCEDIMIENTO

Luego de la selección del trazador conveniente, la adición de este, se puede hacer de dos formas: en forma instantánea y en forma continua.

Si se utiliza en forma instantánea se aplica una concentración "Co" a la entrada del reactor en un tiempo muy corto, inferior a 1/30 del tiempo teórico de retención "to" y en un punto tal que se mezcle instantáneamente con la masa de agua que se va analizar.

La concentración "Co" para la forma instantánea que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua, por medio del siguiente criterio:

$$W = \frac{V \times F \times C_i}{I \times 10^3}$$

Donde:

- W = Peso del trazador a añadir al reactor (Kg)
- F = Constante de reacción (cloruros = 1.65)
- V = volumen de la laguna (m³)
- Ci = Concentración deseada (mgr./Lt.)
- I = Grado de pureza del trazador (%)

1.3.3. LIMITACIONES DE LA PRUEBA CON TRAZADORES

Las pruebas de trazadores son muy útiles para conocer como se desplazan las diferentes masas de agua dentro de las unidades de tratamiento, pero los datos obtenidos se refieren **solamente** al momento en que se realiza la prueba y que no representa necesariamente el comportamiento en todas las condiciones.

Por otro lado, tampoco dicen nada sobre la eficiencia de las unidades de tratamiento, pues **estos** últimos dependen no sólo de las características hidráulicas si no también de las químicas y biológicas.

Es importante recalcar que este tipo de análisis no determina tampoco la trayectoria de las partículas o del flujo o cómo éste se distribuye en el reactor, indicando su tiempo de permanencia pero no su trayectoria.

Para obtener buenos resultados se debe tener las siguientes consideraciones:

El flujo debe ser "constante" durante un lapso superior a por lo menos dos veces a la duración del ensayo.

El flujo debe ser segregado, es decir, que el flujo que entra a la unidad no se mezcle con el

flujo de otras unidades.

Si el reactor contiene lodos depositados puede producir interferencias especialmente en la comprobación de las ecuaciones de balance de masas, por lo cual deberá ser previamente limpiada.

- Se deberá estabilizar el reactor para evitar interferencias para lo cual es conveniente dosificar continuamente pequeñas dosis de trazador por un período de tiempo igual al del ensayo antes y después de la evaluación.

No deberá usarse altas concentraciones de trazador porque podría producir corriente cinética por variaciones de la densidad, dando resultados erróneos, por lo cual es preferible el uso de métodos de dosificación continua o con bajas concentraciones.

No es recomendable realizar solo una prueba para evaluar una unidad de tratamiento.

Se debe de considerar la variación de la temperatura del medio ambiente, ya que puede producir variación de los resultados al producir corrientes térmicas.

- Se deberá tener igualdad de resultados en el ensayo de trazadores en el mismo reactor, especialmente en lo relacionado con el tiempo inicial de presentación del trazador y valores de concentración máxima y áreas bajo la curva.

1.3.4. ANALISIS DE LAS CARACTERISTICAS DE UN REACTOR

a) PERIODO DE RETENCION:

El periodo de retención es de especial importancia en todas las consideraciones generales, puesto que en las operaciones y procesos ocurren en general, lentamente tal como se ha señalado y es necesario entonces un periodo de reacción o un periodo de contacto largo para lograr la transferencia para que se produzcan los cambios y reacciones deseadas.

El periodo de retención teórico (t_0) se entiende por el tiempo medio de residencia o permanencia del fluido en una laguna.

$$t_0 = \frac{V}{Q} \dots\dots\dots(34)$$

Donde

- V = volumen de la laguna (m^3).
- Q = caudal (m^3/seg).

En la práctica bajo condiciones hidráulicas reales del flujo (regiones muertas, corriente de inercia, cortocircuito, etc.) hacen imposible condiciones de flujo estable.

Es necesario por lo tanto estudiar la distribución del flujo en función del tiempo de retención en la laguna, para poder conocer la forma como ha quedado sometida la masa líquida a un determinado tratamiento. Para el

estudio, se lleva a cabo "La Prueba de Trazadores", que consiste en la inyección de un trazador químico en la entrada de la laguna y simultáneamente se mide la concentración en la salida.

b) FACTOR DE DISPERSION HIDRAULICA:

Con los datos obtenidos en la prueba de trazadores, son útiles para calcular la magnitud del factor de dispersión "d" y el periodo de retención real mediante el método propuesto por Levenspiel & Smith el cual se explica a continuación:

El cálculo del periodo de retención promedio (t) bajo condiciones reales (prueba de trazadores) se efectúa:

$$t = \frac{\sum t.C}{\sum C} \dots\dots(35)$$

Donde

- t - periodo de retención real.
- t - tiempo de salida en el pto. de medición.
- C - concentración del trazador en la salida.

Como se sabe el modelo de flujo disperso implica una redistribución de material o por flujo laminar o por flujo disperso y ya que esto se repite en número considerable de veces

durante el flujo del fluido por la laguna podemos considerar estos disturbios de tipo estadístico.

De una forma análoga podemos considerar todas las distribuciones a la mezcla del fluido en movimiento.

El factor de dispersión "d" llamado también coeficiente de dispersión axial longitudinal, caracteriza únicamente el grado de mezcla durante el flujo.

Considerando que en la redistribución del material (trazador) durante el flujo del fluido por el reactor es de tipo estadístico, por tanto la varianza de una distribución continua medido en un número finito de puntos equidistantes es dado por la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sum t^2 \times C}{\sum C} - \left(\frac{\sum t \times C}{\sum C} \right)^2 \dots\dots(36)$$

Donde:

σ^2 = varianza adimensional de la curva

La desviación adimensional se calcula con la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} \dots\dots\dots(37)$$

Y finalmente "El factor de dispersión d" se calcula con la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} = 2.d - 2.d^2.(1 - \exp(-1/d)) \dots (38)$$

Como observamos la ecuación (35) y (36) ayudan en el cálculo de "d" en la ecuación (38). Los datos a procesarse corresponden a concentraciones de un trazador medido en el afluente.

El cálculo del factor de dispersión "d" también se puede lograr mediante la ayuda de la curva de la figura No. 3, la cual representa la ecuación (38).

Los cálculos indicados de período de retención real "t" y el factor de dispersión "d" pueden utilizarse para interpretar la eficiencia de reducción de DBO o coliformes fecal en el efluente de una laguna de estabilización, en este caso se encontraría el valor de la constante cinética de reacción de primer orden.

c) TEORIA DE WOLF - RESNICK:

Wolf Resnick consideró que en todo flujo existe una fracción de flujo pistón (P) y una

RELACION ENTRE LA VARIANZA Y EL FACTOR DE DISPERSION PARA
USO EN PRUEBAS CON TRAZADORES

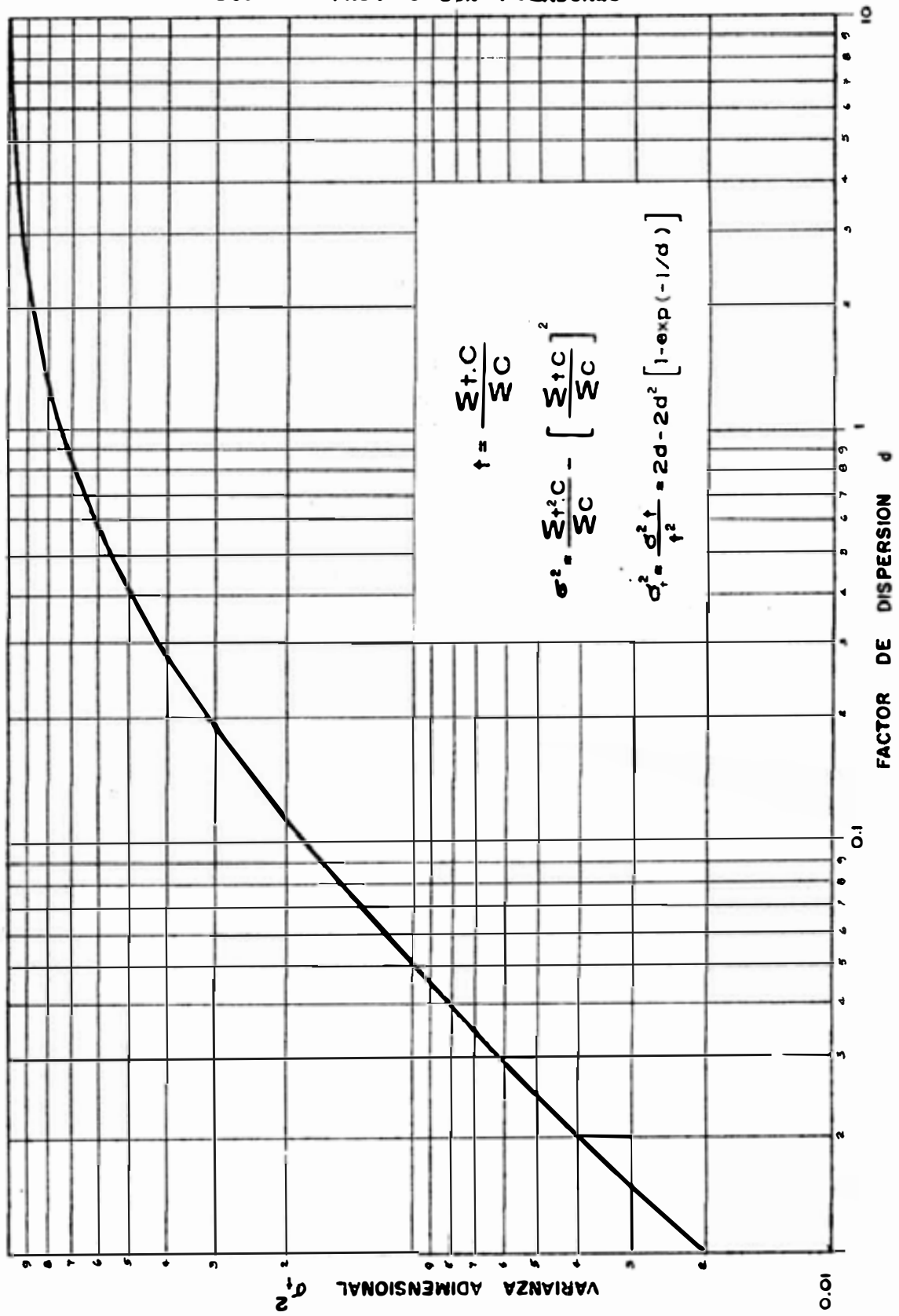


Figura No 3

fracción de flujo no pistón (1-P) y que la suma de ellos debe ser igual a la unidad:

$$\begin{aligned} & \text{Flujo pistón} + \text{Flujo no pistón} = 1 \\ & P + (1 - P) = 1 \dots (39) \end{aligned}$$

Cuando hay espacios muertos, si (m) es la fracción de volumen considerado como espacio muerto, la fracción de volumen efectiva será igual a (1-m) y por lo tanto:

$$\begin{aligned} & \text{Flujo pistón} + \text{Flujo no pistón} + \text{Espacios muertos} = 1 \\ & P \cdot (1-m) + ((1-P)(1-m)) + m = 1 \end{aligned} \dots (40)$$

De la ecuación de flujo completamente mezclada

$$\frac{N}{N_0} = e^{-t/t_0} \dots (41)$$

Donde:

t = Tiempo de residencia real en el reactor
 t₀ = Tiempo de residencia teórico en el reactor

Si se considera que el reactor se presenta una combinación de flujos de pistón y mezclado; la ecuación anterior se transforma :

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\left[\frac{t - P \cdot t_0}{(1-P)t_0} \right]} \dots (42)$$

