

01177



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**TESIS:**

**" REMOCIÓN DE ALGAS EN EFLUENTES DE  
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN MEDIANTE  
CAMBIOS EN EL FLUJO HIDRÁULICO POR  
MEDIO DE MAMPARAS SUMERGIDAS "**

**PRESENTADA POR:**

**ING. IVETTE RENÉE HANSEN RODRÍGUEZ**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER  
EL GRADO DE**

**MAESTRA EN INGENIERÍA  
(AMBIENTAL)**

**DIRIGIDA POR:**

**DRA. GABRIELA MANTILLA MORALES**



**JIUTEPEC, MORELOS**

**2005**

m. 345313



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## *Agradecimiento*

A la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, por contribuir en mi formación académica.

Al personal docente y administrativo de la **División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI-UNAM), Campus Morelos**.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de Maestría.

Al **Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)**, en especial al personal de la Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales; así como de la Planta Piloto, por las facilidades para la conclusión de este trabajo.

A la **Dra. Gabriela Mantilla Morales**, por su apoyo, dedicación y paciencia, pero más que todo por su sincera amistad.

A mis sinodales, **Dr. Jorge de Victorica Almeida, Dr. Victor Luna Pabello, M.I. Antonio Ramírez González y Dr. Pedro Martínez Pereda**, por sus comentarios y sugerencias, que permitieron mejorar este trabajo.

A la **Dra. Rebeca Romero Álvarez**, del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey, por la asesoría brindada en el diseño de experimentos.

A **mi familia**, por ser el sostén de mi vida e inspiración para que siempre continúe adelante.

A **mis compañeros y amigos**, por compartir las angustias y gratificaciones, brindándome con ello momentos muy satisfactorios.

A **Luis Carlos González Márquez**, por su paciencia, apoyo y palabras de aliento en los momentos adversos.

A **todas las personas** que, de una u otra forma, hicieron posible este sueño. Así como a todas aquellas que colocaron piedras en mi camino, las cuales me enseñaron a salir adelante.

A todos, mil gracias...

---



<b>CAPÍTULO II. PROBLEMÁTICA</b>	<b>29</b>
<b>II.1</b> Problemas en las lagunas de estabilización .....	29
<b>II.1.1</b> Problemas de crecimiento de malezas acuáticas.....	29
<b>II.1.2</b> Problemas de vegetación en los bordos.....	30
<b>II.1.3</b> Problemas de materia flotante .....	30
<b>II.1.4</b> Problemas de malos olores .....	30
<b>II.1.5</b> Problemas de insectos .....	31
<b>II.1.6</b> Problemas por una DBO alta en el efluente .....	32
<b>II.1.7</b> Problemas de algas verde-azules.....	32
<b>II.2</b> Problemas generados por la cantidad excesiva de algas .....	33
<b>II.3</b> Formas de eliminación.....	34
<b>II.3.1</b> Aplicación de algicidas .....	34
<b>II.3.2</b> Precipitación química del material suspendido.....	34
<b>II.3.3</b> Autofloculación .....	34
<b>II.3.4</b> Flotación por aire disuelto .....	34
<b>II.3.5</b> Cloración .....	34
<b>II.3.6</b> Coagulación – floculación .....	35
<b>II.3.7</b> Tratamiento en suelo.....	35
<b>II.3.8</b> Control con biocidas .....	35
<b>II.3.9</b> Cambios en el flujo hidráulico .....	35
<b>II.4</b> Mamparas.....	35
<b>II.4.1</b> Ventajas por el uso de mamparas, para provocar cambios en el flujo hidráulico de salida.....	36
 <b>CAPÍTULO III. PROPUESTA DE SOLUCIÓN</b>	 <b>37</b>
<b>III.1</b> Metodología.....	38
<b>III.1.1</b> Descripción general.....	38
<b>III.1.2</b> Arreglos dentro de las lagunas.....	39
<b>III.1.3</b> Tipo de mamparas utilizadas .....	39
<b>III.1.4</b> Ubicación de las mamparas .....	40
<b>III.1.5</b> Pruebas de funcionalidad .....	40
<b>III.1.6</b> Análisis de la influencia de la turbulencia.....	41
<b>III.1.7</b> Tiempo de retención hidráulico utilizado .....	41
<b>III.1.8</b> Tipo de iluminación utilizada .....	42
<b>III.1.9</b> Desarrollo algal .....	43
<b>III.1.10</b> Agua de alimentación del sistema .....	44
<b>III.1.11</b> Toma de muestra y análisis realizados.....	44
<b>III.1.12</b> Monitoreo de 24 horas.....	45
<b>III.1.13</b> Observación al microscopio .....	45
<b>III.2</b> Parámetros de medición y técnicas.....	45
<b>III.2.1</b> Muestreo.....	45
<b>III.2.2</b> Medición de caudal.....	46
<b>III.2.3</b> Temperatura.....	46
<b>III.2.4</b> Potencial de Hidrógeno (pH).....	46
<b>III.2.5</b> Oxígeno disuelto (OD) .....	47

III.2.6	Clorofila .....	48
III.2.7	Sólidos suspendidos totales (SST) .....	49
III.2.8	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	49
III.2.9	Características climatológicas.....	51
III.2.9.1	Temperatura ambiental.....	51
III.2.9.2	Precipitación pluvial .....	51
III.2.9.3	Radiación solar global (RSG).....	51
III.3	Propuesta del modelo experimental .....	52
III.3.1	Diseño con bloques completos al azar (BCA) .....	52
III.3.1.1	Modelo estadístico .....	53
III.3.1.2	Ventajas.....	54
III.3.1.3	Desventajas.....	54

## **CAPÍTULO IV. HIDRÁULICA DEL SISTEMA** **55**

	Introducción .....	55
IV.1	Características de flujo en un canal .....	56
IV.1.1	Características del flujo .....	56
IV.1.2	Tipos de flujo.....	56
IV.1.3	Geometría de la sección .....	58
IV.1.4	Número de Froude .....	58
IV.2	Cálculos en el reactor.....	59
IV.2.1	Reactor con dos mamparas .....	61
IV.2.2	Reactor con tres mamparas.....	64
IV.3	Criterio de diseño para las lagunas facultativas .....	67
IV.3.1	Revisión del diseño de las lagunas.....	69
IV.4	Criterio de diseño para las mamparas sumergidas .....	71
IV.4.1	Teoría de la suspensión.....	71
IV.4.2	Diseño de la longitud de la cámara.....	73
IV.4.3	Localización y profundidad de las mamparas .....	73
IV.4.4	Cálculo de la velocidad vertical del flotante.....	73
IV.4.5	Velocidad vertical y turbulencia .....	77
IV.4.6	Aplicación al sistema.....	77

## **CAPÍTULO V. RESULTADOS OBTENIDOS** **79**

V.1	Corrida 1 (Laguna A con 2 mamparas; Laguna B sin mamparas).....	80
V.1.1	Sólidos suspendidos totales (SST) .....	80
V.1.2	Demanda bioquímica de oxígeno, soluble (DBO <sub>5</sub> soluble) .....	82
V.1.3	Demanda bioquímica de oxígeno, total (DBO <sub>5</sub> total) .....	83
V.1.4	Clorofila <i>a</i> , <i>b</i> y <i>c</i> .....	85
V.1.5	Potencial de Hidrógeno (pH) y oxígeno disuelto (OD) .....	88
V.2	Corrida 2 (Laguna A con 3 mamparas; Laguna B sin mamparas).....	90
V.2.1	Sólidos suspendidos totales .....	90
V.2.2	Demanda bioquímica de oxígeno, soluble.....	91
V.2.3	Demanda bioquímica de oxígeno, total .....	92
V.2.4	Clorofila <i>a</i> , <i>b</i> y <i>c</i> .....	94
V.2.5	Condiciones climatológicas .....	97

---

<b>V.2.5.1</b>	Temperatura ambiental y del sistema .....	97
<b>V.2.5.2</b>	Radiación solar.....	98
<b>V.2.5.3</b>	Precipitación pluvial.....	100
<b>V.2.6</b>	Potencial de Hidrógeno y oxígeno disuelto.....	102
<b>V.3</b>	Monitoreo de 24 horas.....	104
<b>V.4</b>	Observación al microscopio .....	112
<b>V.5</b>	Comparación entre las salidas de ambas corridas.....	114
<b>V.6</b>	Correlaciones encontradas.....	118
<b>V.6.1</b>	Obtención de las rectas ajustadas .....	120

---

**CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** **121**

---

**GLOSARIO** **124**

---

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS** **127**

## ANEXOS

## DISEÑO DE EXPERIMENTOS

<b>A.</b>	Utilizando el software estadístico MINITAB, versión 13.1, para windows.....	132
<b>A.1</b>	Pruebas para 2 mamparas y el control 1 .....	132
<b>A.2</b>	Pruebas para 3 mamparas y el control 2 .....	133
<b>A.3</b>	Pruebas para el control 1 y control 2 .....	133
<b>A.4</b>	Pruebas para 2 y 3 mamparas .....	134
<b>B.</b>	Cálculo de las correlaciones de Pearson y regresiones lineales sin ordenada al origen .....	135
<b>B.1</b>	Entradas sin ordenada .....	135
<b>B.1.1</b>	2 mamparas.....	135
<b>B.1.2</b>	Control 1 .....	135
<b>B.1.3</b>	3 mamparas.....	135
<b>B.1.4</b>	Control 2 .....	136
<b>B.2</b>	Salidas sin ordenada.....	136
<b>B.2.1</b>	2 mamparas.....	136
<b>B.2.2</b>	Control 1 .....	136
<b>B.2.3</b>	3 mamparas.....	137
<b>B.2.4</b>	Control 2 .....	137
<b>B.3</b>	Entradas para diferencias ( $DBO_5$ total – $DBO_5$ soluble).....	137
<b>B.3.1</b>	2 mamparas.....	137
<b>B.3.2</b>	Control 1 .....	137
<b>B.3.3</b>	3 mamparas.....	138
<b>B.3.4</b>	Control 2 .....	138
<b>B.4</b>	Salidas para diferencias ( $DBO_5$ total – $DBO_5$ soluble) .....	138
<b>B.4.1</b>	2 mamparas.....	138
<b>B.4.2</b>	Control 1 .....	138
<b>B.4.3</b>	3 mamparas.....	138
<b>B.4.4</b>	Control 2 .....	138
<b>C.</b>	Diagramas de dispersión, utilizando el software S Plus 2000 .....	139
<b>C.1</b>	Entradas.....	139
<b>C.2</b>	Salidas .....	139
<b>C.3</b>	Entradas para diferencias ( $DBO_5$ total – $DBO_5$ soluble).....	140
<b>C.4</b>	Salidas para diferencias ( $DBO_5$ total – $DBO_5$ soluble) .....	141
<b>D.</b>	Utilizando el Software Estadístico JMP Versión 3.2.1, edición estudiantil .....	142
<b>D.1</b>	Pruebas de homogeneidad para los controles 1 y 2 .....	142
<b>D.2</b>	Pruebas para los tratamientos control 1 y 2 mamparas (Entradas) .....	144
<b>D.3</b>	Pruebas para los tratamientos control 2 y 3 mamparas (Entradas) .....	146

## NOMENCLATURA

A	Área hidráulica, $m^2$
a	Coefficiente, adimensional
$A_{an}$	Área superficial de la laguna anaerobia a la profundidad media, $m^2$
$A_f$	Área superficial de la laguna facultativa a la profundidad media, $m^2$
$A_p$	Área proyectada de la partícula en ángulo recto a la dirección de sedimentación
$C_D$	Coefficiente de resistencia al avance (o de fricción), adimensional
d	Número de dispersión hidráulica, adimensional
D	Profundidad del nivel hidráulico, m
$DBO_f$	Concentración de la $DBO_5$ en el efluente, mg/l
$DBO_o$	Concentración de la $DBO_5$ en el influente, mg/l
DQO	Demanda química de oxígeno, mg/l
$d_p$	Diámetro de la partícula, m
f	Factor de toxicidad por algas, adimensional
$f^*$	Factor de toxicidad por sulfuros, adimensional
g	Aceleración de la gravedad = $9.81 \text{ m/s}^2$
h	Profundidad útil, m
i	Gradiente hidráulico, adimensional
K	Constante de reacción de la $DBO$ , $d^{-1}$
$K_{20}$	Constante de reacción global de primer orden para la $DBO$ a $20^\circ\text{C}$ , $d^{-1}$
$K_{an}$	Constante de decaimiento neta de coliformes fecales para lagunas anaerobias, $d^{-1}$
$K_b$	Constante de decaimiento neta de coliformes fecales, $d^{-1}$
$K_h$	Conductividad hidráulica, m/s
$K_T$	Constante global de decaimiento de coliformes fecales, $d^{-1}$
$K_v$	Constante de Von Kármán, adimensional
L	Largo de la laguna en dirección del flujo, m
$L_a$	Carga orgánica por unidad de área, kg $DBO_5$ /ha d
$L_{CR}$	Distancia crítica entre la primera y la segunda mampara sumergida, m
$L_e$	$DBO_5$ en el efluente, mg/l
$L_i$	$DBO_5$ en el influente, mg/l
$L_{mampara}$	Distancia entre la primera y la segunda mampara sumergida, m
Long	Longitud mínima requerida para la cámara, m
$L_{salida}$	Distancia de la segunda mampara a la pared de salida de la cámara, m
$L_u$	$DBO_5$ última del efluente, mg/l
n	Número de lagunas de maduración
$N_e$	Coliformes fecales en el efluente, NMP/100 ml
$N_i$	Coliformes fecales en el influente, NMP/100 ml
$N_{Fr}$	Número de Froude, adimensional
$n_M$	Coefficiente de Manning, adimensional
$N_{Re}$	Número de Reynolds, adimensional
$N_Z$	Número de Rouse, adimensional
$N_{ZCR}$	Número de Rouse crítico, adimensional

PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
Q	Gasto o caudal, LPS ó $m^3/d$
$Q_{med}$	Gasto o caudal medio, LPS
$R_h$	Radio hidráulico, m
s	Factor de pendiente horizontal
T	Temperatura de diseño, °C
t	Tiempo, d
$T_{agua}$	Temperatura del agua, °C
$T_{mm}$	Temperatura media mensual mínima del aire, °C
TRH	Tiempo de retención hidráulico, d
$t_t$	Periodo transcurrido entre la medición de la primera y la última $DBO_5$ , d
u	Velocidad real de las líneas de flujo en la laguna, m/s
$U^*$	Velocidad cortante, m/s
v	Velocidad media, m/s
$V_a$	Volumen de la laguna anaerobia, $m^3$
Vol	Volumen de la laguna, $m^3$
w	Velocidad vertical del flotante aún en el agua, m/s
W	Ancho de la laguna, m
$w'$	Velocidad vertical efectiva del flotante en el agua, m/s
$w_t$	Velocidad de caída del flotante, m/s
X	Relación largo/ancho, adimensional
Y	Profundidad vertical máxima que el flotante tendrá que recorrer, m
Z	Profundidad media de la laguna, m
$\nu$	Viscosidad cinemática del fluido, $m^2/s$
$\delta$	Parámetro teta de Arrhenius = 1.07
$\theta$	Tiempo de residencia hidráulico, d
$\theta_a$	Tiempo de residencia hidráulico en la laguna anaerobia, d
$\theta_f$	Tiempo de residencia hidráulico en la laguna facultativa, d
$\theta_m$	Tiempo de residencia hidráulico en la laguna de maduración, d
$\rho_{agua}$	Densidad del agua, $kg/m^3$
$\rho_{particula}$	Densidad de la partícula, $kg/m^3$
$\mu_{agua}$	Viscosidad absoluta o dinámica del agua, $kg/m s$
$\lambda_s$	Carga superficial aplicada, $kg/ha d$
$\lambda_{smax}$	Carga superficial máxima, $kg/ha d$
$\lambda_{sr}$	Carga superficial removida, $kg/ha d$
$\lambda_v$	Carga orgánica volumétrica, $g/m^3 d$

## TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, periodo de 1992-2003.....	3
<b>Tabla 1.1</b>	Composición típica del agua residual doméstica sin tratar.....	8
<b>Tabla 1.2</b>	Calidad de las aguas residuales municipales en México.....	9
<b>Tabla 1.3</b>	Niveles de tratamiento de las aguas residuales domésticas.....	10
<b>Tabla 1.4</b>	Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas anaerobias.....	18
<b>Tabla 1.5</b>	Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas facultativas.....	19
<b>Tabla 1.6</b>	Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas de maduración.....	22
<b>Tabla 3.1</b>	Caracterización del agua cruda de alimentación.....	44
<b>Tabla 5.1</b>	SST medidos en ambas lagunas, durante la corrida 1.....	80
<b>Tabla 5.2</b>	DBO <sub>5</sub> soluble medida en ambas lagunas, durante la corrida 1.....	82
<b>Tabla 5.3</b>	DBO <sub>5</sub> total medida en ambas lagunas, durante la corrida 1.....	83
<b>Tabla 5.4</b>	Clorofilas obtenidas en ambas lagunas, durante la corrida 1.....	85
<b>Tabla 5.5</b>	pH y OD medidos en ambas lagunas, durante la corrida 1.....	87
<b>Tabla 5.6</b>	SST medidos en ambas lagunas, durante la corrida 2.....	90
<b>Tabla 5.7</b>	DBO <sub>5</sub> soluble medida en ambas lagunas, durante la corrida 2.....	91
<b>Tabla 5.8</b>	DBO <sub>5</sub> total medida en ambas lagunas, durante la corrida 2.....	92
<b>Tabla 5.9</b>	Clorofilas obtenidas en ambas lagunas, durante la corrida 2.....	94
<b>Tabla 5.10</b>	Temperatura ambiental y del sistema, durante ambas corridas.....	97
<b>Tabla 5.11</b>	Radiación solar presente en ambas corridas.....	98
<b>Tabla 5.12</b>	Precipitación pluvial durante ambas corridas.....	100
<b>Tabla 5.13</b>	pH y OD medidos en ambas lagunas, durante la corrida 2.....	102
<b>Tabla 5.14</b>	pH, temperatura y OD medidos en la laguna con mamparas, durante el monitoreo de 24 horas.....	105
<b>Tabla 5.15</b>	pH, temperatura y OD medidos en la laguna control, durante el monitoreo de 24 horas.....	107
<b>Tabla 5.16</b>	Muestra las correlaciones de Spearman entre el conjunto de variables.....	119

## FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Distribución de los principales sistemas de tratamiento en México, según el número de plantas.....	2
<b>Figura 1.1</b>	Composición de las aguas residuales domésticas.....	7
<b>Figura 1.2</b>	Clasificación de los sólidos presentes en las aguas residuales domésticas de concentración media.....	9
<b>Figura 1.3</b>	Plantas de tratamiento por proceso.....	12
<b>Figura 1.4</b>	Patrones ideales de flujo hidráulico.....	23
<b>Figura 2.1</b>	Variación diaria de oxígeno disuelto y pH.....	32
<b>Figura 3.1</b>	Movimientos de las algas presentes en las lagunas de estabilización.....	38
<b>Figura 3.2</b>	Arreglos utilizados en la laguna A.....	39
<b>Figura 3.3</b>	Mamparas utilizadas durante el estudio.....	40
<b>Figura 3.4</b>	Canal de entrada de agua cruda, PTAR "Solidaridad".....	41
<b>Figura 3.5</b>	Esquema del sistema utilizado.....	41
<b>Figura 3.6</b>	Iluminación del sistema utilizando una lámpara fluorescente (luz de día).....	42
<b>Figura 3.7</b>	Concentración de la iluminación por medio de una campana.....	42
<b>Figura 3.8</b>	Iluminación de manera natural, a ambos canales.....	43
<b>Figura 3.9</b>	Inóculo agregado a cada uno de los canales.....	43
<b>Figura 3.10</b>	Toma de muestra a la entrada y salida de las lagunas.....	44

<b>Figura 3.11</b>	Laguna con tres mamparas.....	45
<b>Figura 3.12</b>	Medición del pH por medio del potenciómetro.....	47
<b>Figura 3.13</b>	Medidor de oxígeno disuelto YSI 550D, para campo .....	47
<b>Figura 3.14</b>	Medición de la clorofila.....	48
<b>Figura 3.15</b>	Determinación de los SST.....	49
<b>Figura 3.16</b>	Determinación de la DBO <sub>5</sub> .....	50
<b>Figura 4.1</b>	Flujo uniforme.....	56
<b>Figura 4.2</b>	Flujo variado permanente.....	57
<b>Figura 4.3</b>	Dimensiones de una laguna de estabilización.....	59
<b>Figura 4.4</b>	Variaciones de la velocidad del agua en la sección transversal de un canal rectangular muy ancho cuando el flujo es laminar.....	59
<b>Figura 4.5</b>	Ubicación de la zona 1, en el reactor con 2 mamparas.....	61
<b>Figura 4.6</b>	Ubicación de la zona 2, dentro del reactor con 2 mamparas .....	62
<b>Figura 4.7</b>	Ubicación de la zona 3, dentro del reactor con 2 mamparas .....	62
<b>Figura 4.8</b>	Ubicación de la zona 4, dentro del reactor con 2 mamparas .....	62
<b>Figura 4.9</b>	Ubicación de la zona 5, dentro del reactor con 2 mamparas .....	63
<b>Figura 4.10</b>	Ubicación de la zona 1, en el reactor con 3 mamparas.....	64
<b>Figura 4.11</b>	Ubicación de la zona 2, dentro del reactor con 3 mamparas .....	64
<b>Figura 4.12</b>	Ubicación de la zona 3, dentro del reactor con 3 mamparas .....	65
<b>Figura 4.13</b>	Ubicación de la zona 4, dentro del reactor con 3 mamparas .....	65
<b>Figura 4.14</b>	Ubicación de la zona 5, dentro del reactor con 3 mamparas .....	65
<b>Figura 4.15</b>	Ubicación de la zona 6, dentro del reactor con 3 mamparas .....	66
<b>Figura 4.16</b>	Ubicación de la zona 7, dentro del reactor con 3 mamparas .....	66
<b>Figura 4.17</b>	Vista esquemática de la trayectoria del flotante en una cámara con mamparas sumergidas.....	72
<b>Figura 4.18</b>	Fuerzas que actúan sobre una partícula que se sedimenta en un fluido estático.....	74
<b>Figura 4.19</b>	<i>Euglena</i> típica .....	76
<b>Figura 5.1</b>	Comportamiento de los SST obtenidos durante la corrida 1, en ambas lagunas.....	81
<b>Figura 5.2</b>	Comportamiento de la DBO <sub>5</sub> soluble en ambas lagunas, durante la corrida 1.....	82
<b>Figura 5.3</b>	Comportamiento de la DBO <sub>5</sub> total en ambas lagunas, durante la corrida 1... ..	83
<b>Figura 5.4</b>	Comportamiento de la clorofila <i>a</i> en ambas lagunas, durante la corrida 1... ..	86
<b>Figura 5.5</b>	Comportamiento de la clorofila <i>b</i> en ambas lagunas, durante la corrida 1... ..	87
<b>Figura 5.6</b>	Comportamiento de la clorofila <i>c</i> en ambas lagunas, durante la corrida 1... ..	87
<b>Figura 5.7</b>	Comportamiento del oxígeno disuelto y el pH en ambas lagunas, durante la corrida 1 .....	88
<b>Figura 5.8</b>	Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna con dos mamparas.....	89
<b>Figura 5.9</b>	Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna sin mamparas.....	89
<b>Figura 5.10</b>	Comportamiento de los SST durante la corrida 2, en ambas lagunas .....	91
<b>Figura 5.11</b>	Comportamiento de la DBO <sub>5</sub> soluble en ambas lagunas, durante la corrida 2.....	92
<b>Figura 5.12</b>	Comportamiento de la DBO <sub>5</sub> total en ambas lagunas, durante la corrida 2... ..	93
<b>Figura 5.13</b>	Comportamiento de la clorofila <i>a</i> en ambas lagunas, durante la corrida 2... ..	95
<b>Figura 5.14</b>	Comportamiento de la clorofila <i>b</i> en ambas lagunas, durante la corrida 2... ..	95
<b>Figura 5.15</b>	Comportamiento de la clorofila <i>c</i> en ambas lagunas, durante la corrida 2... ..	96
<b>Figura 5.16</b>	Temperatura ambiental vs. temperatura del sistema, en ambas corridas.....	98

<b>Figura 5.17</b>	Comportamiento de la radiación solar y el potencial de hidrógeno, en ambas corridas .....	99
<b>Figura 5.18</b>	Comportamiento de la radiación solar y el oxígeno disuelto, en ambas corridas .....	99
<b>Figura 5.19</b>	Precipitación pluvial vs. radiación solar media, durante la corrida 1 .....	101
<b>Figura 5.20</b>	Precipitación pluvial vs. radiación solar media, durante la corrida 2 .....	101
<b>Figura 5.21</b>	Comportamiento del oxígeno disuelto y el pH en ambas lagunas, durante la corrida 2 .....	102
<b>Figura 5.22</b>	Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna con 3 mamparas .....	103
<b>Figura 5.23</b>	Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna sin mamparas.....	103
<b>Figura 5.24</b>	Comportamiento del pH a la entrada y salida de ambas lagunas .....	107
<b>Figura 5.25</b>	Comportamiento de la temperatura a la entrada y salida de ambas lagunas	108
<b>Figura 5.26</b>	Comportamiento del oxígeno disuelto a la entrada y salida de ambas lagunas.....	108
<b>Figura 5.27</b>	Comparación entre el pH y el oxígeno disuelto en la laguna con mamparas.	109
<b>Figura 5.28</b>	Comparación entre el pH y el oxígeno disuelto en la laguna control.....	110
<b>Figura 5.29</b>	Comparación entre la temperatura y el oxígeno disuelto, en la laguna con 2 mamparas.....	110
<b>Figura 5.30</b>	Comparación entre la temperatura y el oxígeno disuelto, en la laguna control.....	111
<b>Figura 5.31</b>	Comparación entre los SST a la salida, en ambas corridas.....	114
<b>Figura 5.32</b>	Comparación entre la DBO <sub>5</sub> soluble a la salida, en ambas corridas.....	114
<b>Figura 5.33</b>	Comparación entre la DBO <sub>5</sub> total a la salida, en ambas corridas .....	115
<b>Figura 5.34</b>	Comparación entre la clorofila <i>a</i> a la salida, en ambas corridas .....	115
<b>Figura 5.35</b>	Comparación entre la clorofila <i>b</i> a la salida, en ambas corridas.....	116
<b>Figura 5.36</b>	Comparación entre la clorofila <i>c</i> a la salida, en ambas corridas .....	116
<b>Figura 5.37</b>	Correlaciones no multivariadas entre el conjunto de variables.....	118

## RESUMEN

En México el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de agua residual municipal es muy importante. Uno de los problemas que presenta este proceso de tratamiento se debe a la gran cantidad de nutrientes que suele contener el efluente, lo cual provoca que la DBO<sub>5</sub> y los sólidos suspendidos excedan los límites máximos permitidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, y que favorezcan el aumento de la carga orgánica de los ríos y lagos donde se lleva a cabo la descarga, incrementando su tasa de eutrofización.

La instalación de mamparas ha sido propuesta por varios investigadores como una forma de mejorar las características hidráulicas de las lagunas, buscando romper el flujo estratificado, aminorar las zonas muertas y reducir los cortocircuitos, incrementando el tiempo de retención real. En estos trabajos se reporta que en las lagunas de estabilización equipadas con mamparas se efectúa un mejor tratamiento que aquellas sin las mismas. En la bibliografía consultada no se encontró información que indique su utilización para la remoción de algas, sino solamente de objetos flotantes.

En este documento se presenta la utilización de estructuras hidráulicas (mamparas sumergidas) en lagunas de estabilización para establecer si el uso de las mismas es determinante para lograr la remoción de algas en el efluente. Se efectuó un estudio experimental a nivel laboratorio utilizando dos canales rectangulares de iguales dimensiones (1.8 x 0.3 x 0.6 m, largo x ancho x profundidad) instalados a temperatura ambiente, y se llevaron al cabo dos corridas:

1. Dos mamparas en una laguna y la otra sin mamparas (control 1).
2. Tres mamparas en una laguna y la otra sin mamparas (control 2).