En la cual "P.to" es el tiempo de retención correspondiente al flujo del pistón y (1-F) es el volumen de mezcla perfecta. Redondeando y simplificando tenemos:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\left[\frac{1}{(1-P)}\right]\left[\frac{t}{t_0} - P\right]} \dots\dots\dots(43)$$

Si se considera que el sistema además tiene espacios muertos, habría que introducir en la última ecuación el término (1-m) para considerar la fracción efectiva de flujo con mezcla perfecta, luego tenemos:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\left[\frac{1}{(1-P)(1-m)}\right]\left[\frac{t}{t_0} - P(1-m)\right]} \dots\dots\dots(44)$$

La fracción de la totalidad del trazador que llegado a la salida del reactor será:

$$F(t) = 1 - \frac{N}{N_0} \dots\dots\dots(45)$$

Reemplazando el valor de N/N₀ se obtiene:

$$F(t) = 1 - e^{-\left[\frac{1}{(1-P)(1-m)}\right]\left[\frac{t}{t_0} - P(1-m)\right]} \dots\dots\dots(46)$$

Reordenando términos y tomando logaritmos de ambos miembros se llega a

$$\log (1-F(t)) = \frac{-\log e}{(1-F)(1-m)} \left[\frac{t}{t_0} - P(1-m) \right] \dots (47)$$

Que corresponde a la ecuación de la línea recta, cuya pendiente esta dada por :

$$\text{tag } \alpha = \frac{\log e}{(1-m)(1-P)} \dots (48)$$

multiplicando y dividiendo por "P" y sustituyendo el valor de $\log e = 0.435$, se obtiene:

$$\text{tag } \alpha' = \frac{0.435 \times P}{P(1-m)(1-P)} \dots (49)$$

Haciendo : $\theta = P(1-m) \dots (50)$

Reemplazando

$$\text{tag } \alpha' = \frac{0.435 \times P}{\theta \times (1-P)} \dots (51)$$

Reordenando

$$P = \frac{\theta \times \text{tag } \alpha'}{0.435 + \text{tag } \alpha'} \dots (52)$$

De la ecuación (50) se puede deducir el volumen de espacios muertos que será igual a:

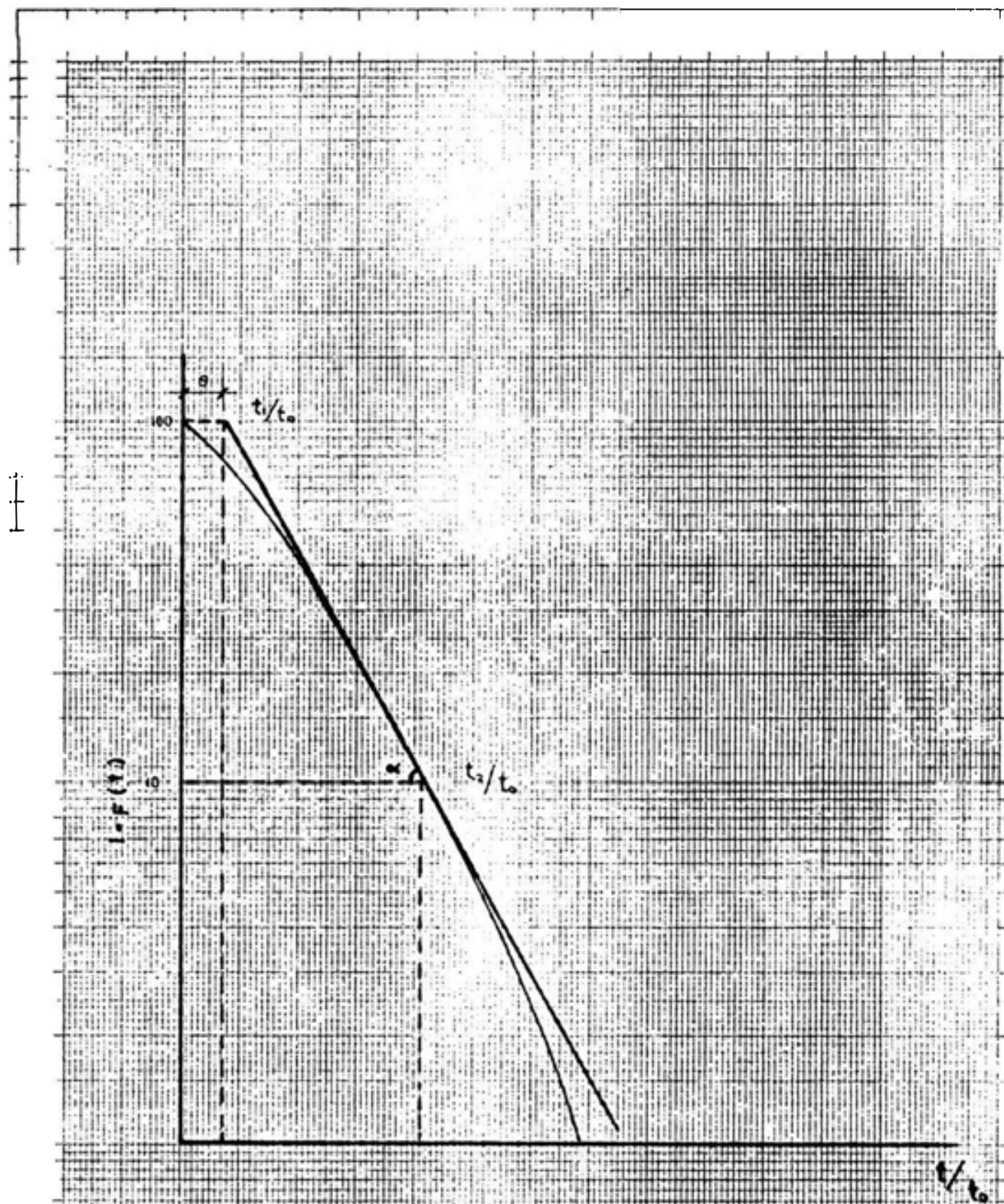
$$m = 1 - \frac{\theta}{P} \dots (53)$$

y

$$M = 1 - P \dots (53-a)$$

M = flujo mezclado.

El valor de las incognitas $\text{tag } \alpha'$, se obtienen al trazar la curva de $\log(1-(t))$



CANTIDAD DE TRAZADOR QUE PERMANECE EN
EL REACTOR $1-F(t)$

figura No 4

(figura No. 4) siendo:

$$\theta = \frac{t_1}{t_0} \dots\dots\dots(54)$$

$$\tan \alpha = \frac{1}{(t_1/t_0) - (t_2/t_0)} \dots\dots\dots(55)$$

Llamando :

$$n = \frac{1}{(1-P)(1-m)} \dots\dots\dots(56)$$

El coeficiente que caracteriza la eficiencia de la mezcla y sustituyendo el valor de la ecuación (50):

$$F(t) = 1 - e^{-n \frac{t - \theta}{t_0}} \dots\dots\dots(57)$$

Que constituye la ecuación básica de Wolf-Resnick. Los valores de n y θ definen las características del flujo del reactor, presentandose los posibles valores en el cuadro siguiente:

| CONDICION DE FLUJO EN EL REACTOR | n | /to |
|----------------------------------|----|-----|
| MEZCLA PERFECTA | 1 | 0 |
| MEZCLA CON FLUJO IDEAL | >1 | >0 |
| MEZCLA CON ESPACIOS MUERTOS | >1 | 0 |
| MEZCLA CON CORTO CIRCUITOS | <1 | <0 |
| MEZCLA CON ATRAZO | 1 | >0 |
| MEZCLA CON ERROR EN Ta | <1 | 0 |

d) ANALISIS DE LA CURVA DE TENDENCIA
DECONCENTRACION DEL TRAZADOR:

Es una práctica muy común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor, analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con condiciones de flujo.

Al aplicar trazadores a un reactor y analizar las muestras de agua tomadas a la salida se obtiene una serie de valores de concentración que aumenta con el tiempo hasta llegar a un máximo y luego disminuye progresivamente, originando una curva tal como indica la figura No. 5, existiendo los siguientes parámetros:

t_1 = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el afluente.

t_{10} = tiempo correspondiente al paso de 10% de la cantidad total del trazador.

t_p = tiempo modal correspondiente a la presentación de la máxima concentración del trazador.

t_m = tiempo mediano correspondiente al paso del 50% de la cantidad total del trazador.

t_0 - tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención.

t_{90} = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.

t_f = tiempo que transcurre hasta que atravieza la totalidad del trazador al reactor.

C_0 - concentración inicial.

C_p - Concentración máxima a la salida .

y utilizando los siguientes criterios:

a) t_i / t_0 .

Mide los cortocircuitos grandes. Es igual a 1 para flujo pistón y "0" para flujo mezclado.

b) t_m / t_0

Si la relación es menor que la unidad , existen cortocircuitos. Si es mayor hay errores experimentales o existen zonas en donde el trazador haya quedado retenido con cierto tiempo (espacios muertos) y luego haya ido saliendo lentamente con lo que la rama descendente de la curva presenta una forma alargada, que desplaza el centroide del área y aumenta el valor de t_m , haciendo $t_m > t_0$.

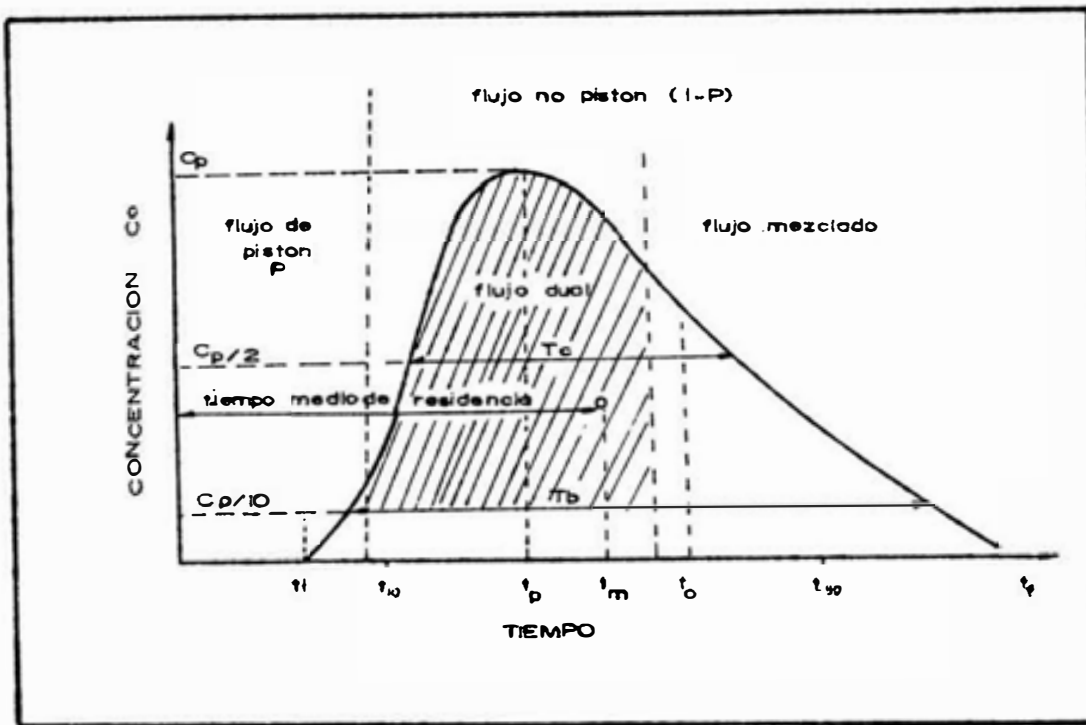


figura No 5

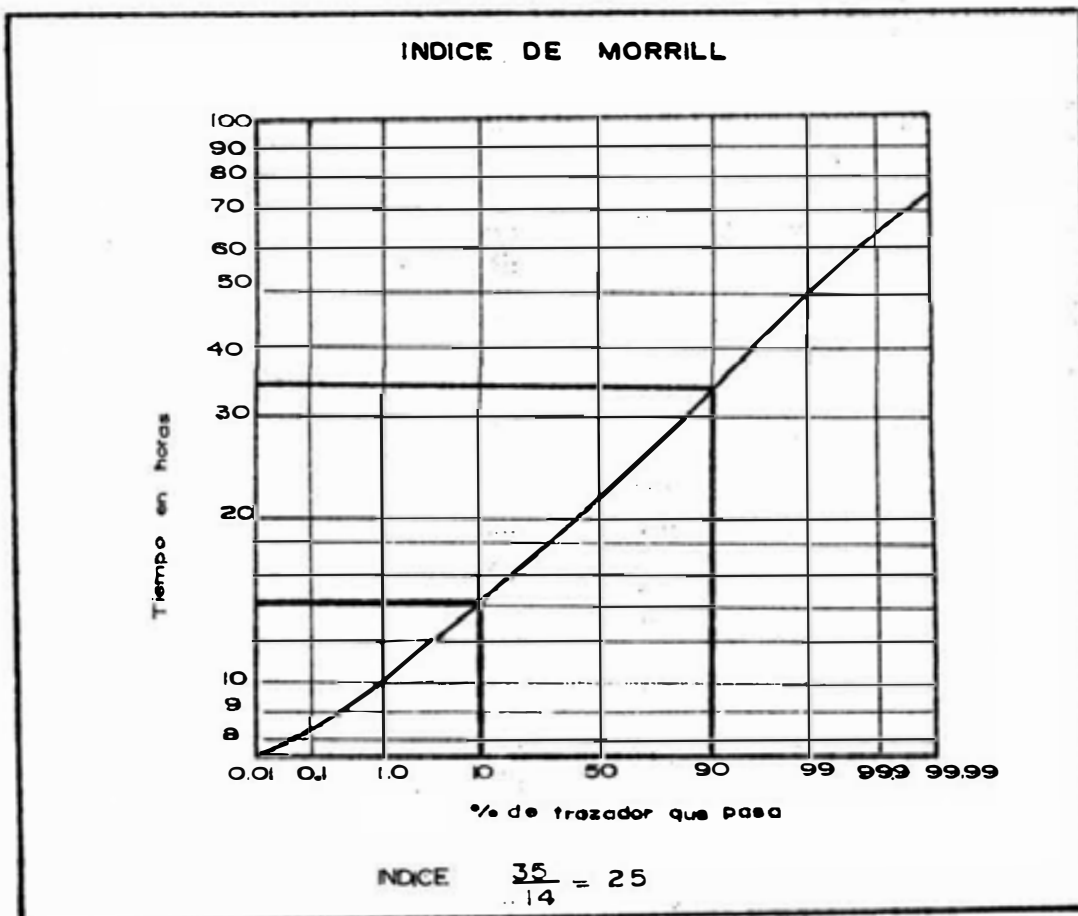


figura No 6

c) t_p / t_o

Indica la relación de flujo pistón y flujo mezclado. Cuando es igual a 1 existe flujo pistón y "0" para flujo mezclado ; cuando la relación se aproxima a 1 y $t_i/t_o > 0.5$ se puede concluir que existe predominio de flujo pistón y cuando se aproxima a "0" existe predominio de flujo mezclado.

d) $e = ((t_f - t_p) - (t_p - t_o)) / t_o$

Expresa la excentricidad de la curva y por lo tanto en función de la recirculación es igual "0" para flujo pistón y 2.3 para flujo mezclado.

e) INDICE DE MORRILL: Este investigador encontró que al acumular los datos sobre cantidad de trazador que pasa, expresado en "%" y dibujado en papel que tenga escala de **probabilidades** en la abscisa y escala logarítmica en las ordenadas para diferentes tiempos, se obtenía aproximadamente una línea recta (figura No. 6).

El segmento promedio entre el 10% y el 90% es el más regular y por eso Morrill sugirió que la relación entre uno y otro se tomara como índice de dispersión, así:

$$\text{INDICE DE MORRILL} = \frac{\text{Tiempo que pasa el 90\%}}{\text{Tiempo que pasa el 10\%}}$$

Si todo el flujo fuera pistón, la curva de la figura No. 6, sería una línea horizontal y el índice de Morrill sería igual a 1, pues todo el trazador saldría en el tiempo t_0 y nada saldría antes. En cambio, a medida que hay mas proporción de flujo mezclado se aumenta el ángulo que la curva hace con la horizontal, pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención.

- f) El estudio de la totalidad de las curvas puede suministrar una información más completa que las tendencias centrales. Generalmente con sólo observar la forma que toma la curva de trazadores da una primera indicación del comportamiento hidráulico del reactor que se estudia.

C A P I T U L O I I

MODELAJE

2.1. ELECCION DE LA ESCALA DEL MODELO

Como se dijo en el Capítulo las leyes de similitud hidráulica se determinan en función de las fuerzas dominantes en el prototipo, así cómo en el modelo.

En general para el caso de una laguna de estabilización, de acuerdo a la característica de su funcionamiento, el movimiento del fluido es causado exclusivamente por las fuerzas gravitatorias (Ley de Froude).

El flujo dentro de la laguna es de regimen laminar ($Re < 2000$) por lo que también intervienen las fuerzas de viscosidad (Ley de Reynolds), las cuales no son significativas debido a las propiedades físicas del agua (viscosidad despreciable). Esta afirmación es sustentada por la investigación de Mangelson & Watters en el cual demuestran que las características hidráulicas dentro de la laguna no son afectada por la variación del No. de Reynolds.

Analizando las fuerzas que actuarán en el modelo, al igual que en el prototipo, las fuerzas gravitatorias serán las dominantes. También la

tensión superficial será significativa si es que el tirante del modelo es muy pequeño (< 6 cm. por lo que se deberá escoger escalas grandes.

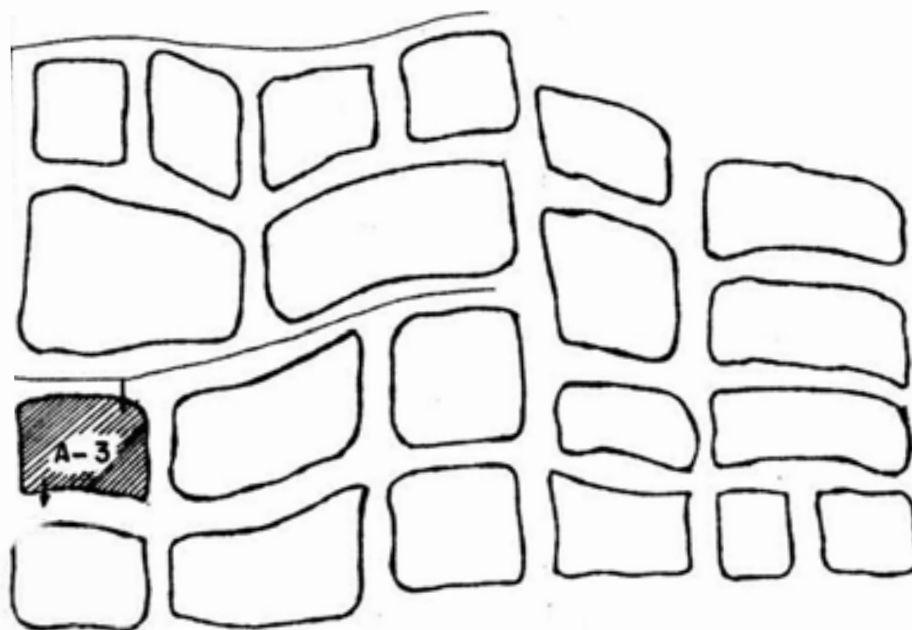
De lo dicho anteriormente se puede apreciar que existe dos relaciones de escala: Ley de Froude y Ley de Reynolds, las cuales no se pueden satisfacer simultáneamente, por tal motivo se eligirá relación de escala predominante que cumpla las condiciones hidráulicas tanto como sea posible, para minimizar los efectos de escala, por lo que se elige la ley de similitud hidráulica de Froude (ecuación (21)):

$$N_v = (N_1)^{0.5}$$

Se eligió agua potable como fluido en el modelo debido a su comportamiento hidráulico semejante al del desague y a su facilidad en la manipulación de este fluido, pero sus diferencias como la densidad, se tendrá presente como variable en la determinación de la escala del modelo.

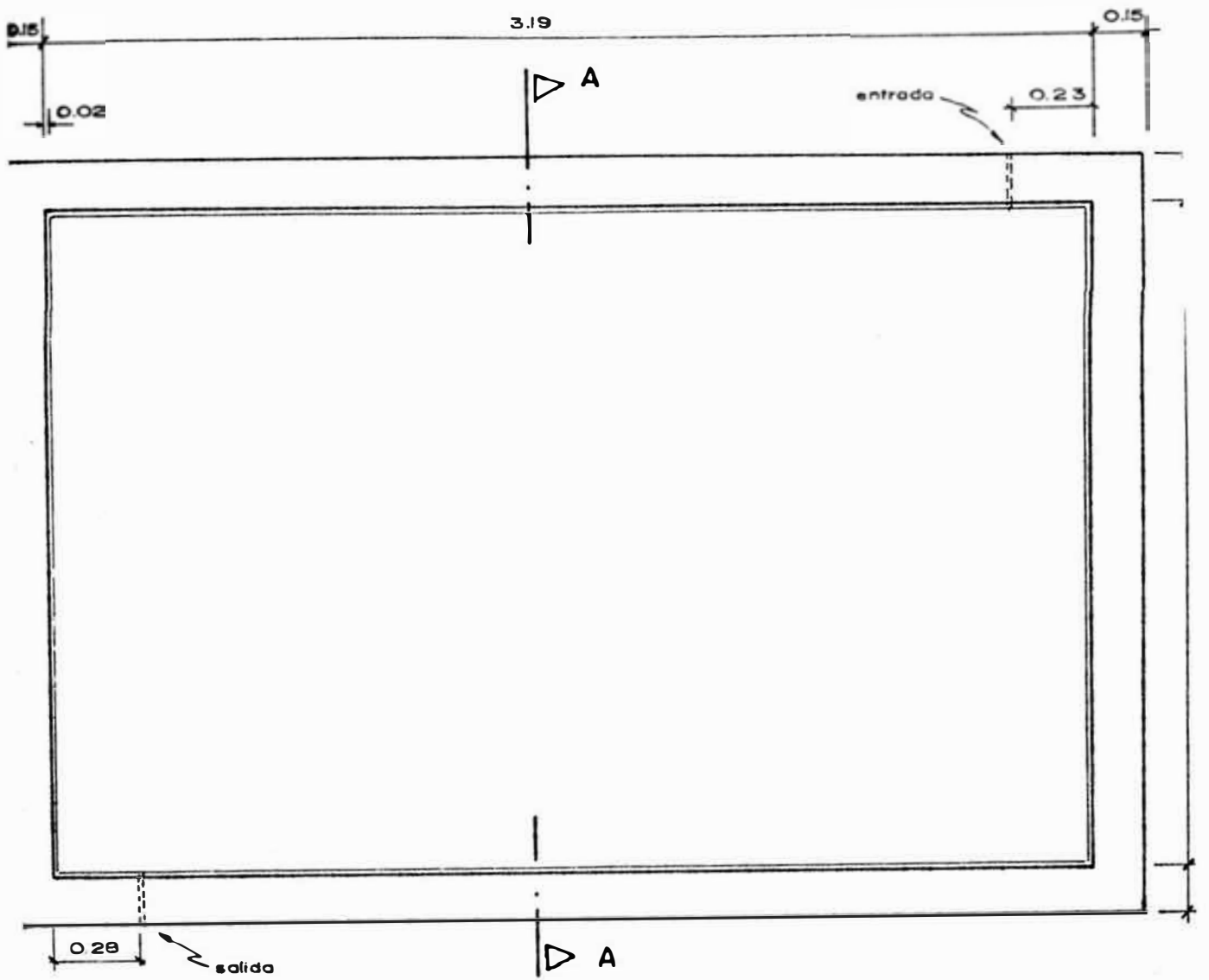
Para el presente estudio se tomó como laguna de estabilización prototipo en estudio a la denominada " A-3 " del complejo de lagunas de "San Juan" (ver figura No. 7), la cual se ha evaluado su funcionamiento mediante prueba de trazadores