De los resultados obtenidos en las dos corridas se determinó que, las lagunas acondicionadas con mamparas alcanzaron mejores remociones que aquellas carentes de las mismas. Durante ambas corridas en las lagunas con mamparas se alcanzaron remociones del 50% en los SST, cercanas al 50% en la DBO<sub>5</sub> soluble y total; y superiores al 60% para la clorofila *a*, *b* y *c*.

Se efectuó la evaluación estadística de los datos, ya que ambas corridas se realizaron en tiempos diferentes y para llevar a cabo una comparación entre ellas es necesaria la existencia de igualdad en los datos a la entrada. Los resultados indican igualdad de los parámetros de entrada de las lagunas en las corridas 1 y 2, así como la igualdad de las entradas en ambos controles (lagunas sin mamparas). Sin embargo, al tratar de comparar los resultados entre las lagunas acondicionadas con mamparas se observó que no son estadísticamente iguales, por lo que no fue posible determinar cual de ambas modificaciones es la más apropiada para alcanzar las mayores remociones de algas en términos de DBO, sólidos suspendidos y clorofila.

## ABSTRACT

In Mexico the use of stabilization ponds (SP) for the treatment of municipal residual water is very important. One of the problems that this treatment process presents is due to high concentrations of BOD<sub>5</sub> and of suspended solids in the effluent, which usually exceed the maximum limits allowed by the NOM-001-SEMARNAT-1996, favoring the increment of the organic load of rivers and lakes where the discharge is carried out, increasing the eutrofication rate.

The installation of baffles has been proposed by several researchers as a form of improving the hydraulic characteristics of the ponds, aiming to break the stratified flow, to reduce the dead areas as well as the short circuits by increasing the retention real time. It is reported that in the stabilization ponds equipped with baffles a better treatment is obtained that on those without them. They have been used for the removal of floating objects; however, they have not been considered as structures that favor the algae removal.

The use of hydraulic structures (vertical submerged baffles) in SP is presented to find out if their use favors the removal of algae in the effluent. An experimental study was made, at laboratory level, using two rectangular channels of same dimensions (1.8 x 0.3 x 0.6 m; length, wide, depth) installed at ambient temperature.

In this work we analyze three channels: the first one without baffles to be used as control; the second one with two baffles; and a third one with three submerged baffles.

The results indicate that the ponds with baffles presented better removal efficiencies that the one without them. The channels with baffles reached 50% TSS removals; for soluble and total BOD<sub>5</sub> the removals were about 50%; and greater than 60% for chlorophyll *a*, *b* and *c*.

---

## INTRODUCCIÓN

---

En materia de saneamiento, el Gobierno Federal a través de la Comisión Nacional del Agua, considera el tratamiento de las aguas residuales como un aspecto fundamental para evitar la contaminación de los cuerpos receptores de aguas nacionales.

A la fecha existen una multitud de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, las cuales se desarrollan y surgen otras innovadoras con este propósito.

Los métodos y tecnologías básicos de tratamiento pueden dividirse en dos grandes grupos: los de tecnología sencilla o apropiada y los de alta tecnología o tecnología sofisticada (Moeller, 2000). Sin embargo, el denominarse sencillos no implica un concepto de baja eficiencia, pero sí que dichos sistemas de tratamiento tengan consumos bajos de energía y utilicen tecnologías sencillas, tanto en las fases constructivas como en las operativas; además de que sean sistemas basados en transformaciones naturales, por ejemplo, las lagunas de estabilización; así como algunos sistemas de infiltración en suelos o bien, el uso de sistemas acuáticos y vegetales en los denominados humedales (wetlands).

El concepto de alta tecnología representa lo opuesto en el sentido de que los sistemas de tratamiento son complicados en sus procesos constructivos, equipos y controles y por ello en sus costos totales. Existen varias clases de conceptos de alta tecnología, basados en esquemas mecánicos y biológicos, esquemas mecánicos y químicos y esquemas mecánicos, biológicos y químicos. Usualmente este tipo de sistemas requieren operadores altamente capacitados; además de que sus gastos de construcción y operación son altos<sup>31</sup>.

Una de las soluciones que puede ayudar a resolver la problemática de las aguas residuales es el tratamiento biológico de las mismas, siendo las lagunas de estabilización una de las posibilidades más eficaces y económicas<sup>25</sup>, si las condiciones lo permiten.

### LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización son cuerpos de agua creados artificialmente, diseñados para el tratamiento de aguas residuales mediante la acción de una masa biológica en suspensión, constituida por algas, bacterias, protozoarios, etc. con la intervención de otros procesos y factores naturales (reaeración, sedimentación, desorción, adsorción, transformaciones químicas, dinámica del flujo y factores meteorológicos)<sup>30</sup>.

De acuerdo con Moeller (2000), son el método más económico para tratar aguas residuales en donde los costos de terreno sean bajos. El sistema es relativamente simple, no requiere de operadores especializados en comparación con otros sistemas, y la calidad del efluente producido es lo suficientemente alta para permitir su uso para varios fines, por lo que se consideran una tecnología apropiada y robusta, acorde con el concepto de *desarrollo sustentable* que es entendido como "aquel que no degrada el medio ambiente, es económicamente viable, técnicamente apropiado y socialmente aceptado".

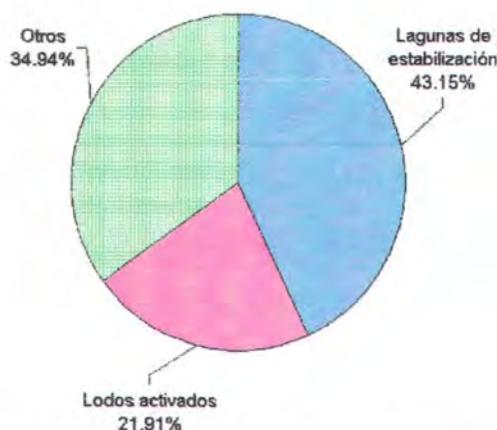
El tratamiento a través de lagunas tiene tres objetivos<sup>39</sup>:

- Remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación.
- Eliminar los microorganismos patógenos que representan un grave peligro para la salud.
- Utilizar su efluente para reutilización, con otras finalidades.

Se han diseñado y desarrollado con éxito diferentes tipos de sistemas lagunares, ya que conforme avanza la comprensión y conocimiento de los fenómenos que suceden en éstos, se obtienen efluentes de calidad apropiada para satisfacer diferentes propósitos. Estos sistemas son adecuados para el tratamiento de aguas residuales municipales, de desechos industriales, para el tratamiento de lodos o como sistemas para pulimento de efluentes, entre otros<sup>30</sup>.

### LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN MÉXICO<sup>9</sup>

La infraestructura existente a nivel nacional, para el tratamiento de las aguas residuales municipales reportada a diciembre de 2003 es de 1,360 plantas, con un gasto de diseño de 89,585 l/s. Sin embargo, sólo funcionan 1,182, tratando únicamente 60,243 l/s (CNA, 2003).



**Figura 1.** Distribución de los principales sistemas de tratamiento en México, según el número de plantas.

Fuente: CNA, 2003

Las plantas de tratamiento municipales utilizan diversos procesos, siendo uno de los más usados las lagunas de estabilización. Durante el año 2003 se encontraban en operación 510 lagunas (42.8%) distribuidas en todo el territorio nacional; de estas, 150 presentaron problemas de funcionamiento, mantenimiento, operación o sobrecarga hidráulica.

La mayor cantidad de sistemas lagunares se encuentra localizado en los estados de Aguascalientes, Durango, Sonora, Chihuahua, Nayarit, Jalisco, Tlaxcala, Colima, Estado de México y Nuevo León.

Año	Total		En operación			Fuera de operación	
	No. de plantas	Q <sub>instalado</sub> (l/s)	No. de plantas	Q <sub>instalado</sub> (l/s)	Q <sub>tratado</sub> (l/s)	No. de plantas	Q <sub>instalado</sub> (l/s)
1992	546	N/D	394	N/D	30,554	152	N/D
1993	650	N/D	454	N/D	30,726	196	N/D
1994	666	42,788	461	N/D	32,065	205	N/D
1995	680	54,638	469	48,172	32,905	211	6,466
1996	793	54,765	595	51,696	33,745	198	3,069
1997	821	61,653	639	57,402	39,389	182	4,251
1998	914	63,151	727	58,560	40,855	187	4,591
1999	1,000	67,547	777	61,559	42,397	223	5,988
2000	1,018	75,952	793	68,970	45,927	225	6,982
2001	1,132	80,622	938	73,853	50,810	194	6,770
2002	1,242	85,043	1,077	79,735	56,148	165	5,308
2003	1,360	89,585	1,182	84,331	60,243	178	5,254

**Tabla 1** Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, periodo de 1992-2003

Fuente: CNA, 2004

### PROBLEMAS MÁS FRECUENTEMENTE ENCONTRADOS

Los problemas que comúnmente se han encontrado en los sistemas lagunares son: falta de mantenimiento de las instalaciones, sobrecarga o deficiente operación de los sistemas debido a la falta de operadores adecuadamente capacitados, pocas o nulas actividades de monitoreo de la calidad de los efluentes, acumulación de materia flotante, crecimiento de malezas acuáticas, problemas por una DBO alta en el efluente; así como problemas debido a un elevado crecimiento de algas verde-azules, entre otros.

### PROBLEMAS GENERADOS POR LAS ALGAS

Las algas pueden presentar serios problemas en las aguas superficiales, ya que al presentarse condiciones favorables pueden reproducirse rápidamente. Este fenómeno es conocido como crecimiento explosivo, floraciones algáceas o "bloom algal" y puede conducir a que las lagunas se encuentren cubiertas por grandes colonias flotantes de algas.

Debido a que el efluente de las plantas de tratamiento del agua residual suele ser rico en nutrientes biológicos, la descarga del efluente en un cuerpo receptor provoca su enriquecimiento y aumenta su tasa de eutroficación.

La *eutroficación* es uno de los problemas de calidad del agua más significativos y de alcance mundial. Es un proceso natural de enriquecimiento de nutrientes que se lleva a cabo en un cuerpo de agua. El crecimiento biológico resultante, principalmente de algas, muere en el epilimnio y se sedimenta al pasar al hipolimnio, en donde se descompone y agota el oxígeno del agua.

Existen diversas razones por las cuales es deseable la eliminación de las algas de los sistemas, por ejemplo, (1) las estéticas; (2) las sanitarias, ya que al morir se depositan en el fondo, donde se descomponen en condiciones anaerobias y provocan la acumulación de sedimentos, ocasionando azolve; (3) si existe una gran cantidad de nutrientes, las algas comienzan a proliferar en forma anormal, cubriendo la superficie e impidiendo el paso de la luz y la oxigenación al cuerpo de agua, pudiendo provocar eutroficación; (4) son difíciles de eliminar de los estanques de oxidación, ya que tienden a escapar con el efluente; (5) pueden provocar que la DBO<sub>5</sub> y los sólidos en suspensión del efluente excedan los límites permitidos de descarga; además de que (6) pueden provocar un mal olor en el agua.

En México las lagunas de estabilización constituyen una forma muy popular para el tratamiento del agua residual debido a su bajo costo de inversión (excepto por lo que se refiere al requerimiento del terreno), a los bajos costos de operación y a su habilidad para asimilar cargas orgánicas o hidráulicas fluctuantes. Considerando que gran parte de sus efluentes es descargado en cuerpos de agua receptores, ya sea un río o un lago, y que, debido a la alta presencia de algas en dichos efluentes se pueden exceder los límites máximos permitidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, se plantearon los siguientes:

#### **OBJETIVOS:**

- **Implementar cambios en el flujo hidráulico dentro de las lagunas por medio de mamparas verticales sumergidas, con el fin de lograr una disminución en las algas presentes en el efluente.**
- **Determinar si al realizar el cambio estructural se logra la remoción antes mencionada.**

Es importante que se respeten ante todo las características hidráulicas del sistema, ya que es conocido que el flujo dentro de la laguna debe ser de tipo laminar. Además, de que las remociones sean significativas respecto a los controles, debido al costo que representa la instalación de nuevas estructuras.

El trabajo se encuentra dividido en seis capítulos. En el primero se muestran conceptos fundamentales para el entendimiento de los términos utilizados en el tratamiento del agua residual, por medio de lagunas de estabilización.

En el capítulo II se muestran algunos problemas que se presentan en las lagunas de estabilización, pese a ser consideradas de simple operación; así como las formas más comunes de solución ante tales situaciones. Además, se presenta la ventaja en la utilización de las mamparas sumergidas respecto a otros sistemas, para la remoción de algas.

En el capítulo III se muestra la metodología utilizada en este estudio, el cual se realizó en la Planta piloto de tratamiento de agua residual del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), localizado en el municipio de Jiutepec, Morelos. Así como los parámetros de calidad monitoreados y las técnicas utilizadas durante la toma de muestras, en ambas corridas.

Como en muchos problemas prácticos que requieren experimentación se hace necesario diseñarlo en forma tal que la variabilidad de los datos provenientes de fuentes extrañas pueda ser controlada adecuadamente, presentándose además la propuesta del modelo experimental mediante el uso de bloques completamente al azar (BCA). Esta estrategia de diseño permite incrementar la precisión en las comparaciones entre tratamientos o niveles de un factor, permitiendo a la vez separar la variación entre los bloques del error aleatorio asociado a la realización del experimento, a través del modelo lineal correspondiente.

El interés primordial para analizar los datos obtenidos en el experimento es el de emplear un procedimiento estadístico de mayor confiabilidad que permita probar la igualdad de las medias para todos los tratamientos.

Es importante conocer la influencia de la turbulencia debido a la utilización de las 2 ó 3 mamparas, dentro de las lagunas, por lo que ésta se analiza en el capítulo IV. Además, se presenta el cálculo del distanciamiento entre las mamparas; así como las posibles remociones a obtenerse de acuerdo con las dimensiones de los reactores, ya que estos se encontraban ya construidos cuando se realizó el experimento, adaptándose las condiciones a tales dimensiones.

Con la finalidad de conocer las variaciones en el pH, el oxígeno disuelto y la temperatura como resultado del proceso de fotosíntesis de las algas en la laguna, se realizó un monitoreo durante 24 horas, mismo que se presenta en el Capítulo V. Así como los resultados en las remociones obtenidas durante ambas corridas, al tiempo cero y transcurridos 7 días (TRH), para todos los parámetros medidos, comparaciones entre ellas; además de las observaciones al microscopio llevadas a cabo para determinar las algas presentes en el sistema.