LAGUNAS DE ESTABILIZACION DE SAN JUAN DE MIRAFLORES

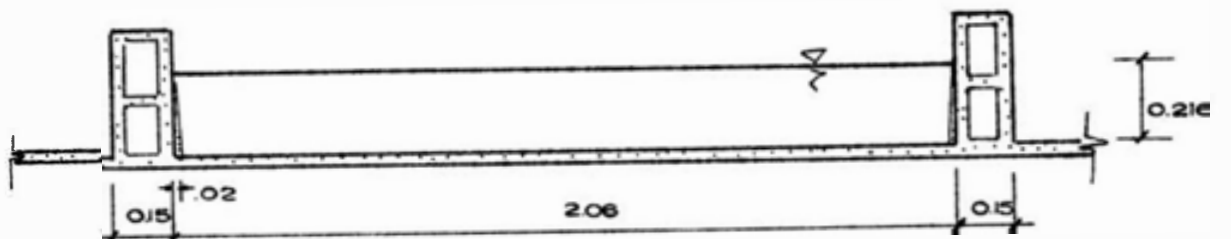


A-3 : LAGUNA PROTOTIPO

Figura No 7



PLANTA LAGUNA MODELO
 ESC 1/20



CORTE A-A'

figura No.8

reportados por Felipe Livia¹ (ver anexo No. 2), y que tiene las siguientes dimensiones:

$$\begin{aligned}l &= 80.30 \text{ mt.} \\a &= 124.60 \text{ mt.} \\h &= 1.30 \text{ mt.}\end{aligned}$$

Analizando sus características hidráulicas tenemos:

| | |
|---------------------------------|--|
| Caudal (Q) | = 23.05 lt/s. (considerando pérdidas por evaporación e infiltración) |
| Radio hidráulico (R) = h | = 1.3 mt. (considerando como canal ancho) |
| Viscosidad cinemática (ν) | = 1.142×10^{-6} a 20°C |
| Velocidad (V) | = 1.423×10^{-4} m/seg |
| No. de Reynold (Re) | = $V.R / \nu$ = 161.98 |
| Coef. Rugosidad (k) | = aproximadamente al diámetro promedio del material del fondo y paredes de la laguna (ver anexo No. 1). = D_{50} = 0.74×10^{-3} |
| Tiempo teórico de retención | = volumen / caudal = 156.75 horas |

Para que en el modelo, la fuerza de tensión superficial no sea significativa, el tirante de agua en el modelo (h_m) no debe ser demasiado pequeño, evitando de esta forma los posibles efectos de escala por tensión superficial.

Tomando un tirante de 0.10 mt. para el modelo, tendríamos un factor de escala longitudinal (N_1):

$$N_1 = \frac{h}{h_m} = \frac{1.3}{0.1}$$

$$N_1 = 13$$

Donde h es el tirante del prototipo.

Con lo que obtendríamos un modelo de la siguientes dimensiones:

ancho del modelo (a_m) = 9.58 mt.
largo del modelo (l_m) = 6.17 mt.
tirante del modelo (h_m) = 0.10 mt.

Se puede apreciar que con la escala 1:13 las dimensiones del modelo resultarían muy grandes, ocasionando problemas: en la construcción del modelo por que este deberá ser construido en un lugar muy amplio, y por ser muy costoso; Por la gran superficie del modelo, puede haber interferencia por las corrientes de aire que puede ocurrir durante las pruebas; El tiempo de retención sería de varios días lo que dificultaría su evaluación en el momento del muestreo en la prueba de trazadores.

Para disminuir las dimensiones del modelo y prevenir las interferencias anteriormente mencionadas, se utilizará el artificio de modelos deformados geoméricamente ($N_l > N_h$) la cual se puede aplicar a este tipo de modelo ya que se estudia principalmente la distribución del flujo, debido principalmente a la fureza de gravedad y por la resistencia que encuentra la corriente por la rugosidad del fondo y de las paredes.

Este artificio de modelos deformados se a definido en la Ecuación (28) del Capítulo I:

$$N_c^2 = \frac{N_1}{N_h} \dots \dots \dots (28)$$

CALCULOS:

a) Determinación de la Cte. de Chezy del prototipo (C_p):

Se sabe:

$$C = 18 \log \frac{\delta \cdot Re}{\frac{k}{2} + \frac{\delta}{7}} \quad m^{0.5}/seg.$$

$$C = 18 \log \frac{\delta}{\frac{k}{2.R} + \frac{C}{2.Re}} \quad m^{0.5}/seg \dots \dots \dots (57)$$

Donde:

- k = coeficiente de rugosidad - 0.74 E-3
- Re = No. de Reynolds - 161.98
- R = radio hidráulico = 1.3m.
- C = coeficiente de Chezy

Reemplazando e iterando en la ecuación (57) se obtiene:

$$C_p = 31 \quad m^{0.5}/seg.$$

b) Determinación de la escala vertical (N_h) y la escala horizontal (N_1):

Para la obtención de las escalas tanto vertical como horizontal, estas se deben tomar aleatoriamente, con las cuales se determinará las características físicas e hidráulicas del modelo utilizando la ley de escala de Froude. Luego se

determinará el coeficiente de Chezy del modelo. Estos valores obtenidos se remplazarán en la ecuación (28) de modelos deformados geoméricamente y se verificará la igualdad. En caso de no cumplirse la igualdad, se probará con otras escalas (N_1 y N_n) hasta que cumpla con la igualdad de la ecuación (28).

Considerando que $N_1 > N_n$ se escogió las siguientes factores de escalas:

$$\begin{aligned} N_1 &= 39 \\ N_n &= 6 \end{aligned}$$

Con estos factores tendra las siguientes características físicas:

$$\begin{aligned} a_m &= 3.19 \text{ mt.} \\ l_m &= 2.06 \text{ mt.} \\ h_m &= 0.216 \text{ mt.} \end{aligned}$$

Características hidráulicas del modelo:

De la ley de Froude:

$$\begin{aligned} \frac{V_n}{V_m} &= N_1^{0.5} \\ \frac{1.42E-4}{V_m} &= (39)^{0.5} \\ V_m &= 2.278E-5 \end{aligned}$$

No de Reynold (Re):

$$\begin{aligned} Re &= \frac{V_m \cdot R_m}{\nu} \\ Re &= \frac{(2.278E-5)(0.216)}{.999E-4} \\ Re &= 4.93 \end{aligned}$$

Como el modelo será construido de concreto cemento, el coeficiente de rugosidad es tomado de lo obtenido por Streeter V.¹²:

$$\text{Coef. de rugosidad (k)} = 1E^{-3}$$

c) Determinación del coeficiente de Chezy del modelo (C_m):

reemplazando en la Ec.(57):

$$C_m = 18 \log \frac{6}{\frac{1E^{-3}}{(2)(.216)} + \frac{C_m}{(2)(4.93)}}$$

Iterando:

$$C_m = 12 \text{ m}^{0.5}/\text{seg.}$$

d) Verificación en la ecuación (28):

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_p}{C_m} &= \frac{N_1}{N_n} \\ \left(\frac{C_p}{C_m} \right)^2 - \left(\frac{31}{12} \right)^2 &= 6.67 \\ \frac{N_1}{N_n} &= \frac{39}{6} = 6.59 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{C_p}{C_m} = \frac{N_1}{N_n}$$

CUMPLE CON LA ECUACION (28)

2.2.- INSTALACION DEL MODELO

Los estudios así como su construcción de la laguna de estabilización de simulación fue realizado en la Direccion Técnica de Salud Ambiental del Ministerio de Salud. El estanque utilizado como modelo fue construido sobre una losa de concreto, los muros de ladrillos revestidos de mortero cemento de 3.19 m. de largo por 2.06 m. de ancho y 0.216 m. de profundidad (ver figura No 8).

El flujo de ingreso fue transportado por mangueras de polietileno de 1/8" de diámetro. Se estableció un flujo permanente mediante el método de orificio de **carga** constante, que consiste en mantener una carga constante de agua (h) sobre un orificio para obtener un caudal constante (ver figura No 9). Para nuestro caso se utilizó un cilindro, un pedazo de madera como flotador y un pedazo de alambre para mantener un carga de agua constante sobre la manguera de polietileno. El caudal de trabajo se calibró en la salida mediante estranguladores.

El flujo de salida fue transportado por medio de tuberías y accesorios de PVC y mangueras de polietileno. La estructura de salida fue diseñada para que pueda ser ubicada en cualquier parte dentro

de la laguna modelo, para que las muestras puedan ser tomadas en cualquier momento así como controlar un nivel constante.

2.2.1.-DETERMINACION DEL TRAZADOR

Para la determinación de las características hidráulicas y periodo de retención en el estanque de simulación se utilizó la prueba de trazadores.

Para la elección se tomo las siguientes consideraciones:

La solución elejida como trazador debe encontrarse en bajas concentraciones en el afluente.

La solución elejida como trazador debe ser de facil determinación.

La densidad de la solución trazadora debe ser igual al del afluente para evitar interferencias debido a la estratificación por densidad en el estanque.

De acuerdo a las consideraciones anteriormente mencionadas se escogió como trazador cloruro de sodio (sal común), diluido en agua destilada y la densidad se bajó con alcohol de 98° hasta igualar al del agua cruda (1.00) además por encontrarse en bajas concentraciones (25 ppm.) en el agua utilizada como afluente del modelo.

preparar la solución trazadora se utilizó cloruro de sodio (ClNa al 90%). Se consideró obtener una concentración media de cloruro de sodio en el efluente del modelo de 90 ppm, esto quiere decir que necesitamos incrementar 60 ppm.

utilizando la ecuación (33):

$$P = \frac{V \times K \times C_0}{I \times 10^3}$$

Donde:

V - volumen en m³ = 1.4205m³
k - constante de reacción - 1.65
I - grado de pureza del trazador - 0.90
Co= concentración ppm. - 60 ppm.

Remplazando:

$$P = \frac{1.4205 \times 1.65 \times 60}{1000 \times 0.9}$$

P = 0.156 Kg. - 156 gr. de cloruro de sodio

Se redondeó la cantidad obtenida a 160 gr.

Esta cantidad de cloruro de sodio se disolvió en un litro de agua destilada, ajustando su densidad con alcohol 98° con la ayuda de un densímetro.

La determinación de cloruros en el efluente del modelo por titulación directa, empleando el método del Nitrato de Mercurio.

C A P I T U L O I I I

ESTUDIOS REALIZADOS EN EL
MODELO

3.1 VERIFICACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO SEGUN

DISEÑO ORIGINAL

En la primera prueba denominada "Fo", utilizando la laguna modelo mostrada en la figura No 8, se intentó evaluar el grado de reproductibilidad o confiabilidad de los resultados obtenidos en el modelo con los del prototipo. Para este fin, se reprodujo en el modelo las mismas condiciones hidráulicas del prototipo (caudal), y la ubicación de las estructuras de entrada y salida en relación con el diseño original.

Por otro lado, existen otros factores que intervienen, aunque no de modo determinante en el comportamiento hidráulico de la laguna de estabilización en condiciones normales, como son: la acción viento y la estratificación térmica. Los cuales no se han podido reproducir por no contar con el equipo adecuado.

tabular los resultados de la prueba de trazadores en el prototipo reportados por Felipe Livia^e(ver anexo No.2 con los resultados matemáticos utilizados en el presente estudio, se encontró que sus resultados estaban fuera de los límites obtenidos en otras investigaciones similares

con trazadores en lagunas de estabilización. Al analizar los datos presentados por Livia se halló que no se cumple la igualdad entre el caudal y el cociente del volumen de laguna y el tiempo teórico de retención.

$$Q = V / t$$

Esto nos indica, que apesar de haberse realizado correctamente la prueba de trazadores reportada por Livia y recalculando estos con los valores reales de caudal y tiempo de retención, dichos resultados no podrán ser utilizados para la **comparación de** reproductibilidad, puesto que el caudal dado por Livia fue uno de los parámetros o variables utilizados en la determinación de la escala de la laguna modelo. En otras palabras nuestro modelo representa la geometría de la laguna A-3 de San Juan de Miraflores pero con otro caudal de entrada.

La figura No.11 muestra los diagramas de tiempo de retención versus concentración de la prueba de trazadores en el prototipo y el modelo. Se observa que hay cierta semejanza entre ellos, además es importante notar que los valores de período de retención, de la prueba "Po" presentado en el cuadro No. 1, se encuentran en el rango de otras lagunas de estabilización.

3.2. EFFECTOS DE ENTRADAS Y SALIDAS EN LA LAGUNA MODELO.

En las pruebas realizadas en el modelo, se diferencian 4 grupos de experimentos (ver figura No. 9 los tres primeros guardan relación las estructuras de salida de agua, variando el número de ingresos.

3.2.1. EFFECTOS DE UNA ENTRADA.

En el primer grupo de experimentos P1, P2 y P3, tal como se muestra en la figura No. 9, se varió las estructuras de salida, manteniendo el ingreso fijo. Si observamos las características geométricas por la posición de la salida de estas 3 primeras pruebas, aparentemente en P3 existiría mayor cortocircuito y por consiguiente un menor tiempo de retención real, pero en la prueba de trazadores mostrada en la figura No. 12 observamos que el diagrama de concentración versus tiempo de la prueba P3 se encuentra corrida más hacia la derecha en relación con las demás del grupo, lo que indica claramente que el tiempo de residencia es mayor.

El cuadro No. 1 nos muestra los parámetros determinados para cada experimento, donde se puede observar un incremento progresivo del período de retención real " \bar{t} ", y una disminución de la

dispersión "d" y de los espacios muertos a medida que la estructura de salida de la laguna modelo se aproxima al centro del estanque. El cuadro No. 1 contiene también una caracterización dentro de la zona activa(zona activa es el volumen total del reactor menos el volumen de la zona muerta) se observa un predominio del flujo mezclado, que se incrementa y disminuye a medida que la salida se aproxima al centro.

3.2.2.EFECTOS DE DOS ENTRADAS.

En el segundo grupo de experimentos P4, P5 y P6 se muestra el comportamiento hidráulico en el **modelo**, al tener dos estructuras de entrada y una de salida que cambia de ubicación tal como se muestra en la figura No. 9. Al igual que en el grupo de pruebas anterior se observa también un incremento del tiempo real de permanencia, a medida que la estructura de salida se aproxima al centro de la laguna modelo. Esto se puede observar en el gráfico concentración versus tiempo de las pruebas de trazadores mostradas en la figura No. 13 y en el cuadro No. 1. Este cuadro también nos muestra que el coeficiente de dispersión disminuye a medida que la salida se aproxima al centro de la laguna, mientras que el porcentaje de espacios muertos no presenta notable variación. Comparando los resultados obtenidos con la prueba No. 1 se aprecia similar

tendencia al crecimiento y disminución del tiempo de residencia y la dispersión respectivamente, a excepción de los espacios muertos en el segundo grupo se mantiene constantes.

3.2.3.EFECTOS DE TRES ENTRADAS.

En el tercer grupo de experimentos P7, P8 y P9 se muestra el comportamiento hidráulico dentro de una laguna de estabilización al tener 3 entradas y una salida que varía del mismo modo que en los grupos de pruebas precedentes (ver figura No. 9).

En la figura No. 14 donde se aprecia que el tiempo de aparición de la máxima concentración es similar en las tres pruebas, este hecho se muestra más claramente en el cuadro No. 2 también se aprecia que hay un incremento paulatino del factor de dispersión "d" a medida que la estructura de salida es ubicada más al centro de la laguna modelo, mientras que los espacios muertos y el porcentaje de flujo mezclado y pistón permanecen casi constantes en este conjunto de pruebas.

3.2.4.EFECTOS DE TRES ENTRADAS Y TRES SALIDAS.

En el cuarto grupo de experimentos se muestra el comportamiento hidráulico de la laguna modelo al tener tres estructuras de entrada y salida dispuestas como se muestra en la figura No. 9.

En el gráfico de concentración versus tiempo mostrado en la Figura No 15, se observa que la máxima concentración del trazador aparece casi al mismo tiempo en ambas pruebas hecho que se confirma en el cuadro No. donde se muestran los resultados tabulados.

En cuanto al factor de dispersión, existe un incremento con relación a la prueba Po, asimismo se nota la existencia de un ligero aumento del porcentaje de espacios muertos y un predominio del flujo mezclado en la zona activa.

3.3 EFICIENCIA DE TRATAMIENTO DE LOS EXPERIMENTOS

SELECCIONADOS.

Como se dijo anteriormente, existen muchos modelos matemáticos que se han utilizado para la predicción del porcentaje de conversión tanto del **material** orgánico como remoción de las bacterias, parámetros útiles en el diseño de lagunas de estabilización. La ecuación No. 11 de Thirimurti, que es una modificación del modelo matemático de Wehner y Wilhelm, incluye en la predicción de la eficiencia del tratamiento biológico en las lagunas. Los cortocircuitos, espacios muertos y otras caacterísticas de mezcla son representados mediante el valor "d". Con esta ecuación se han obtenido muy buenos resultados en la predicción de la calidad

bacteriológica del efluente las lagunas de estabilización si se conocen los parámetros K_b , \bar{t} y d .

Se debe notar que N/N_0 representa la fracción de la carga orgánica que no se degrada durante su permanencia dentro de la laguna, **por consiguiente** $(1-N/N_0)$ la fracción de carga orgánica que experimenta transformación. Los datos de tiempo de retención real " t " y coeficiente de dispersión " d " obtenidos en las pruebas realizadas son suficientes para determinar la eficiencia de tratamiento y para comparar el tipo de laguna desde el punto de vista hidráulico. El valor de la tasa de reducción de bacterias " K_b " utilizado para la determinación de las eficiencias de materia orgánica fue tomado de la ecuación dada por Yáñez (ver cuadro No. 5), obtenida de las observaciones tomadas en las lagunas de San Juan.

En el cuadro No. y 4 se muestra la relación $(1-N/N_0)$ utilizando los modelos de flujo pistón, flujo **mezclado** y flujo disperso respectivamente para cada tipo de **laguna**. Los resultados de remoción de **obtenidas**, nos muestra las variaciones del comportamiento hidráulico y la importancia de su conocimiento para el diseño de lagunas de estabilización. Del total de experimentos realizados en este estudio las pruebas P3, P6, y P7 son las que

han presentado mayor eficiencia de remoción. Es interesante notar que en estas lagunas se presentan menores espacios muertos y cortocircuitos y mayor período de retención promedio, **en** suma un mejor comportamiento hidráulico.

3.4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Los resultados del primer y segundo grupo de experimentos muestran una aparente contradicción entre la distancia de entrada y salida y el tiempo de residencia promedio "t". Por lógica pareciera que debería existir un mayor valor de cortocircuito (menor tiempo de residencia promedio a medida que la distancia de la entrada y salida en la laguna disminuye. La explicación más racional a este comportamiento contradictorio pareciera ser que el flujo dentro de la laguna adopta la forma de vórtice, este tipo de flujo circular pudo haber sido causado por corrientes de aire que ingresaron por debajo de la lona de protección (las pruebas fueron realizadas con la laguna modelo completamente cubiertas con una lona). Para analizar esta posibilidad se colocaron pedazos de tecnopor dentro de la laguna modelo sin que observara la influencia del viento durante varias horas sobre la laguna totalmente cubierta. Se concluyó que los pedazos de tecnopor no fueron afectados significativamente. Todo esto hace suponer la existencia de una especie de vórtice dentro de la

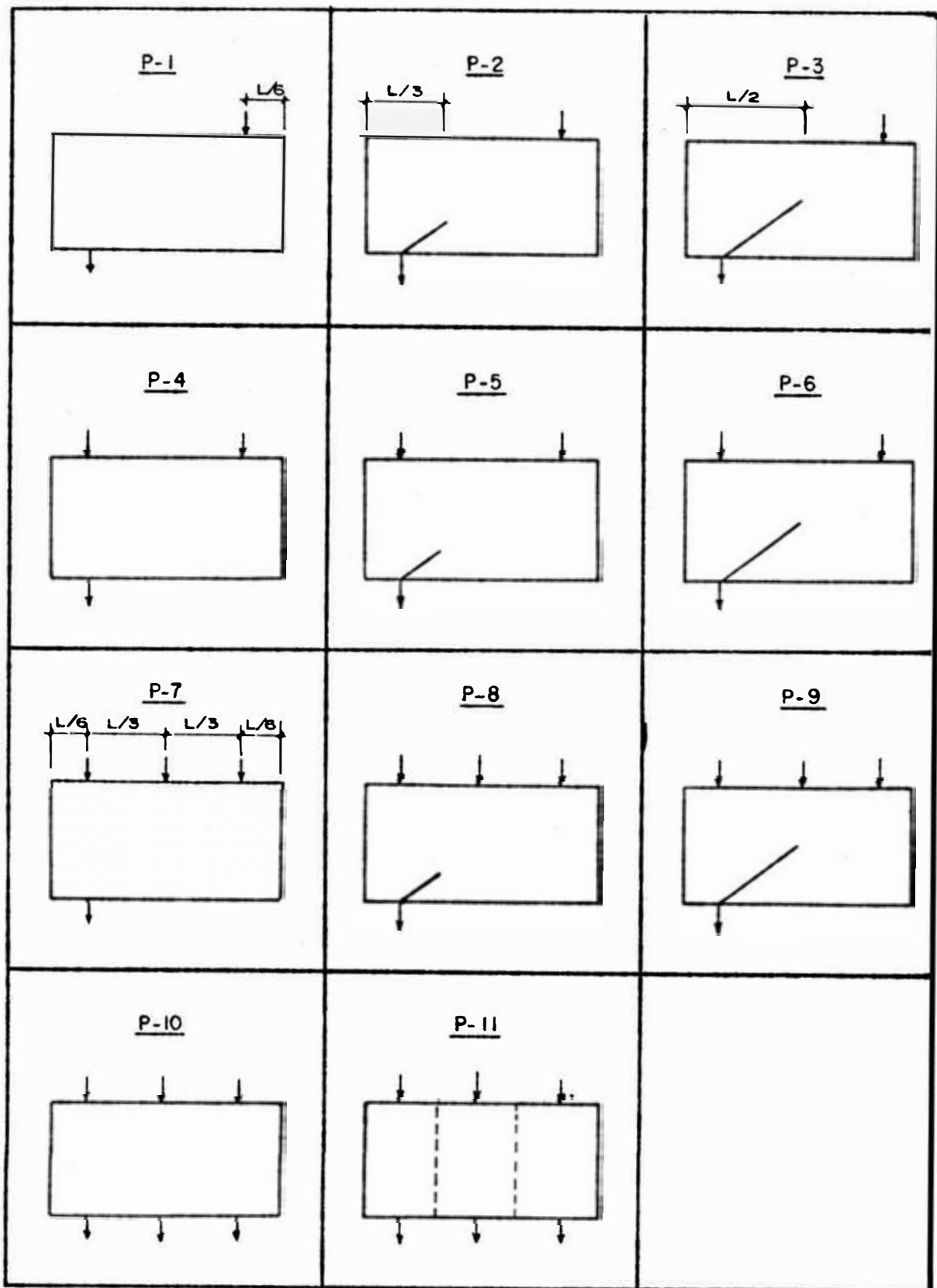
laguna (ver figura No. 16); y que a medida que la estructura de salida de la laguna es ubicada hacia el centro de esta, produce que la trayectoria de las moléculas de agua desde la entrada a la salida se hace mayor. Esto también podría explicar en cierta forma el brusco incremento del flujo mezclado (pruebas P2, P5). al encontrarse la estructura de salida dirigiéndose hacia el centro de la laguna modelo provocaría un corte brusco de las líneas de flujo.