Aunado a lo anterior, el Capítulo V presenta los resultados obtenidos en las pruebas experimentales mediante el uso de BCA, así como de los softwares estadísticos JMP, versión 3.2.1, edición estudiantil y Minitab, versión 13.1, para windows.

Al final del trabajo se presentan las conclusiones y recomendaciones que se consideran pertinentes para enriquecer y mejorar el contenido del mismo.

## CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

---

### I.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

#### I.1.1 DEFINICIÓN

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de que su calidad ha sido modificada por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, siendo recogidas por la red de alcantarillado<sup>39</sup>.

#### I.1.2 FUENTES DE AGUAS RESIDUALES

De acuerdo con Rolim (2000), las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua, que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas. Así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual.

Así, según su origen, las aguas pueden ser clasificadas como<sup>39</sup>:

- **DOMÉSTICAS:** Aquellas aguas utilizadas con fines higiénicos (sanitarios, cocinas, lavado de ropa, etc.). Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de las descargas de las instalaciones hidráulicas de la edificación y también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.

- **INDUSTRIALES:** Son residuos líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria.
- **INFILTRACIÓN Y CAUDAL ADICIONALES:** Las fugas no visibles se infiltran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, las paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza.
- **PLUVIALES:** Son agua de lluvia, que descargan grandes cantidades sobre el suelo. Parte de estas aguas es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos, sobre el suelo.

### I.1.3 CONCENTRACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

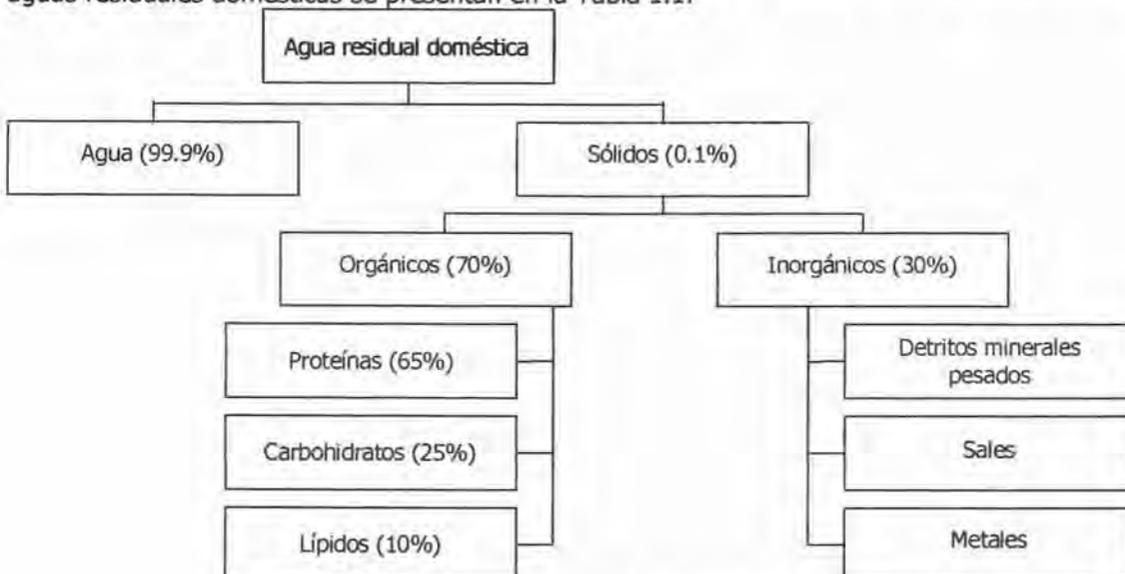
Debido a la gran variedad de sustancias presentes en la mayoría de las aguas residuales es totalmente impracticable determinarlas en forma individual. Por esta razón se utiliza el concepto de *materia orgánica*, que es indicativo de la cantidad de todas las sustancias orgánicas presentes en un agua residual.

Para cuantificar la concentración de la materia orgánica, en la ingeniería sanitaria se utilizan ampliamente las pruebas de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de DQO (demanda química de oxígeno). En general, estos dos indicadores se expresan en mg/l<sup>39</sup>.

## I.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Las aguas residuales domésticas están constituidas en un elevado porcentaje (en peso) por agua, cerca de 99.9% y apenas 0.1% de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos. Sin embargo, esta pequeña fracción de sólidos es la que presenta los mayores problemas en el tratamiento y su disposición. El agua es apenas el medio de transporte de los sólidos. La Figura 1.1 presenta la composición general de las aguas residuales domésticas.

De acuerdo con Metcalf y Eddy (1996), los datos típicos de los constituyentes encontrados en las aguas residuales domésticas se presentan en la Tabla 1.1.



**Figura 1.1** Composición de las aguas residuales domésticas

Fuente: Rolim (2000)

Componente	Unidad	Concentración		
		Fuerte	Media	Diluida
Sólidos totales	mg/l	1200	720	350
Disueltos totales	mg/l	850	500	250
Fijos	mg/l	525	300	145
volátiles	mg/l	325	200	105
Suspendidos totales	mg/l	350	220	100
Fijos	mg/l	75	55	20
volátiles	mg/l	275	165	80
Sólidos sedimentables	ml/l	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO <sub>5</sub>	mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total, COT	mg/l	290	160	80
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	1000	500	250
Nitrógeno total	mg/l	85	40	20
Orgánico	mg/l	35	15	8
Amoniacal	mg/l	50	25	12
Fósforo total	mg/l	15	8	4
Orgánico	mg/l	5	3	1
Inorgánico	mg/l	10	5	3
Alcalinidad en CaCO <sub>3</sub>	mg/l	200	100	50
Aceites y grasas	mg/l	150	100	50

**Tabla 1.1** Composición típica del agua residual doméstica sin tratar  
Fuente: Metcalf y Eddy (1996)

El IMTA realizó una revisión general de los resultados obtenidos en 7 proyectos de evaluación e investigación para 21 diferentes ciudades distribuidas en el norte, centro y sur del país e incluyen periodos de estiaje y de lluvias. Con ello se elaboró una lista que muestra la calidad de las aguas residuales municipales en México (Tabla 1.2)<sup>18</sup>.

El agua residual doméstica, de concentración media, tiene una distribución aproximada de sólidos acorde con la Figura 1.2.

La mayor parte de la *materia orgánica* consiste en residuos alimenticios, heces, materia vegetal, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos.

La *materia inorgánica* presente en las aguas residuales está formada principalmente de arena y sustancias minerales disueltas.

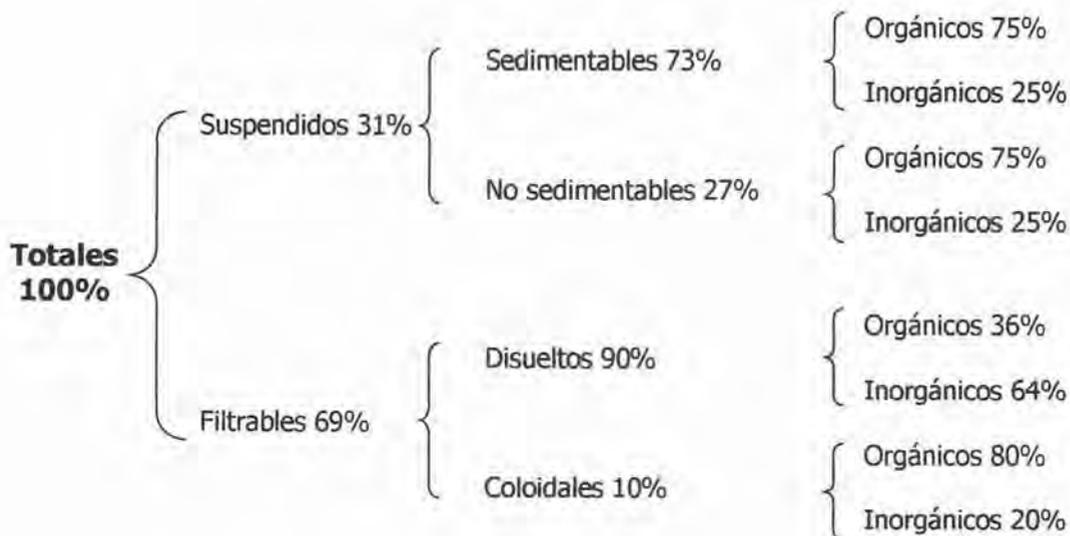
El agua residual contiene también pequeñas concentraciones de gases disueltos. Entre ellos, el más importante es el oxígeno proveniente del aire que eventualmente entra en contacto con la superficie del agua residual en movimiento.

Además del oxígeno, el agua residual puede contener otros gases, como el dióxido de carbono, resultante de la descomposición de materia orgánica; nitrógeno disuelto de la atmósfera; sulfuro de hidrógeno formado por la descomposición de compuestos orgánicos; gas amoniacal y ciertas sustancias inorgánicas del azufre. Esos gases, aunque en pequeñas cantidades, se relacionan con la descomposición y el tratamiento de los componentes degradables del agua residual<sup>39</sup>.

Parámetro	Unidad	Concentración
Sólidos Totales	mg/l	700 – 800
Totales suspendidos	mg/l	450 – 500
Totales disueltos	mg/l	700 – 800
Totales volátiles	mg/l	400 – 500
Suspendidos volátiles	mg/l	160 – 170
Volátiles disueltos	mg/l	300 – 400
Fijos suspendidos	mg/l	90 – 100
Fijos disueltos	mg/l	350 – 450
Sólidos sedimentables	ml/l	8 – 9
DBO total	mg/l	250 – 270
DQO total	mg/l	500 – 530
Nitrógeno total	mg/l	38 – 42
Orgánico	mg/l	14 – 18
Amoniacal	mg/l	23 – 26
Fosfatos totales	mg/l	15 – 20
pH		6.5 – 7.5
Temperatura	°C	20 – 22
SAAM – Detergentes –	mg/l	12 – 16
Coliformes totales	NMP/100 ml	$100 \times 10^7$ – $100 \times 10^8$

**Tabla 1.2** Calidad de las aguas residuales municipales en México  
Fuente: SGP CNA - IMTA (1997)

Para la elaboración de esta lista se consideran aguas residuales municipales a las aguas residuales provenientes de poblaciones que no tengan un porcentaje mayor del 20% de aguas residuales de origen industrial.



**Figura 1.2** Clasificación de los sólidos presentes en las aguas residuales domésticas de concentración media

Fuente: Adaptado de Metcalf y Eddy (1996)

### I.3 PRINCIPALES ETAPAS DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

El grado y la eficiencia del tratamiento necesarios dependen del cuerpo receptor, de la legislación ambiental, de las características del uso del agua, de las características de las aguas abajo del punto de vertimiento, de la capacidad de autodepuración y dilución en el cuerpo de agua, y de las consecuencias del vertimiento de las aguas residuales.

Existen muchas alternativas para tratar las aguas residuales de una ciudad, ya sea mediante procesos biológicos o físico-químicos. Sin embargo, actualmente casi todas las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas se conciben con base en procesos biológicos.

Las principales etapas en el proceso del tratamiento de las aguas residuales domésticas son el tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario<sup>39</sup>.

El **tratamiento preliminar** incluye la remoción de sólidos suspendidos gruesos y sólidos suspendidos fijos. La remoción de los sólidos gruesos se lleva a cabo por medio de rejillas de barras. Los sólidos suspendidos fijos, de menores dimensiones, son removidos por medio de desarenadores.

El **tratamiento primario** tiene por objeto la remoción de los sólidos sedimentables y parte de la materia orgánica. Puede incluir la sedimentación o flotación de partículas suspendidas.

El **tratamiento secundario** se destina a la degradación biológica de los compuestos carbonáceos. Cuando se lleva a cabo esta degradación, ocurre naturalmente la descomposición de carbohidratos, aceites, grasas y proteínas a compuestos más simples, como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc., dependiendo del tipo de proceso predominante. Por otro lado, las bacterias que efectúan el tratamiento se reproducen y su masa total aumenta en función de la cantidad de materia degradada, es decir, con el tratamiento hay disminución de la materia orgánica y hay producción de lodo.

El **tratamiento terciario o tratamiento avanzado** tiene por objetivo principal la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo), pero también la remoción de compuestos tóxicos y contaminantes específicos; así como la desinfección. Normalmente es utilizado cuando se requiere un efluente final con elevado grado de pulimento, con valores muy pequeños de DBO y de sólidos suspendidos. La Tabla 1.3 muestra los diversos niveles de tratamiento de aguas residuales.

Nivel	Remoción
Preliminar	Sólidos suspendidos gruesos y arena
Primario	Sólidos suspendidos sedimentables DBO suspendida (materia orgánica componente de los sólidos suspendidos sedimentables)
Secundario	DBO suspendida (materia orgánica suspendida fina, no removida en el tratamiento primario) DBO soluble (materia orgánica en forma de sólidos disueltos)
Terciario	Nutrientes Organismos patógenos Compuestos no biodegradables Metales pesados Sólidos inorgánicos disueltos Sólidos suspendidos remanentes

**Tabla 1.3** Niveles de tratamiento de las aguas residuales domésticas  
*Fuente:* Rolim (2000)

Una planta convencional de tratamiento de aguas residuales es aquella que combina procesos físicos y biológicos para remover la materia orgánica<sup>39</sup>.

Actualmente en países de clima tropical, los métodos de tratamiento de aguas residuales más usados son<sup>4</sup>:

- Lagunas de estabilización
- Lagunas aireadas mecánicamente
- Reactor anaerobio, generalmente reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
- Zanjales de oxidación
- Humedales

De los métodos antes citados, actualmente las *lagunas de estabilización* son el proceso más económico y eficaz que existe, y su principal ventaja consiste en ser el más eficiente para la reducción de microorganismos patógenos y huevos de nemátodos intestinales<sup>39</sup>.

## I.4 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### I.4.1 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización reciben este nombre por ser sistemas de tratamiento en donde se transforman varios tipos de contaminantes en sustancias estabilizadas, es decir, menos peligrosas. Son reactores biológicos, en este caso estanques, por los que se hace pasar agua residual con el objeto de estabilizar contaminantes y obtener un agua de mejor calidad.