En el tercer grupo de experimentos hubo muy poca variación en tiempo de residencia promedio, existió mayores cortocircuitos cuando la estructura de salida estuvo más próxima a la estructura de entrada era lo esperado. Se aprecia también un mayor porcentaje de mezcla completa en la zona activa y una disminución de los espacios muertos, esto es explicable debido al mayor número de entradas.

En cuarto grupo de experimentos a pesar que el período de retención es mayor y los espacios muertos menores con respecto a la prueba "Po". Es evidente que existe mayor cortocircuito esto se evidencia en la aparición casi instantánea del trazador en la salida en las dos pruebas de los dos grupos, lo que ocasionaría un inadecuado tratamiento de las aguas servidas, aunque en los resultados de eficiencia de

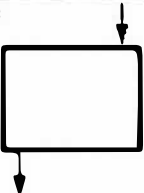
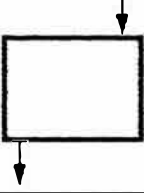
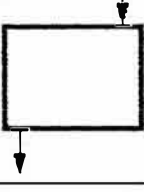
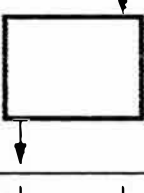
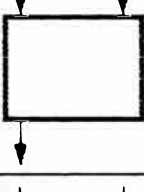
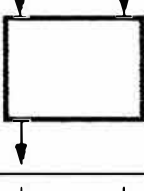
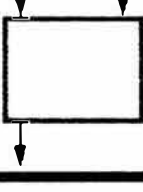
tratamiento evidencia lo contrario. esto se debe quea pesar que el comportamiento hidráulico influye dentro del tratamiento, existe otros parámetros que también intervienen como es el caso de la velocidad de degradación de la materia orgánica y mortandad bacteriana.

De acuerdo a los estudios realizados por Mangelson y Watters³ se determinó que la curva de concentración versus tiempo de residencia es muy sensible a ciertas influencias hidráulicas los cuales producirían errores en la interpretación de los resultados en la laguna modelo. A pesar que no se haya podido analizar con detalle esta reproductibilidad del comportamiento hidráulico del prototipo y el modelo se ha tenido cuidado en evitar esas influencias hidráulicas que incrementarían el error de reproductibilidad.

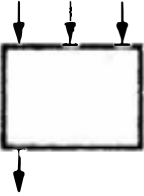
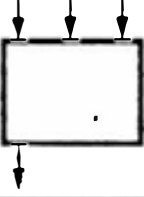
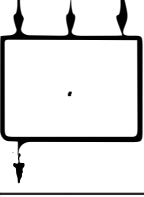
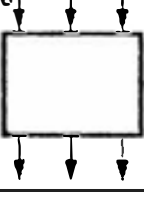
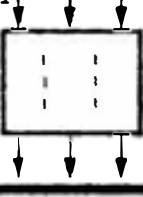


CONFIGURACION DE ENTRADA Y SALIDA
EN EL MODELO

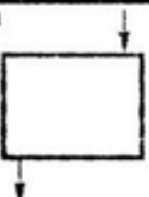
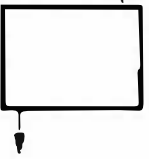
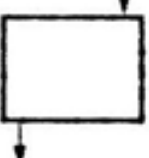
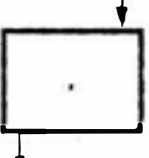
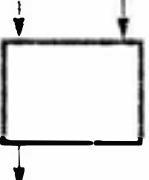
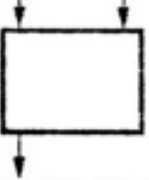
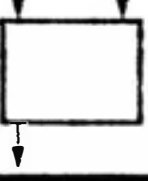
EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS EN LA LAGUNA DE SIMULACION

| GRUP | PRUEBA | PERIODO DE RETENCION "t"(horas) | FACTOR DE DISPERSION "d" | FLUJO PISTON "p"(%) | ESPACIOS MUERTOS "m"(%) | FLUJO MEZCLADO "M"(%) |
|------|--|--|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0  | 11.61 | 0.3763 | 23.26 | 48.41 | 76.73 |
| | 1  | 12.47 | 0.3156 | 32.48 | 44.59 | 67.51 |
| | 2  | 12.99 | 0.3197 | 16.53 | 39.54 | 83.46 |
| | 3  | 15.77 | 0.2576 | 30.25 | 33.89 | 69.75 |
| 2 | 4  | 13.58 | 0.2476 | 31.93 | 37.37 | 68.07 |
| | 5  | 14.10 | 0.2781 | 14.29 | 37.06 | 85.70 |
| | 6  | 14.80 | 0.2198 | 33.69 | 37.68 | 66.31 |

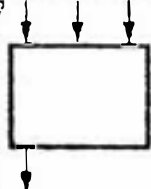
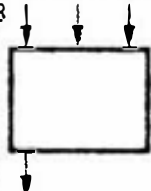
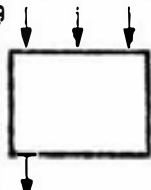
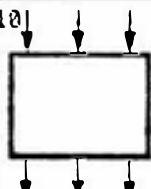
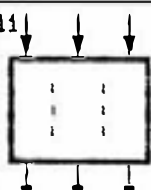
EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS EN LA LAGUNA DE SIMULACION

| GRUP | PRUEBA | PERIODO DE RETENCION "t"(horas) | FACTOR DE DISPERSION "d" | FLUJO PISTON "P"(%) | ESPACIOS MUERTOS "w"(%) | FLUJO MEZCLADO "M"(%) |
|----------|---|--|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 3 | 7  | 14.61 | 0.1568 | 31.09 | 32.45 | 68.90 |
| | 8  | 14.51 | 0.2198 | 31.28 | 36.06 | 68.71 |
| | 9  | 14.31 | 0.2477 | 27.88 | 35.45 | 72.11 |
| 4 | 10  | 14.42 | 0.2289 | 24.89 | 35.72 | 75.11 |
| | 11  | 14.49 | 0.2577 | 20.63 | 36.96 | 79.37 |

DETERMINACION DE LAS EFICIENCIAS DE TRATAMIENTO EN LA LAGUNA DE SIMULACION

| GRUP | PRUEBA | PERIODO DE RETENCION "t"(horas) | FACTOR DE DISPERSION "d" | EFICIENCIA DE REMOCION (1- N/No) | | |
|------|--|--|--------------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|
| | | | | FLUJO PISTON | F. MEZCLADO | F. DISPERSO |
| 1 | 0  | 11.61 | 0.3764 | 73.75 | 56.94 | 64.76 |
| | 1  | 12.47 | 0.3156 | 75.84 | 58.68 | 67.65 |
| | 2  | 12.99 | 0.3197 | 77.23 | 59.67 | 68.81 |
| | 3  | 15.77 | 0.2576 | 83.41 | 64.24 | 76.22 |
| 2 | 4  | 13.58 | 0.2476 | 73.20 | 60.74 | 71.27 |
| | 5  | 14.10 | 0.2781 | 79.93 | 61.63 | 72.76 |
| | 6  | 14.80 | 0.2198 | 81.47 | 62.77 | 74.33 |

DETERMINACION DE LAS EFICIENCIAS DE TRATAMIENTO EN LA LAGUNA DE SIMULACION

| GRUP | PRUEBA | PERIODO DE RETENCION "t"(horas) | FACTOR DE DISPERSION "d" | EFICIENCIA DE REMOCION (1-N/No) | | |
|------|---|--|--------------------------------|-----------------------------------|------------|------------|
| | | | | FLUJO PISTON | F.MEZCLADO | F.DISPERSO |
| 3 | 7  | 14.61 | 0.1568 | 81.06 | 62.46 | 75.38 |
| | 8  | 14.51 | 0.2198 | 80.85 | 62.30 | 73.76 |
| | 9  | 14.31 | 0.2477 | 80.41 | 61.98 | 72.82 |
| 4 | 10  | 14.42 | 0.2289 | 80.66 | 62.16 | 73.40 |
| | 11  | 14.49 | 0.2577 | 80.80 | 62.27 | 73.01 |

FLUJO PISTON $N/N_0 = e^{-kt}$

FLUJO MEZCLADO $N/N_0 = N_0/(1+kt)$

FLUJO DISPERSO $N/N_0 = [4a e^{-(1-a)/2d}] / (1+a)^2$

COEFICIENTE DE REACCION DE PRIMER ORDEN

K_b

| YANEZ | |
|---------------------------------|--|
| PRIMARIAS | $K_b = 0.512 \times 1.165^{(T - 20)}$ |
| SECUNDARIA | $K_b = 0.601 \times 1.103^{(T - 20)}$ |
| TECIARIAS | $K_b = 0.782 \times 1.015^{(T - 20)}$ |
| T | TEMPERATURA °C |
| K_b | COEFICIENTE DE REACCION DE PRIMER ORDEN DIAS ⁻¹ |
| PARA UNA LAGUNA PRIMARIA A 19°C | |
| $K_b = 0.4395$ | |

FUENTE: "Manual de Métodos Experimentales de Evaluación de Lagunas de Estabilización" 1983.

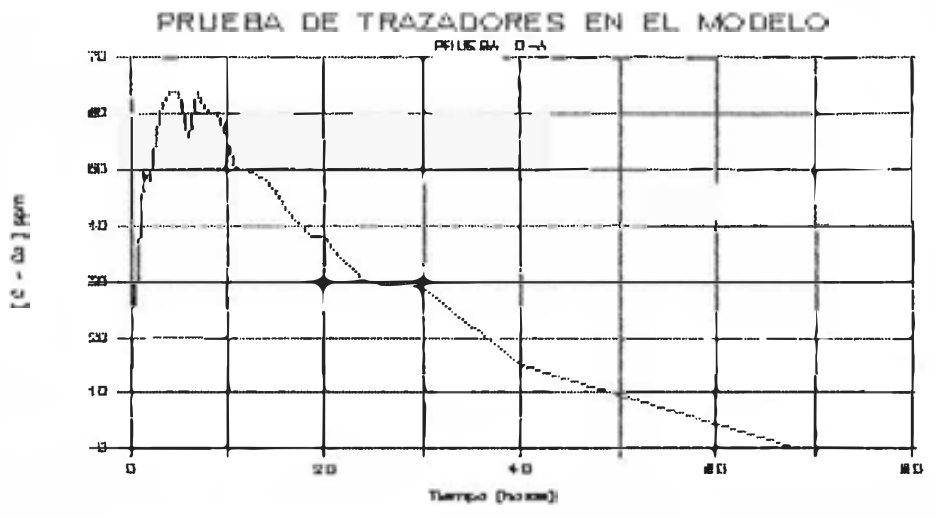


Fig. No 10 : CURVA C Vs. t

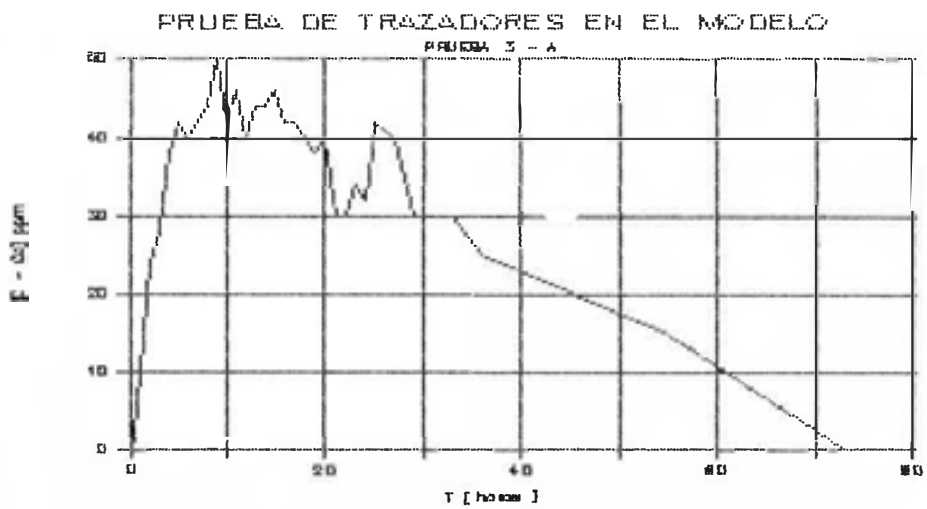
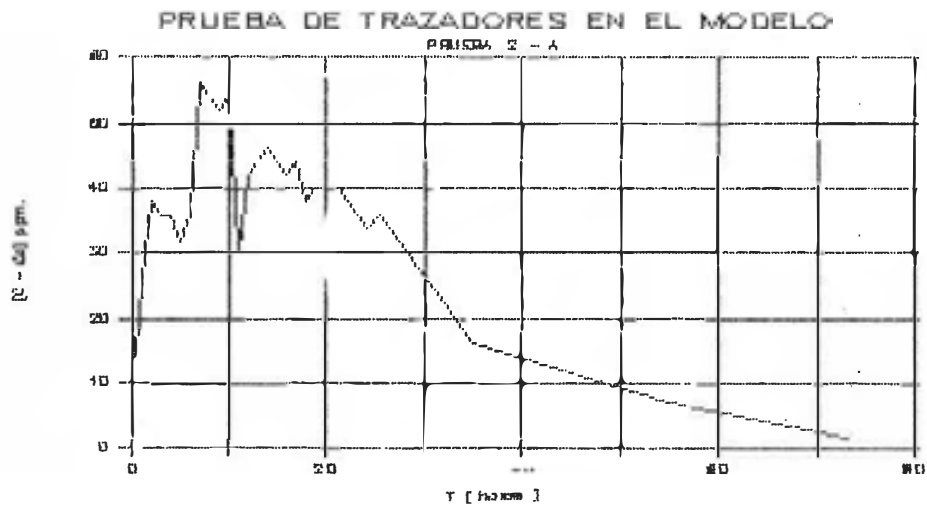


Fig. No II : CURVA C Vs. t

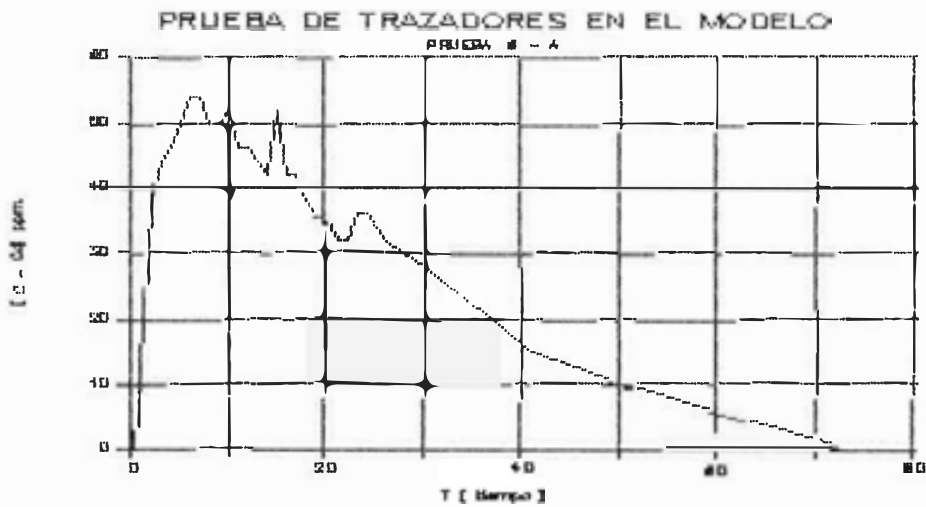
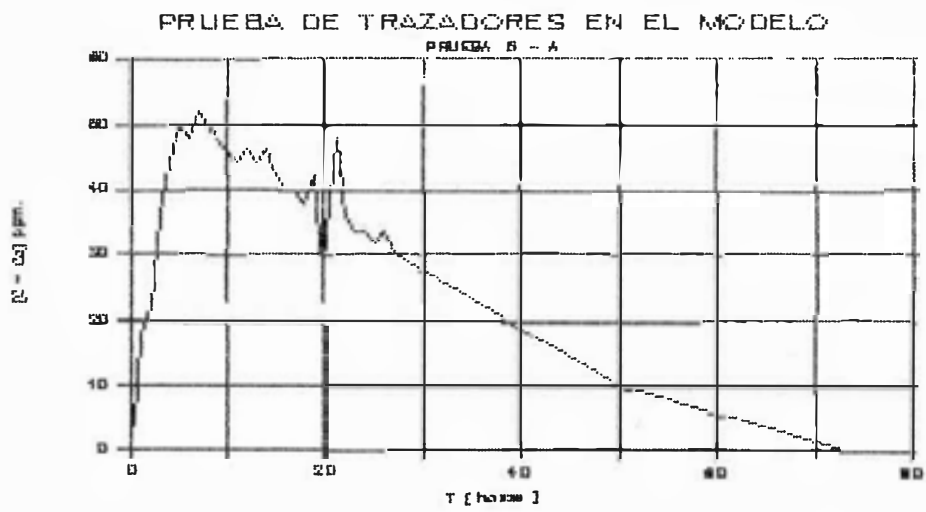
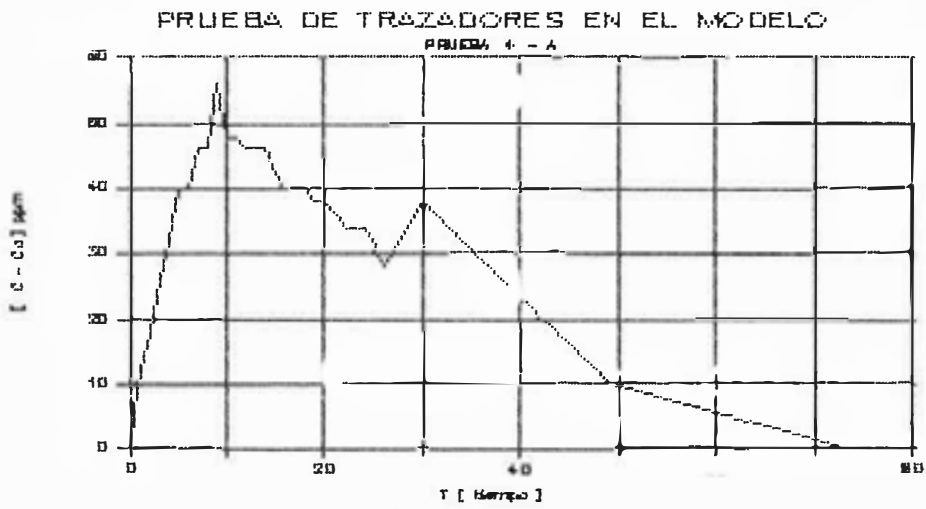


Fig. No 12 CURVA C Vs. t

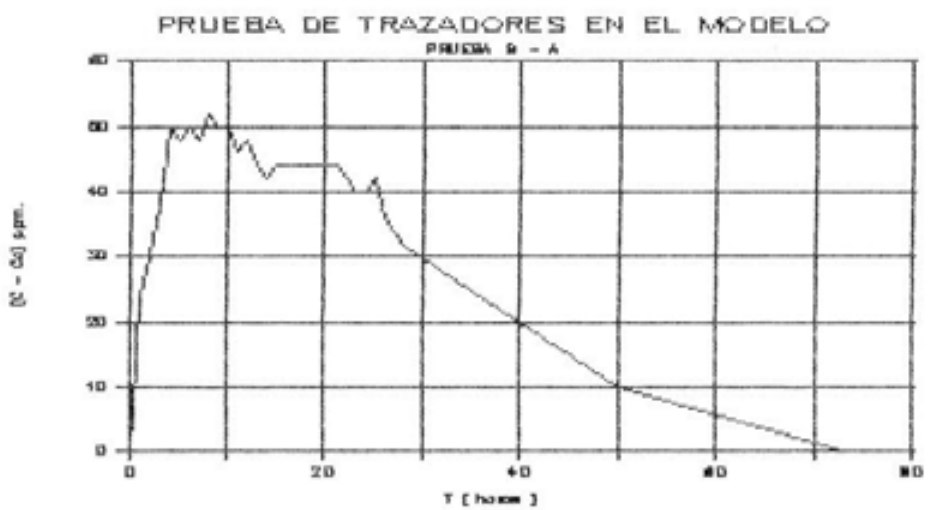
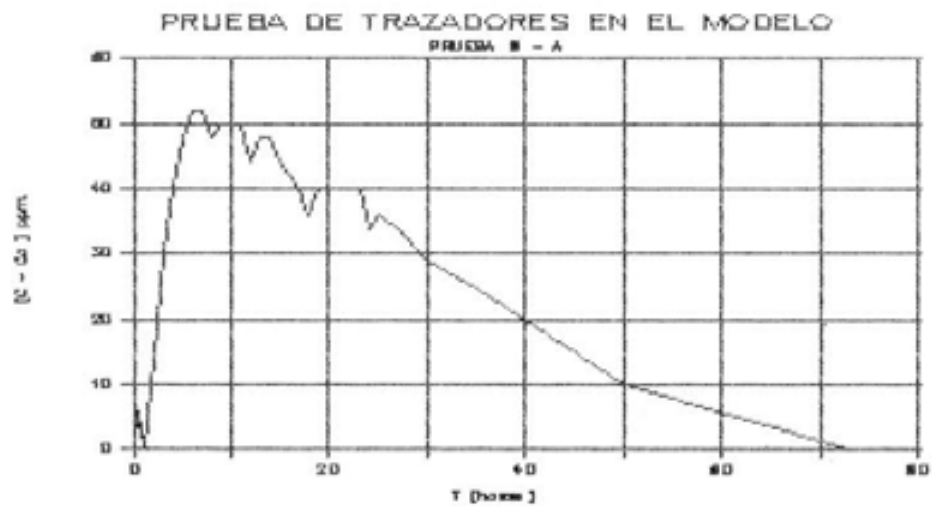
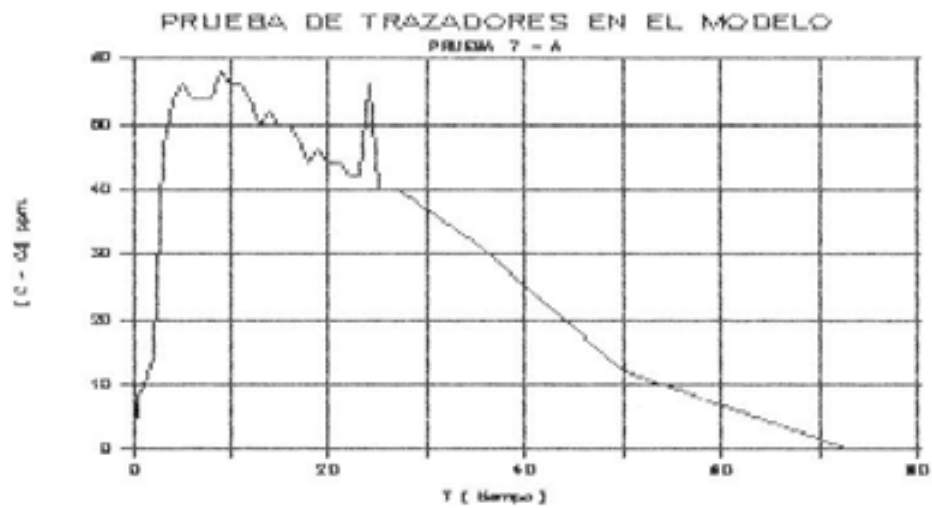
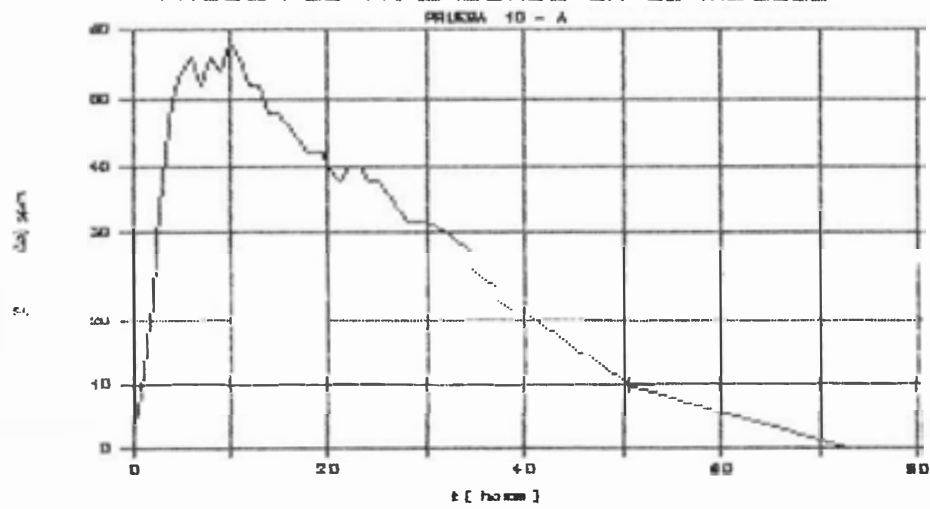