Los microorganismos de las lagunas van tomando la materia orgánica para satisfacer sus necesidades de energía para moverse, reproducirse y desarrollarse; y para obtener los componentes que conforman su estructura (pared celular, material genético, etc.)<sup>38</sup>.

Los tres tipos de condiciones biológicas que ocurren en las lagunas de estabilización son (1) condiciones aerobias, (2) condiciones anaerobias y (3) condiciones facultativas, es decir, combinación de ambas<sup>48</sup>.

#### I.4.1.1 GENERALIDADES

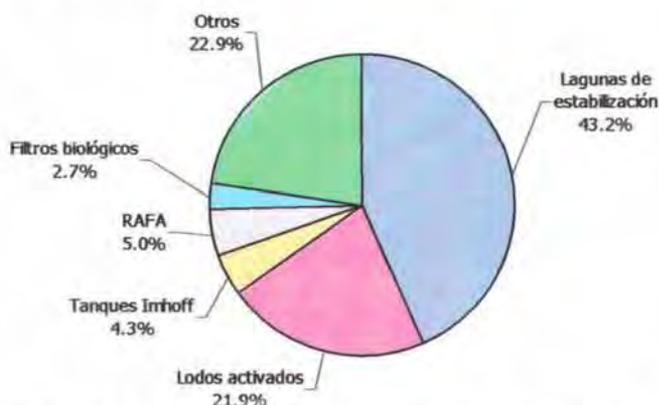
Citado en Rivas (1998), acorde con la OPS (1988) estos son los únicos sistemas de tratamiento que no requieren desinfección química, ya que la remoción de patógenos se realiza por mecanismos naturales. Adicionalmente, en las lagunas de estabilización se remueve nitrógeno y fósforo, lo que significaría un tratamiento complementario en otros sistemas<sup>38</sup>.

Un sistema de lodos activados, bien diseñado y operado, alcanza una remoción de coliformes fecales de 99%, lo cual representa una reducción de  $10^8$  CF/100 ml a  $10^6$  CF/100 ml. Una serie de lagunas de estabilización facultativas y de maduración puede reducir el número de coliformes fecales de  $10^8$  CF/100 ml a un valor menor de  $10^3$  CF/100 ml, lo cual representa una remoción de 99.999% ó 5 unidades  $\log_{10}$  (Mijaylova, 1996).

Aparentemente, la primera laguna de estabilización para tratar aguas residuales domésticas fue construida en Dakota del Norte, EE.UU., en 1948. En 1962 existían, en Estados Unidos, 1647 lagunas de estabilización para aguas residuales domésticas y 827 para aguas residuales industriales; para 1992, el número de plantas de lagunas de estabilización en EE.UU. es superior a 5000 (Romero, 1998).

En América Latina y el Caribe se empezaron a usar en 1958 para el tratamiento de aguas residuales, teniéndose mucho más éxito que con las plantas convencionales. Se considera que a 1993 existían más de 3,000 lagunas de estabilización en América Latina y el Caribe. Su uso se popularizó y la gran mayoría de las lagunas continúan operando (León, 1995).

Los procesos que más se utilizan en las plantas de tratamiento municipales corresponden a las lagunas de estabilización en 510 plantas (43.2%), lodos activados en 259 plantas (21.9%), tanques Imhoff (4.3%) en 51 plantas, reactores anaerobios de flujo ascendente (5.0%) en 59 plantas y filtros biológicos (2.7%) en 32 plantas, que en su conjunto representan casi el 80% del total.



**Figura 1.3** Plantas de tratamiento por proceso

Fuente: CNA, 2003

#### I.4.1.2 TIPOS DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

En general, las lagunas de estabilización pueden clasificarse en cuatro tipos: anaerobias, facultativas, de maduración y estrictamente anaerobias o de alta tasa<sup>39</sup>.

##### I.4.1.2.1 LAGUNAS ANAEROBIAS

Las lagunas **anaerobias** se utilizan normalmente como primera fase en el tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales con alto contenido en materia orgánica biodegradable. El objetivo primordial de estas lagunas es la reducción de contenido en sólidos y materia orgánica del agua residual, y no la obtención de un efluente de alta calidad. Por esta razón, las lagunas anaerobias operan en serie con lagunas facultativas y de maduración<sup>23</sup>.

Generalmente se utiliza un sistema compuesto por al menos una laguna de cada tipo en serie, para asegurar que el efluente final de la planta depuradora va a poseer una calidad adecuada durante todo el año<sup>23</sup>. Tienen profundidades más grandes que las de las otras lagunas, con variación de tres a cinco metros<sup>39</sup>.

El tiempo de tratamiento dependerá de la climatología (precipitaciones y temperatura) y de las condiciones de descarga, pero éste irá de los 7 a los 20 días. Estas lagunas trabajan bien en climas cálidos; un buen diseño deberá asegurar la remoción de alrededor del 60% de la DBO a 20°C y un máximo de 75% a 25°C<sup>24</sup>.

### I.4.1.2.2 LAGUNAS FACULTATIVAS

Las lagunas **facultativas** tienen por objetivo obtener un efluente de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica, y una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias coliformes<sup>23</sup>. Son el tipo más usado. Funcionan a través de la acción de las algas y las bacterias, con la influencia de la luz solar y la fotosíntesis<sup>39</sup>.

La degradación de la materia orgánica en estas lagunas tiene lugar fundamentalmente por la actividad metabólica de bacterias heterótrofas facultativas (que pueden desarrollarse tanto en presencia como en ausencia de oxígeno disuelto), aunque su velocidad de crecimiento, y por tanto la velocidad de depuración, es mayor en condiciones aerobias. Las dos fuentes de oxígeno en lagunas facultativas son la actividad fotosintética de las algas y la reaireación a través de la superficie<sup>20</sup>.

Sus profundidades varían de 1.5 a 2.5 metros. En las lagunas facultativas primarias la profundidad mínima debe ser igual a 1.5 metros; mientras que las lagunas facultativas secundarias no deben tener profundidades inferiores a 1.2 metros<sup>39</sup>.

#### I.4.1.2.2.1 FUNCIÓN DEL PLANCTON EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN FACULTATIVAS

Las algas tienen un papel sumamente importante en el proceso biológico de las lagunas de estabilización, pues son los organismos responsables de la producción de oxígeno molecular, elemento vital para las bacterias que participan en la oxidación bioquímica de la materia orgánica.

La presencia de las algas en niveles adecuados asegura el funcionamiento de la fase aerobia de las lagunas, cuando se pierde el equilibrio ecológico se corre el riesgo de producir el predominio de la fase anaerobia, que trae como consecuencia una reducción de la eficiencia del sistema<sup>27</sup>.

### I.4.1.2.3 LAGUNAS DE MADURACIÓN

Las lagunas **de maduración** se destinan a la depuración del efluente de las lagunas facultativas con el objeto principal de eliminar los sólidos suspendidos y nutrientes (nitrógeno y fósforo) e inactivar patógenos<sup>35</sup>. Tienen profundidades menores que las lagunas facultativas, variando de 1 a 1.5 metros<sup>35,40</sup>. El tiempo de retención es de 7 a 10 días con profundidades del líquido de un metro<sup>24</sup>.

En estas lagunas solo existe una zona aerobia, la cual tiene la función de remover los microorganismos patógenos, lo que ocurre por sedimentación de algunas bacterias o por su muerte, ocasionada por los rayos ultravioletas del sol<sup>35</sup>.

La secuencia más habitual es la de una laguna anaerobia seguida por una facultativa y al final, la laguna de maduración. Si bien, hay distintas variaciones sobre este esquema general, y muy a menudo se instala más de una laguna de maduración. A veces se construyen lagunas de maduración como etapa final del tratamiento de otros sistemas de depuración, como lodos activados, con lo que sustituyen a la cloración, que suele ser el método más común de desinfección en estos sistemas<sup>23</sup>.

### I.4.1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización vistas como un proceso completo de tratamiento ofrecen muchas ventajas, siempre y cuando exista disponibilidad de terreno, su costo no sea excesivo y que las lagunas puedan localizarse lejos de áreas residenciales, comerciales y recreativas.

Las principales **VENTAJAS** de los sistemas de lagunas de estabilización son:

- Es un proceso sencillo que no requiere de personal altamente capacitado para su operación y mantenimiento<sup>21</sup>
- Tiene los menores costo de capital, construcción, operación y mantenimiento que cualquier otro proceso de tratamiento<sup>21</sup>
- No requiere equipo de alto costo; así como de poca energía eléctrica<sup>21,39</sup>
- Este proceso de tratamiento entrega efluentes de calidad igual o superior a algunos procesos convencionales de tratamiento<sup>21</sup>
- Es posible manejar variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas mediante este proceso<sup>21, 39</sup>
- Fácil adaptación a variaciones estacionales<sup>39</sup>
- Elevada estabilización de la materia orgánica<sup>39</sup>
- Excelente reducción de microorganismos patógenos<sup>39</sup>

Sus principales **DESVENTAJAS** son:

- Este proceso puede emitir olores desagradables<sup>12,21</sup>
- Requieren de una gran extensión de terreno<sup>12, 21, 39</sup>
- Pueden causar impactos negativos sobre las aguas subterráneas si no se impermeabilizan o si el recubrimiento se daña<sup>12, 21</sup>
- Pueden entregar un efluente con gran cantidad de sólidos suspendidos y DBO<sup>12, 21</sup>
- Requieren ubicarse lejos de la población<sup>21</sup>

### I.4.2 PROCESO AEROBIO

En los estanques aerobios fotosintéticos, el oxígeno se suministra por aireación natural a través de la superficie y por fotosíntesis de las algas. Con excepción de la población de algas, la comunidad biológica presente en los estanques de estabilización es similar a la existente en los sistemas de lodos activados.

El oxígeno liberado por las algas en el proceso de fotosíntesis es utilizado por las bacterias en la degradación aerobia de la materia orgánica. Los nutrientes y el dióxido de carbono liberados en este proceso de degradación los emplean, a su vez, las algas. También se presentan animales superiores como los rotíferos y protozoos, cuya principal función consiste en la mejora del efluente<sup>35</sup>.

El grupo específico de algas, animales o especies bacterianas presentes en cualquier zona de un estanque aerobio depende de factores tales como la carga orgánica, el grado de mezclado del estanque, el pH, los nutrientes, la luz solar y la temperatura.

En los estanques aerobios, la eficacia de la eliminación de la DBO<sub>5</sub> es alta, situándose por encima del 95%. Sin embargo, es necesario recordar que, aun cuando se haya conseguido eliminar la DBO soluble del agua residual a tratar, el alto contenido en algas y bacterias del efluente del estanque puede ejercer valores de la DBO<sub>5</sub> superiores a los del agua afluente<sup>35</sup>.

### **I.4.3 PROCESO ANAEROBIO**

Los estanques anaerobios se usan para el tratamiento de agua residual de alto contenido orgánico que también contenga una alta concentración de sólidos.

Generalmente, un estanque anaerobio es un estanque profundo excavado en el terreno, dotado de un sistema de conducciones de entrada y de salida adecuados. Para conservar la energía calorífica y mantener las condiciones anaerobias, se han construido estanques de profundidades de hasta 9.1 metros. Los residuos a tratar en el estanque sedimentan en el fondo del mismo, y el efluente parcialmente clarificado se vierte, normalmente, a otro proceso posterior.

Generalmente, estos estanques son anaerobios en toda su profundidad, excepto en una estrecha franja cercana a la superficie. La estabilización se consigue por medio de una combinación de precipitación y de conversión anaerobia de los residuos orgánicos en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , otros productos gaseosos finales, ácidos orgánicos y tejido celular. Normalmente, es fácil conseguir, de forma continua, rendimientos de eliminación de la  $\text{DBO}_5$  superiores al 70%. En condiciones óptimas de funcionamiento, es posible conseguir eficiencias de eliminación de hasta el 85%<sup>35</sup>.

### **I.4.4 MODELOS Y CRITERIOS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN**

Los modelos utilizados para el dimensionamiento de las lagunas de estabilización pueden clasificarse en empíricos y racionales<sup>39</sup>.

Los modelos empíricos se basan en la observación de algunas características físicas y operacionales de lagunas que funcionan adecuadamente y presentan buenos índices de eficiencia. Sin embargo, no se establecen relaciones entre sus características funcionales y los factores que intervienen en el proceso de depuración. Los modelos empíricos tienen una aplicación limitada, pues se obtienen exclusivamente a partir de la observación experimental. Su gran ventaja es que son sencillos y no necesitan parámetros difíciles de obtener<sup>39</sup>.

La principal característica de un modelo racional es que sigue una teoría racional sobre el funcionamiento de las lagunas. En la práctica, se utilizan lagunas piloto o ensayos de laboratorio para determinar los parámetros que intervienen en los procesos característicos de cada una. Esos parámetros están relacionados con los resultados de operación, donde se desarrollan expresiones o correlaciones matemáticas que describen el fenómeno y permiten reproducirlo en condiciones controladas. Normalmente, uno de los factores que interviene en el desarrollo de los modelos racionales es la temperatura de la masa líquida<sup>39</sup>.

Existe una gran variedad de ecuaciones y criterios de diseño para el dimensionamiento de las lagunas de estabilización. Sólo se presentarán los criterios que se consideran más importantes.

#### **I.4.4.1 LAGUNAS ANAEROBIAS**

A pesar del gran número de investigaciones sobre lagunas anaerobias, hay notables discrepancias en relación con los coeficientes de las ecuaciones y con los criterios de diseño, debido al alto número de variables existentes en el proceso y a la falta de uniformidad de las evaluaciones realizadas. Actualmente el diseño por carga volumétrica es el más confiable<sup>7</sup>. En la Tabla 1.4 se resumen estas ecuaciones y criterios para las lagunas anaerobias.

#### I.4.4.2 LAGUNAS FACULTATIVAS

Los modelos cinéticos basados en la hidráulica del flujo pistón ideal y en la mezcla completa o combinación de regímenes de flujo y tasa de reacción de primer orden con o sin las relaciones de la cinética enzimática de Michaelis-Menten se han propuesto por varios autores para describir el funcionamiento de las lagunas facultativas. Estos modelos se modifican frecuentemente para reflejar la influencia de la temperatura incorporando la ecuación de Arrhenius a la ecuación básica. Las discrepancias actuales se derivan de la falta de investigación en la interrelación entre algunos procesos físicos (*p.e.* submodelos hidráulicos para el desecho y la biomasa), con otros de orden bioquímico (*p.e.* cinéticas de reacción)<sup>35</sup>. En la Tabla 1.5 se presenta un resumen de estos criterios para lagunas facultativas.