Fig. No 13 : CURVA C Vs. t

PRUEBA DE TRAZADORES EN EL MODELO



PRUEBA DE TRAZADORES EN EL MODELO

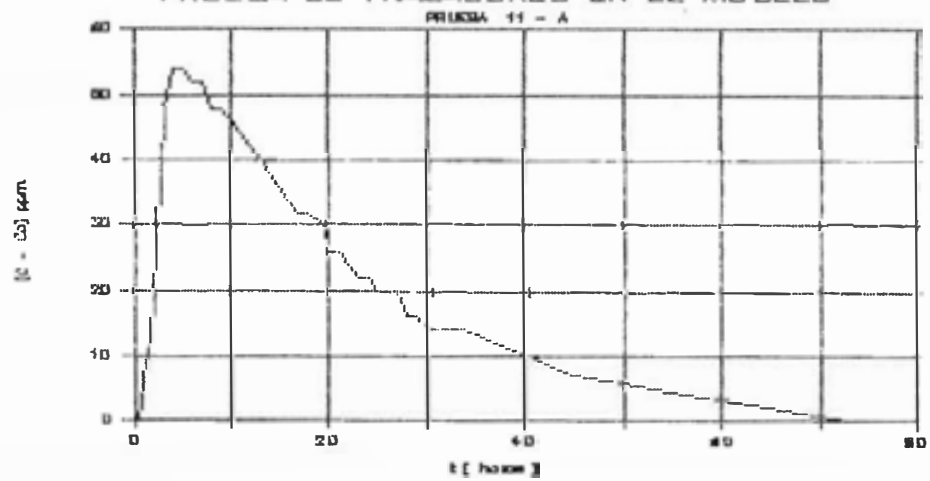


Fig. No 14 : CURVA C vs. t

C A P I T U L O I V

A N A L I S I S D E C O S T O S

4.1. ANALISIS DE COSTOS.

Es evidente que una unidad de producción es más eficiente que otra cuando el costo de producción que reporta es menor. En este caso para una planta o unidad de tratamiento de aguas residuales, es más eficiente cuando el costo por metro cúbico de agua residual tratada es mínima.

En los párrafos siguientes se evaluará los costos que representa el realizar modificaciones en el prototipo (laguna A-3) anteriormente estudiada, así como el incremento de la producción (Mayor volumen de agua residual tratada) debido a las modificaciones realizadas en el modelo.

Para el análisis de beneficio costo de las diferentes configuraciones estudiadas en la laguna modelo, se ha escogido los cuatro mejores pruebas que presentan mayor eficiencia.

El cuadro No. 6 muestra el costo total anual requerido para el funcionamiento de la laguna prototipo denominada A-3. Los datos presentados en el cuadro No.6 y No.7 se obtuvieron del estudio de la evaluación económico y financiero de las lagunas de San Juan, realizado por J. Marchán.

El cuadro No.8 muestra el incremento de los costos totales anuales al realizar las modificaciones estructurales en la laguna prototipo que producen un mejoramiento en la eficiencia del tratamiento. Además se determina el volumen de agua residual tratada anualmente para las configuraciones seleccionadas. De los cálculos realizados se obtuvo que configuración de la laguna P7 tiene un menor costo de tratamiento, pesar de no ser la configuración más eficiente.

Esta última observación es muy importante, ya que la solución no sólo debe ser técnica sino también económica.

CUADRO No 6.

COSTO TOTAL ANUAL DE FUNCIONAMIENTO DE LA LAGUNA PROTOTIPO

| | MONTO (S) | DEPRECIACION ANUAL | COSTO/ANO (S) |
|---|--------------|-----------------------|------------------|
| 1.0. COSTOS FIJOS | | | |
| 1.1. Construccion de la laguna. | 32,586 | 1/20 | 1,629.30 |
| 1.2. Estructura de entrada. | | 1/13 | 245.33 |
| 1.3. Estructura de salida. | | 1/13 | 36.15 |
| 2.0. COSTOS DE OPERACION Y MANTENIMIENTO | | | 600.45 |
| 3.0. OTROS (Gastos administrativos) | | | 15.00 |
| COSTO TOTAL | | | 2,526.28 |

CUADRO No. 7

**COSTOS UNITARIOS DE LAS ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA
PARA LAGUNAS DE ESTABILIZACION**

| | UNIDAD | COSTO |
|--------------------------------|--------|--------|
| COSTO DE ESTRUCTURA DE ENTRADA | ml. | 29.35 |
| COSTO DE ESTRUCTURA DE SALIDA | ml. | 16.26 |
| COSTO DE VERTEDERO DE SALIDA | Unid. | 189.00 |

CUADRO No 8

COSTO TOTAL POR METRO CUBICO DE AGUA SERVIDA TRATADA

| LAGUNA | COSTO DE TRATAMIENTO | INVERSION INICIAL TOTAL | DEPRECIACION | INVERSION INICIAL/ANO | COSTO TOTAL POR AÑO |
|--------|----------------------|-------------------------|--------------|-----------------------|---------------------|
| P-0 | 2,526.28 | | | | 2,526.28 |
| P-2 | 2,526.28 | 1,128.95 | 1/13 | 86.470 | 2,612.75 |
| P-7 | 2,526.28 | 293.50 | 1/13 | 22.570 | 2,548.85 |
| P-6 | 2,526.28 | 1270.70 | 1/13 | 97.746 | 2,624.03 |
| P-8 | 2,526.28 | 946.97 | 1/13 | 72.840 | 2,599.12 |

| LAGUNA | U DE AGUA TRATADA MILES DE ¹⁰⁰⁰ / AÑO | COSTO DEL TRATAMIENTO POR U |
|--------|---|-----------------------------|
| P-0 | 470.742 | 53.45 X 1014 |
| P-2 | 554.048 | 47.15 X 1014 |
| P-7 | 547.940 | 46.51 X 1014 |
| P-6 | 540.200 | 48.56 X 1014 |
| P-8 | 526.164 | 48.40 X 1014 |

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1.- El estudio del comportamiento hidráulico en lagunas de estabilizaci3n a escala de laboratorio es una alternativa versátil y econ3mica que permite estudiar el tipo de flujo que se produciría en el reactor bajo condiciones controladas.

Las fuerzas predominantes que influyen en el movimiento en el fluido dentro de una laguna de estabilizaci3n están regidas por la ley hidráulica de Froude.

3. Las pruebas P3, P6 y P7 desde el punto de vista Hidráulico proporciona mayor eficiencia de remoci3n de DBO y/o bacterias pat3genas.

4.- De los resultados obtenidos se estima que hay formaci3n de un flujo tipo v3rtice cuando la estructura de salida de la laguna modelo se aproxima al centro de la unidad de tratamiento.

5.- En todas las configuraciones estudiadas hay una predominancia del flujo del tipo mezclado en la zona activa.

6.- La configuración presentó un mejor comportamiento hidráulico y mayor eficiencia de remoción, sin embargo en la configuración se obtuvo un menor costo de tratamiento por metro cúbico de agua residual tratada.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- LIVIA, J. Felipe "Aspectos Hidráulicos de las Lagunas de Estabilización de San Juan de Miraflores". Tesis de grado UNI. 1983.
- 2.- LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA "Modelos a Escala".1980
- 3.- MANGELSON, K. & WATTERS, G. Z. " Treatment Efficiency of Waste Stabilization Ponds". Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE: SA 2 1972.
- 4.- METCALF & EDDY, Inc. " Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse". McGraw-Hill Book Co.,1979.
- 5.- MURPHY, K. L. & TIMPANY, P. L. " Design and Analisis of Mixing for Aeration Tank " Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE: Vol. 13 SA 5 1967.
- 6.- POLPRASERT, C. & BHATTARAI, K. " Dispersion model for waste stabilization pond ". Journal of Environmental Engineering ASCE: Vol. 111 , No. 1 1985.

- 7.- PROGRAMA REGIONAL OPS/EHP/CEPIS DE MEJORAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO. Manual de instrucción Abril, 1981.
- 8.- ROCHA, "Consideraciones Generales sobre los Modelos Hidráulicos ". 1978.
- 9.- SAENZ, F "Evaluación Optimización Funcionamiento del Sistema de Lagunas de San Juan". Agosto de 1986.
- 10.- SALAS, C. "Estudio Teórico de Modelos". 1979.
- 11.- STREETER, V. "Mecanica de Fluidos".
- 12.- THIRUMURTHI, A.M. "Desing Principles of Waste Stabilization Ponds". Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE: SA 2 1969.
- 13.- YANEZ, F. "Evaluation of the San Juan Stabilization ponds". Cepis 1980.
- 14.- YANES, F. "Manual Métodos Experimentales Evaluación de Lagunas de Estabilización". Serie Técnica CEPIS No. 24-1983.

15.- YANES, F "Reducción **Organismos** Patógenos
Diseño de Lagunas de Estabilización en Países en
Desarrollo". Seminario Regional de Investigación
Sobre Lagunas de Estabilización 1986.