#### I.4.4.3 LAGUNAS DE MADURACIÓN

Para las lagunas de maduración existen dos ecuaciones de diseño: el de mezcla completa y el de flujo disperso<sup>35</sup>.

El modelo de flujo disperso se desarrolla a partir de un balance de masa, alrededor de un reactor con flujo laminar tipo pistón, en el cual existen dos mecanismos de transporte: la convectiva en la dirección del flujo y la dispersión molecular axial. La solución a este balance fue resuelta por Wehner y Wilhelm y traída a la ingeniería sanitaria por Thirimurthy. La restricción a este modelo es que asume que tanto la masa como el líquido tienen el mismo comportamiento con relación al submodelo hidráulico, lo cual es cierto para el líquido pero no para la biomasa<sup>35</sup>.

Los patrones de flujo hidráulico asumidos han sido los de mezcla completa, flujo pistón y flujo disperso. Mientras que los dos primeros describen las condiciones de flujo ideal, el último describe las condiciones de flujo no ideal. Además de Thirimurthy otros autores como Uhlmann *et al.*, (1983); Polprasert y Bhattarai (1985); Marecos do Monte y Mara (1987) son de la opinión de que el modelo de flujo disperso es el que mejor describe el régimen hidráulico en una laguna de estabilización. Sin embargo, el principal problema en el uso de este modelo es la dificultad en determinar el número de dispersión ( $d'$ ), cuya precisión invariablemente afecta al modelo<sup>35</sup>.

En lagunas, la dispersión se determina mediante el uso de trazadores tal como fue sugerido por Levenspiel (1962). De acuerdo con Polprasert y Bhattarai (1985) y Mara y Pearson (1986) estos estudios son tediosos, requieren de mucho tiempo y son caros, aunado a que los valores de  $d'$  obtenidos no pueden ser usados para el diseño de nuevas lagunas<sup>35</sup>.

Para resolver este problema, algunos investigadores han tratado de obtener ecuaciones predictivas basadas en la geometría y las propiedades hidráulicas de la laguna (Polprasert y Bhattarai, 1985; Ferrara y Harleman, 1981; Arceivala, 1981; Yáñez, 1988; Sáenz, 1992). Sin embargo, los valores de  $d'$  encontrados experimentalmente difieren de los obtenidos por las ecuaciones predictivas<sup>35</sup>.

Esta disparidad se debe a los efectos de algunos factores que no fueron considerados en el modelo. Estos factores son zonas muertas, relación largo/ancho, viento, naturaleza de las paredes de la laguna, número de Reynolds, tiempo entre la inyección del trazador y el comienzo del muestreo, forma de la laguna, velocidad del flujo, cortocircuitos, dispositivos de entrada y de salida, tasa de inyección del trazador y el coeficiente de mezclado transversal<sup>35</sup>. En la Tabla 1.6 se resumen estas ecuaciones para lagunas de maduración.

Los fenómenos que ocurren en los estanques son complejos y el tratamiento es afectado por las reacciones bioquímicas de la simbiosis algas-bacterias y las características del flujo hidráulico. Para ser precisos en el diseño y obtener resultados confiables, el diseño debe basarse en las reacciones respectivas y en los procesos que ocurren en éstas. La ecuación de **mezcla parcial o de flujo disperso** se propuso para ser utilizada en el diseño de los estanques para las reducciones de DBO, porque las características de flujo en estos reactores no es ni de mezcla completa ni de flujo pistón. Esta ecuación incluye (1) el valor de  $d$  que representa las características de dispersión del estanque y otros fenómenos hidráulicos, (2) el tiempo de retención hidráulico (TRH) en la laguna y (3) el porcentaje de reducción de DBO.

La fórmula de predicción de la dispersión desarrollada por Polprasert (1985) para ser utilizada en el diseño de una laguna, relaciona el factor de dispersión con la forma de la laguna (L, W y Z), el TRH y la viscosidad cinemática del agua del estanque. Para una razón particular de L/W, el valor de  $d$  de la laguna puede calcularse con dicha ecuación (sin necesidad de realizar estudios de trazado) para utilizarse en la ecuación de modelo de flujo arbitrario desarrollada por Wehner y Wilhelm (1958) con el fin de predecir el funcionamiento de la laguna. El diseño de las lagunas utilizadas se muestra en el Capítulo IV.

## LAGUNAS ANAEROBIAS

### MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO

#### Método sudafricano

El método sudafricano citado por Gloyna (1971) presenta una ecuación empírica para la estimación del efluente de una laguna anaerobia:

$$L_e = \frac{L_i}{K_{an} \left( \frac{L_e}{L_i} \right)^n \theta + 1}$$

$$\theta = \left( \frac{L_i}{L_e} - 1 \right) \left[ \frac{1}{K_{an} \left( \frac{L_e}{L_i} \right)^n} \right]$$

#### Método basado en el periodo de detención

Área de las lagunas anaerobias:

$$A_{an} = \frac{Q_{med} \theta}{h}$$

El área superficial no es importante para las lagunas anaerobias, pero sí la profundidad. Por tanto, se dimensionan en función de la carga orgánica volumétrica.

Las experiencias en muchos países del mundo han mostrado que el procedimiento más seguro y confiable para el diseño de las lagunas anaerobias está basado en la carga volumétrica de la DBO, la cual se obtiene mediante las siguientes ecuaciones:

(Meiring, 1968; Mara y Pearson, 1986)

$$\lambda_v = \frac{L_i Q}{V_a}$$

$$\lambda_v = \frac{L_i}{\theta}$$

#### Correlaciones de Kawai (1981)

Aunque se reportan altos coeficientes de correlación (0.98) para eficiencias del 60 al 70%, éstas no se obtienen en la práctica:

$$\lambda_{sr} = -14.4555 + 0.6876 \lambda_s$$

$$\lambda_{sr} = -86.0971 + 0.6543 \lambda_s + 3.3985 \theta$$

$$\lambda_{sr} = -265.0576 + 0.7491 \lambda_s + 23.5258 \theta$$

#### Correlación de Saidam y Al Salem (1988)

a) Para lagunas anaerobias primarias

Válida para concentraciones de DBO<sub>5</sub> del influente entre 629 y 826 mg/l, temperatura del agua entre 14.4 y 27°C, carga volumétrica de 0.091 a 0.153 kg/m<sup>3</sup>d y TRH de 4 a 7 días.

$$L_e = -1326 + 7.4 T + 3961 \lambda_v - 68 \theta$$

b) Para lagunas anaerobias secundarias

Válida para concentraciones de DBO<sub>5</sub> del influente entre 213 y 440 mg/l, temperatura del agua entre 13.8 y 27.5°C, carga volumétrica de 0.029 a 0.078 kg/m<sup>3</sup>d y TRH de 4.7 a 8 días.

$$L_e = -138 + 0.35 T + 3494 \lambda_v + 32 \theta$$

**Tabla 1.4** Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas anaerobias

Fuentes: Pearson (1994) y Rolim (2000)

## LAGUNAS FACULTATIVAS

## MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO

## Modelo empírico de Gloyna (1976)

Considera correlaciones de toxicidad por algas y sulfuros para carga superficial. La profundidad deberá ser 1 m. La profundidad adicional de 0.5 m está prevista para el almacenamiento de lodos. El factor de toxicidad algal  $f$  puede asumirse igual a 1.0 para las aguas residuales domésticas y muchas aguas residuales industriales (p.e. industria azucarera). La demanda de oxígeno para sulfuros ( $f'$ ) es también igual a 1.0 para concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  menores a 500 mg/l.

Volumen de la laguna facultativa:

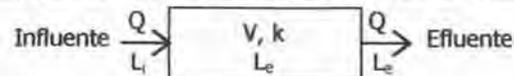
$$\theta = 3.5 \times 10^{-5} L_u \times 1.085^{35-T} f f'$$

$$\lambda_s = 285.7 Z \times 1.085^{35-T} f f'$$

## Modelo de mezcla completa y cinética de primer orden

En el modelo de mezcla completa se supone que las partículas del fluido influente son dispersadas instantáneamente a través de todo el volumen del reactor y que no existen gradientes de concentración dentro del sistema; por lo tanto, la concentración del efluente del reactor es la misma concentración de cualquier punto en el reactor.

El balance de materiales, para la figura siguiente, permite deducir la ecuación de diseño.



$$Q L_i - K L_e = Q L_e$$

$$L_i - K L_e \theta = L_e$$

$$L_e = \frac{L_i}{1 + K \theta}$$

La selección de  $K$ , para diseño, constituye una de las preguntas más difíciles de resolver; la constante de remoción de DBO es función de la temperatura y puede calcularse según:

a) Marais (1966)

$$K_T = 1.2 (1.085)^{T-35}$$

b) Mara (1976)

$$K_T = 0.3 (1.05)^{T-20}$$

c) Gloyna (1973)

$$K_T = 0.17 \text{ d}^{-1}$$

d) Tchobanoglous (1985)

$$K_T = 0.20 \text{ a } 0.40 \text{ d}^{-1}$$

e) Marais y Meiring (1976)

$$L_e = \frac{600}{2Z + 8}$$

**Tabla 1.5** Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas facultativas

Fuentes: Pearson (1994), Romero (1998) y Rolim (2000)

## LAGUNAS FACULTATIVAS

## MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO

## Modelo de flujo arbitrario

En 1958 Wehner y Wilhelm desarrollaron una ecuación para reactor en flujo no ideal (flujo con dispersión entre flujo pistón y flujo en mezcla completa), dispersión axial, tasa de remoción de sustrato de primer orden y condiciones arbitrarias de entrada y salida, la cual fue traída a la ingeniería sanitaria por Thirimurthy (1969). Las restricciones a este modelo son: se asume que tanto la biomasa como el líquido tienen el mismo comportamiento en relación con el submodelo hidráulico. El orden de magnitud  $K$  es de 0.17 a 0.20 para lagunas facultativas y de 0.13 a 0.16 para lagunas de maduración (Chiang y Gloyna, 1970).

$$\frac{L_e}{L_i} = \frac{4 a e^{1/2 d}}{\left[ (1+a)^2 \right] e^{a/2 d} - \left[ (1-a)^2 \right] e^{-a/2 d}}$$

$$a = \sqrt{1 + 4 k \theta d}$$

El valor del número de dispersión de flujo puede expresarse:

$$d = \frac{D \theta}{L^2}$$

En la ecuación anterior conforme aumenta  $L$ , acercándose al infinito (flujo tipo pistón),  $d$  tiende a cero. Por otra parte, para las condiciones de mezcla completa, en las cuales  $L$  tiende a cero,  $d$  se convierte en infinito.

El valor de  $d$ , con base en las propiedades geométricas de la laguna, puede calcularse según Polprasert (1985):

$$d = \frac{0.184 [\theta v (W + 2 Z)]^{0.489} W^{1.511}}{(L Z)^{1.489}}$$

En la aplicación de este modelo la selección de  $K$  es una de las incógnitas más difíciles de resolver. Para diseño de lagunas de estabilización para aguas residuales domésticas, Thirimurthy (1969) propone la relación:

$$K = 0.15 (1.072)^{T-20}$$

## Modelo de flujo pistón

En el modelo de flujo pistón, con cinética de remoción de primer orden se tiene:

$$L_e = L_i e^{-K \theta}$$

Para DBO, la constante de reacción de primer orden, flujo pistón, se puede calcular:

$$K_T = K_{20} (1.09)^{T-20}$$

El valor de  $K_{20}$  en flujo pistón se puede obtener de:

$\lambda s$ , kg DBO/had	$K_{20}$ , $d^{-1}$
22	0.045
45	0.071
67	0.083
90	0.096
112	0.129

**Tabla 1.5** Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas facultativas (continuación)

Fuentes: Pearson (1994), Romero (1998) y Rolim (2000)

## LAGUNAS FACULTATIVAS

## MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO

## Método basado en la carga superficial

Las lagunas de estabilización facultativas se han diseñado con base en cargas orgánicas superficiales que la experiencia ha demostrado son aceptables para este tipo de estanques. Obviamente, dichas cargas son muy variables dependiendo del área geográfica, de la temperatura, de la profundidad del agua, de la concentración de sólidos sedimentables y demás características de influencia en el proceso.

## a) McGarry y Pescod (1970)

Representa la máxima carga que puede aplicarse a una laguna facultativa antes de que decaiga, es decir, de que se convierta en anaerobia.

$$\lambda_{smax} = 60.3 (1.0993)^T$$

## b) Gloyna (1973)

Presenta una ecuación para la estimación de la carga superficial máxima que puede soportar una laguna facultativa.

$$\lambda_{smax} = 357.4 (1.085)^{T-20}$$

## c) Mara (1976)

Aplica un factor de seguridad de aproximadamente 1.5 a la ecuación de McGarry y Pescod y recomienda para diseño de lagunas facultativas la expresión:

$$\lambda_{smax} = 20 T - 120$$

## d) Yáñez (1980)

Formula las siguientes correlaciones de diseño para lagunas facultativas de estabilización.

$$\lambda_{smax} = 357 (1.085)^{T-20}$$

Para lagunas primarias, con cargas de 200 a 1,158 kg DBO/ha d, obtuvo:

$$\lambda_{sr} = 7.67 + 0.8063 \lambda_s$$

Para lagunas secundarias, con cargas de 40 a 210 kg DBO/ha d, obtuvo:

$$\lambda_{sr} = -0.8 + 0.765 \lambda_s$$

## e) Arthur (1983)

Recomienda la siguiente relación de diseño para lagunas facultativas.

$$\lambda_{smax} = 20 T - 60$$

## f) IMTA (1994)

La siguiente ecuación representa la más aplicable a las condiciones de México, que puede usarse como valor de diseño.

$$\lambda_{smax} = 250 (1.085)^{T-20}$$

**Tabla 1.5** Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas facultativas (continuación)

Fuentes: Pearson (1994), Romero (1998) y Rolim (2000)

## LAGUNAS DE MADURACIÓN

## MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO

## Modelo de mezcla completa

Supone mezcla completa para el submodelo hidráulico, lo cual produce distorsiones cuando se diseñan lagunas en serie. En este tipo de arreglo hay que evitar la aplicación de lagunas de igual tamaño. Es un error mantener la segunda laguna (facultativa) de igual tamaño que la anaerobia, sin cuidar que se den las condiciones de carga facultativa, lo que produce un acarreo de la carga anaerobia a través del sistema.

- a) Una sola laguna

$$N_e = \frac{N_i}{1 + K_T \theta}$$

- b) Lagunas en serie

$$N_e = \frac{N_i}{(1 + K_T \theta_a)(1 + K_T \theta_f)(1 + K_T \theta_m)^n}$$

## Estimación del coeficiente de velocidad de remoción de coliformes fecales

- a) Slanetz y Marais (1970)

$$K_T = 2.6 (1.19)^{T-20}$$

- b) Arceivala (1981)

$$K_T = 1.2 (1.19)^{T-20}$$

- c) Sáenz (1992)

$$K_T = 0.623 (1.04)^{T-20}$$

- d) IMTA (1992)

$$K_T = 20.84 (1.07)^{T-20}$$

- e) Yáñez (1993)

$$K_T = 1.1 (1.07)^{T-20}$$

## Modelo de flujo disperso (Yáñez, 1993)

Se estima el número de dispersión mediante la siguiente ecuación, adoptando un valor para la relación largo/ancho (L/W).

$$d = \frac{L/W}{-0.26118 + 0.25392(L/W) + 1.01368(L/W)^2}$$

Se calcula el coeficiente de reducción bacteriana  $K_T$  mediante la ecuación propuesta por el mismo.

Se estima el coeficiente adimensional  $a$ , después de haber definido el tiempo de retención de la laguna de maduración.

$$a = \sqrt{1 + 4K_b \theta d}$$

Estimando la cantidad de coliformes fecales (NMP CF/100 ml) que salen de la laguna de maduración:

$$\frac{N_e}{N_i} = \frac{4 a e^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2}$$

**Tabla 1.6** Ecuaciones y criterios de diseño para lagunas de maduración

Fuentes: Romero (1998) y Rolim (2000)

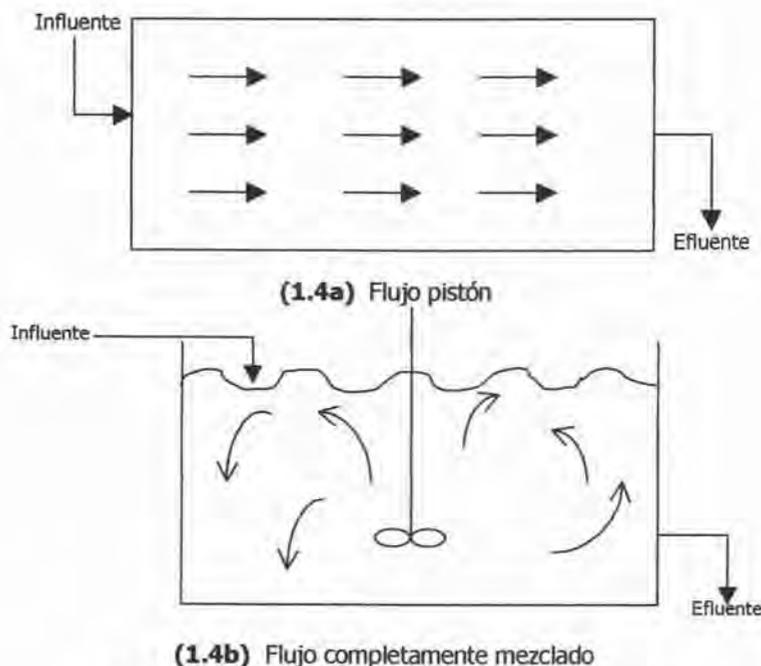
### I.4.5 PATRONES DE CAUDAL Y MEZCLA EN LAS LAGUNAS

Todos los tanques o lagunas usadas para el tratamiento de aguas residuales pueden denominarse reactores. Sus patrones de caudal dependen de las condiciones de mezcla, las cuales dependen de la forma del reactor, de la energía de entrada por unidad de volumen, de la dimensión o escala de la unidad de tratamiento, además de otros factores. Los patrones de caudal afectan el tiempo de exposición para el tratamiento y distribución del sustrato en el reactor<sup>39</sup>.

Los patrones típicos de caudal y mezcla incluyen los reactores discontinuos y los reactores con caudal continuo. Los reactores con caudal continuo pueden clasificarse en<sup>39</sup>:

- Flujo pistón
  - Mezcla completa
  - Flujo disperso
  - Combinaciones en serie o en paralelo de los anteriores reactores
- (a) **FLUJO PISTÓN.** Es aquel en el cual todo elemento de caudal deja el reactor en el mismo orden en que entró. No existe dispersión o mezcla. Todo elemento del caudal es expuesto al tratamiento en el mismo periodo, llamado tiempo teórico de retención (Figura 1.4a).
- (b) **MEZCLA COMPLETA.** Es aquella en la cual todos los elementos del caudal son mezclados en forma instantánea y alta en el reactor, de modo que su contenido sea perfectamente homogéneo en todos los puntos de ese reactor. En consecuencia, la concentración del efluente es igual a la concentración del reactor (Figura 1.4b).
- (c) **FLUJO DISPERSO.** Es aquel en el que cada elemento del caudal tiene un tiempo de detención diferente para cada periodo. También es llamado flujo arbitrario y está comprendido entre dos límites, el flujo pistón y la mezcla completa<sup>39</sup>.

Una laguna de estabilización se encuentra obviamente lejos de un fluido ideal. En una situación de estancamiento o de zonas muertas, cortocircuito y dispersión, ocurrirá un fluido no ideal caracterizado por la canalización y el reciclado<sup>48</sup>.



**Figura 1.4** Patrones ideales de flujo hidráulico  
Fuente: Watters *et al.*, (1973)

### I.4.5.1 DESVIACIONES DEL COMPORTAMIENTO IDEAL

La hidrodinámica de los procesos es afectada por cortocircuitos hidráulicos y la intensidad de mezclado, lo que llega a producir un volumen no activo dentro del sistema denominado zona muerta.

#### I.4.5.1.1 ZONAS MUERTAS

Representan el volumen del líquido que no se renueva constantemente en una unidad de tratamiento que trabaja en continuo; pueden ser originadas por problemas en el diseño, agitación insuficiente o por la acumulación de lodos<sup>32</sup>.

##### I.4.5.1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ZONAS MUERTAS

Es posible suponer la existencia de dos tipos de zonas muertas dentro de un sistema: aquellas ocasionadas por canalizaciones o cortocircuitos hidráulicos y las provocadas por fluido "estancado". Las primeras se denominarán **zonas muertas hidráulicas** y las segundas **zonas muertas biológicas**. Las zonas muertas biológicas podrían clasificarse bajo un concepto más amplio, es decir, dentro de zonas muertas debidas al flujo estancado (zonas muertas estancadas).

Un cortocircuito hidráulico implica la generación de zonas muertas. Algunas de ellas pueden ser físicamente identificadas en un experimento de trazado con colorante (zonas con fluido estancado). Sin embargo, existen otras que no lo son. Las zonas muertas con agua estancada se encuentran en los huecos de material poroso, en esquinas de tanques y/o intersticios de la biopelícula donde las corrientes del fluido no pueden penetrar<sup>32</sup>.

#### I.4.5.1.2 CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos son el volumen de líquido que sigue caminos preferenciales y sale del reactor sin mezclarse completamente con tiempos de residencia más cortos que los requeridos en la unidad. La ocurrencia de cortocircuitos en las lagunas es la causa de varios problemas, como la aparición de zonas muertas o estancadas que reducen el volumen efectivo y el área superficial de la laguna, con la posibilidad de problemas de olor en las áreas sobrecargadas. La reducción de la eficiencia de la laguna es una consecuencia inevitable.

#### I.4.5.1.3 MEZCLA

La distribución de las aguas residuales en una laguna debe ser lo más uniforme posible, para que pueda utilizarse todo el volumen de la laguna proyectada para el tratamiento, obteniendo así el tiempo de retención ideal. De esta manera será posible evitar la formación de cortocircuitos o corrientes preferenciales y zonas muertas o regiones en donde las aguas quedan quietas.

En las grandes lagunas, principalmente en las facultativas, pueden instalarse cortinas o mamparas plásticas, con el fin de obtener un mejor tratamiento, dirigiendo el flujo del agua afluente cuidadosamente a través de la laguna y aumentando, en consecuencia, la utilización del área del espejo de agua; además de impedir o prevenir cualquier tendencia a la estratificación<sup>39</sup>.

## I.5 BIOLOGÍA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

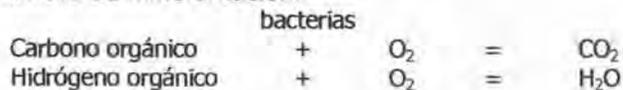
Las lagunas facultativas son llamadas así porque tienen una capa aerobia superficial, una zona facultativa intermedia y una capa anaerobia en el fondo<sup>39</sup>.

Las bacterias llevan a cabo la biodegradación de la materia orgánica que viene en el influente, lo que es transformado en agua, dióxido de carbono y aumento de biomasa. El dióxido de carbono y los nutrientes disueltos son utilizados por las algas en su proceso metabólico, proceso que se caracteriza por la producción de oxígeno, elemento vital para la biomasa bacteriana<sup>25</sup>.

La *biomasa microalgal* corresponde a materia orgánica que ha sido fotosintetizada en la laguna de estabilización, la que debido a su baja sedimentabilidad salen en el efluente y por tanto, se manifiestan como carga orgánica en éste, distorsionando los reales niveles de depuración que alcanzan las lagunas de estabilización como consecuencia de la actividad bacteriana, por lo que es importante diferenciar la fracción correspondiente de estas en los parámetros de control que informan de la eficiencia del sistema<sup>25</sup>.

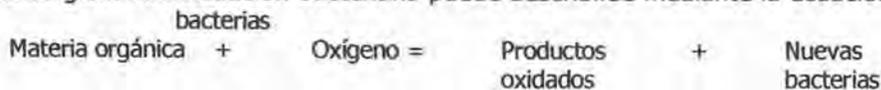
En las lagunas facultativas es posible encontrar desde microorganismos anaerobios estrictos en el sedimento del fondo, hasta aerobios estrictos en la zona inmediatamente adyacente a la superficie. Sin embargo, los seres vivos más adaptados al medio serán los microorganismos facultativos.

Desde el punto de vista de la depuración, las bacterias se pueden describir como pequeños reactores bioquímicos, capaces de autorregularse. La oxidación biológica es la conversión bacteriana de los compuestos orgánicos hasta compuestos inorgánicos oxidados, proceso que se conoce con el nombre de mineralización.

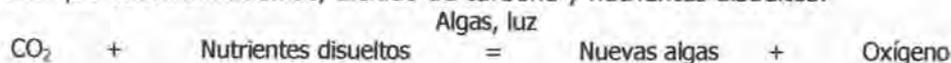


Las bacterias oxidan los productos de desecho para conseguir la energía y materias primas necesarias para la síntesis de las moléculas complejas de las que están formadas (proteínas y polisacáridos, etc.).

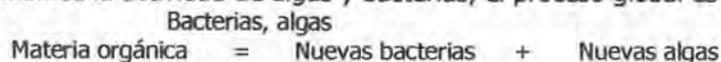
El proceso global de oxidación bacteriana puede describirse mediante la ecuación siguiente:



Por su parte, las algas sintetizan la materia orgánica de la que están constituidas en presencia de luz, para lo que necesitan además, dióxido de carbono y nutrientes disueltos:



De esta forma, si combinamos la actividad de algas y bacterias, el proceso global es el siguiente:



En conjunto se obtiene una estabilización de la materia orgánica, que se traduce en fuertes descensos de la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno del agua a su paso por las lagunas facultativas<sup>25</sup>.

## I.5.1 ALGAS

### I.5.1.1 CONCEPTO

Las algas son consideradas como una categoría ecológica compuesta en su mayoría por organismos fotosintéticos, productores de oxígeno, con un nivel de organización bajo (unicelulares o coloniales, en algunos casos como las rodofitas o feofitas con tejidos), generalmente acuícolas, usualmente con estructuras de perennación sencillas y que pueden distribuirse ampliamente.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Sanitaria cabe destacar los siguientes aspectos de las algas:

1. Su utilización en los sistemas de depuración no es tanto por su capacidad de depurar sino como fuente de oxígeno en los sistemas extensivos.
2. Al ser autótrofas su presencia en un sistema de depuración no disminuye el contenido de materia orgánica, sino que lo aumenta pues la sintetizan a partir de las fuentes minerales de carbono existentes.

Las algas unicelulares, en particular, reaccionan rápidamente a los cambios en el medio ambiente. Los factores de crecimiento son: la iluminación (luz incidente y atenuación de la luz en el agua), la temperatura y las condiciones de los nutrientes<sup>7</sup>.

Las algas de agua dulce, que son las que realmente interesan desde el punto de vista de la autopurificación del agua, muy especialmente las de lagunas de oxidación, son microscópicas. Las algas contienen fundamentalmente clorofila, necesaria para la actividad fotosintética, y por esta misma propiedad no pueden vivir o multiplicarse sino hasta aquellas profundidades donde penetra la luz solar, en la cual la turbiedad del agua desempeña una función fundamental<sup>46</sup>.

Las microalgas presentes en las lagunas de estabilización son un conjunto de plantas criptogámicas pertenecientes al grupo *Tallophyta*, son unicelulares y se multiplican por escisión celular, en su forma típica, las microalgas contienen un núcleo, uno o más cloroplastos y otras estructuras menos definidas suspendidas en un citoplasma semisólido o fluido, además se constituyen por una agrupación de organismos de una gran diversidad de tamaños, que utilizan la radiación solar y fijan el CO<sub>2</sub> y el nitrógeno del aire, y al poseer clorofila, convierten el carbono inorgánico en carbono orgánico, lo que las convierte en productores primarios.

### I.5.1.2 TIPOS DE ALGAS

Muchas microalgas se desplazan libremente por el agua. Otras, en cambio, permanecen más o menos adheridas entre sí (y/o sustratos), formando colonias micro o macroscópicas.

En las lagunas se encuentran algas móviles, dotadas de flagelos que les permiten desplazarse, e inmóviles, que dependen de las corrientes internas del estanque para moverse de una zona a otra. Las algas móviles presentan ventajas con respecto a las inmóviles, en especial en relación con su adaptabilidad a los medios turbios generados por la misma presencia de algas, puesto que pueden emigrar a profundidades con un adecuado nivel de iluminación<sup>35</sup>.

### I.5.1.3 FAMILIAS

Las algas a menudo tienen pigmentos de colores que las catalogan en diversas familias, entre las cuales cabe mencionar:

- **Clorofíceas**, que como su nombre lo indica, son de color verde. Entre ellas se encuentran los géneros *Eudorina*, *Pandorina* y *Volvox*. Entre estas clorofíceas hay especies unicelulares y multicelulares. En grandes concentraciones, algunas de ellas originan olores ícticos (de pescado) o de pasto al agua y toma coloración verdosa.
- **Cianofíceas**. Se presentan especies monocelulares o multicelulares. Son algas azul-verdosas. Algunas de ellas comunican al agua olores muy desagradables y se desarrollan con tal abundancia que cubren los embalses con una nata, siendo características de ellas el género *Anabaena*.
- **Bacilariofíceas o diatomeas**. Generalmente se presentan como monomoleculares, y con menor frecuencia formando colonias. Son de color amarillo verdoso y a menudo comunican olores aromáticos o ícticos. Son típicos los géneros *Asterionella*, *Navícula*, *Synedra* y *Fragilaria*<sup>46</sup>.

Diferentes factores intervienen en la sucesión de algas; si los nutrientes requeridos no están disponibles y el pH es elevado, el sistema tiende a precipitar los elementos minerales y da lugar a la aparición de la flora mixta. Las poblaciones de algas pueden disminuir rápidamente a medida que el zooplancton aumenta<sup>24</sup>.

### I.5.1.4 BIOMASA DE LAS ALGAS

La cuantificación de la biomasa de las algas presentes en las lagunas de estabilización se estima por medio de métodos indirectos, que incluyen peso húmedo y seco de los microorganismos en un volumen conocido de muestra, o por métodos directos como la enumeración directa de los microorganismos y la extracción y cuantificación de la concentración de clorofila *a*.

La determinación de la concentración de la clorofila *a* es el método más común en la estimación de la biomasa de las algas<sup>39</sup>.

Las diferencias en las concentraciones de clorofila *a* pueden ser atribuidas a la estratificación de las algas por efecto de la luz solar, dentro de una banda móvil en la columna de agua de la laguna. Este movimiento de la banda algal de arriba a abajo en el agua, es una respuesta de los cambios de intensidad de luz solar<sup>24</sup>. La estratificación es más intensa en las lagunas facultativas que en las de maduración<sup>39</sup>.

### I.5.1.5 GÉNEROS DE ALGAS PRESENTES EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Si se desea realizar un estudio comparativo de los géneros y especies de algas de lagunas de estabilización de diferentes regiones del mundo, deben considerarse las características de las aguas residuales de cada lugar, la intensidad de la radiación solar y las horas de luz; así como la temperatura (que cambia con la latitud), entre otros factores<sup>39</sup>.

Acorde con Palmer (1969), citado en Rolim (2000), la diversidad de algas en lagunas de estabilización está más influenciada por la concentración de la materia orgánica que por ciertas características del ambiente de la laguna, como pH, oxígeno disuelto, intensidad luminosa, temperatura, caudal y tamaño del reactor.

En las lagunas primarias facultativas predominan las algas flageladas (*Euglena*, *Pyrobotrys*, *Chlamydomonas*), en las lagunas secundarias se incrementa el número de géneros y la densidad de algas, entre las cuales predominan las algas verdes (*Chlorella*, *Scenedesmus*). En las lagunas terciarias se presenta un mayor número de géneros de algas, entre las cuales predominan las algas verdes (*Chlorella*, *Scenedesmus*, *Ankistrodesmus*, *Microactinium*). En muchos casos, se ha observado la predominancia de algas verde-azules [Rao (1980) y Uhlman (1971), citado en Rolim (2000)]. La predominancia de géneros varía según la temperatura estacional.

#### **I.5.1.6 ESTRATIFICACIÓN DE LAS ALGAS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN**

El movimiento de las algas en la columna de agua de las lagunas de estabilización y su distribución vertical, de forma estratificada, es un fenómeno conocido y observado en todo el mundo.

Los factores que controlan o regulan este desplazamiento y distribución son principalmente la carga orgánica, la temperatura y la intensidad luminosa. Esta última varía con la latitud y con las horas del día.

La estratificación de las algas en lagunas facultativas es un fenómeno diario y puede causar la aparición de altas concentraciones de algas en el efluente, lo cual aumenta también los valores de DBO<sub>5</sub>, DQO y SS.

En las lagunas de maduración o de pulimento, la estratificación no es evidente como en las lagunas facultativas, porque en ellas la distribución de las algas es más uniforme y varía muy poco durante el día<sup>39</sup>, debido a su poca profundidad.

## **CAPÍTULO II PROBLEMÁTICA**

---

Como todo sistema de tratamiento de aguas residuales, aún con su simplicidad operacional, las lagunas de estabilización pueden presentar problemas haciendo necesario ejecutar los correctivos requeridos para su solución.

En el presente capítulo se mencionan algunos de los problemas encontrados durante la operación y el mantenimiento de las mismas, así como sus posibles correcciones. Además de los problemas generados por un elevado contenido de algas y algunas formas utilizadas para removerlas.

### **II.1 PROBLEMAS EN LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN**

#### **II.1.1 PROBLEMAS DE CRECIMIENTO DE MALEZAS ACUÁTICAS**

Las malezas acuáticas pueden ser de tres tipos: sumergidas, flotantes o emergentes.

Aunque no son frecuentes las sumergidas, al presentarse constituyen un problema menor. Para eliminarlas, se debe incrementar la carga y la profundidad. En el caso de las plantas emergentes su aparición produce una excesiva proliferación de mosquitos y se eliminan de la misma forma que las sumergidas. Las más difíciles de eliminar son las flotantes, que además son las que más problemas ocasionan porque provocan una gran proliferación de mosquitos y por su crecimiento cerrado evitan que se pueda llevar a cabo la fotosíntesis, debido a que impiden la penetración de la luz. La forma de eliminarlas es manualmente o con herbicidas<sup>37</sup>.

### II.1.2 PROBLEMAS DE VEGETACIÓN EN LOS BORDOS

La vegetación en los bordos puede provocar tubificación en la laguna, pues algunas raíces al descomponerse ocasionan galerías que pueden provocar fugas de agua en la laguna; además de que estas plantas provocan mayores problemas en la tubificación de bordos y diques. El control de vegetación conlleva a un control de animales que tengan su madriguera en los bordos.

La vegetación en los bordos debe ser mantenida corta, evitando el crecimiento de arbustos y árboles. En la orilla puede ocurrir una proliferación de mosquitos, los cuales se pueden evitar eliminando la hierba de las orillas<sup>37</sup>.

### II.1.3 PROBLEMAS DE MATERIA FLOTANTE

La superficie de las lagunas facultativas debe estar libre de toda materia flotante que pueda impedir la adecuada iluminación del agua.

Los problemas más frecuentes vienen causados por la formación de costras y la presencia de papeles, plásticos, grasas y aceites que no hayan sido eliminados en el pretratamiento. Todos estos elementos deben ser retirados inmediatamente. A veces se produce la acumulación de agregados de algas en superficie, especialmente después del desarrollo de algas verde-azules en épocas calurosas. Estas acumulaciones superficiales restringen el paso de la luz y además pueden causar problemas de olores al pudrirse.

Otra posible causa de la aparición de costras en lagunas facultativas poco profundas es la flotación de parte del lodo acumulado en el fondo. Este fenómeno suele producirse cuando la temperatura es elevada y se produce un burbujeo muy activo en el lodo del fondo que lo arrastra hacia la superficie. Cualquier acumulación de materias sólidas en superficie debe eliminarse lo antes posible, pudiéndose utilizar uno de los métodos siguientes: los agregados de algas pueden romperse mediante un chorro de manguera dirigido hacia ellas desde la orilla de las lagunas, provocando así su sedimentación en el fondo de las lagunas. Si la instalación no dispone de agua corriente, se puede esperar a que el viento arrastre los agregados hacia uno de los taludes y entonces romper los agregados por medio de un rastrillo, provocando así también su sedimentación. El mismo método puede utilizarse con los lodos flotantes.

Si se dispone de una red como las utilizadas para el mantenimiento de piscinas, ésta puede utilizarse para retirar cualquiera de las materias flotantes una vez que el viento las ha arrastrado hacia la orilla de la laguna<sup>23</sup>.

### II.1.4 PROBLEMAS DE MALOS OLORES

Los problemas de olores en las lagunas anaerobias son ocasionados por las bacterias fermentativas que producen ácido a una tasa mayor que la de utilización por las bacterias metanogénicas; así mismo, por una carga orgánica insuficiente<sup>40</sup>.

Los malos olores se pueden controlar evitando llegar a 357 kg DBO/ha d de carga en las lagunas primarias. Sin embargo, si por alguna razón la carga es mayor, se debe evitar la formación de olores reciclando el efluente a la laguna primaria o provocando aereación<sup>37</sup>.

En las lagunas facultativas los malos olores se originan por la presencia de tóxicos o efluentes industriales en la alimentación, por una sobrecarga, por cortocircuitos, o bien, por una reducción en la mezcla inducida por el viento<sup>23</sup>.

La presencia de tóxicos en la alimentación provoca que las lagunas que estaban operando correctamente dejen de hacerlo súbitamente y sin razón aparente. Cuando esto ocurre, se debe efectuar un seguimiento analítico, para identificar los productos químicos causantes del problema.

La sobrecarga se detecta fácilmente por la disminución en la intensidad de la coloración verde, acompañada por un descenso en la concentración de oxígeno disuelto y el pH y la aparición de malos olores. Siempre que se producen problemas de funcionamiento en las lagunas anaerobias hay que esperar que las lagunas facultativas presenten problemas de sobrecarga. Además de esta causa, otras posibles fuentes de sobrecarga son el diseño deficiente de las canaletas de reparto, (provocando un reparto desigual de caudales), algún vertido estacional que no se tuvo en cuenta en el diseño de la planta o el diseño deficiente de la propia planta.

Los cortocircuitos pueden detectarse mediante la medida del oxígeno disuelto en varios puntos de la laguna. Las lecturas muy desiguales pueden ser indicativas de esta anomalía en el régimen de flujo. En ocasiones los caminos preferenciales pueden incluso detectarse visualmente, si se aprecian diferencias en la coloración en distintas zonas de la laguna.

La reducción en la mezcla inducida por el viento puede deberse al crecimiento de árboles o a la instalación de una valla de obra alrededor de la instalación, que bloqueen el viento en la laguna afectada<sup>23</sup>.

### II.1.5 PROBLEMAS DE INSECTOS

Los insectos que pueden representar una plaga son los mosquitos. Sus pupas y larvas, una vez que eclosionan, pueden ocasionar problemas en zonas donde es endémico el paludismo o la fiebre amarilla<sup>37</sup>. Este problema suele aparecer en primavera y verano, si se han dejado crecer plantas acuáticas o incluso plantas terrestres que han alcanzado el borde del agua<sup>23</sup>.

Para el control de mosquitos en una laguna se pueden utilizar los siguientes medios: biológico, ecológico, o bien, con un inhibidor de transferencia de oxígeno aire-agua.

El *control biológico* representa un método de control caro, sin embargo, muy efectivo por el uso de *Thiobacillus thuraxensis*, que provoca una serie de infecciones a nivel pupa a los mosquitos. Se puede utilizar en cualquier tipo de laguna.

El *control ecológico* consiste en emplear un predador que consuma las larvas de los mosquitos. Normalmente se pueden utilizar peces del género *Gambusia*, ranas de diversos tipos o salmántidos. Sin embargo, el control sólo se puede obtener en lagunas aerobias y facultativas.

Los *inhibidores de interfase* se pueden realizar en lagunas anaerobias. Con líquidos más ligeros que el agua que impiden que el oxígeno penetre al agua e impiden que respiren las larvas de los insectos.

Sin embargo, el mejor control es impedir el crecimiento de maleza en la orilla, así como inhibir la presencia de plantas acuáticas<sup>37</sup>.

### II.1.6 PROBLEMAS POR UNA DBO ALTA EN EL EFLUENTE

Cuando existe una DBO elevada en el efluente se requiere colocar mamparas para aumentar la longitud del flujo, de forma tal que disminuya la dispersión y mejore la eficiencia. Cuando la DBO es alta, y se requiere baja o con pocos sólidos suspendidos volátiles, el empleo de peces fitoplanctófagos o el uso de plantas vasculares flotantes que produzcan sombreado es útil para tener efluentes claros y de bajo contenido de sólidos. Sin embargo, el amoníaco ionizado, la dureza y el alto pH pueden hacer no factible su cultivo<sup>21</sup>.

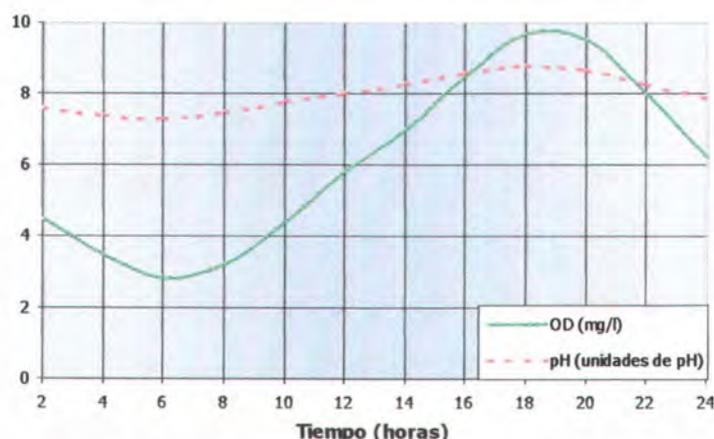
El rendimiento de las lagunas de estabilización se acostumbra evaluarlo con base en la DBO<sub>5</sub> total, en los sólidos suspendidos totales y en los coliformes fecales del efluente. La DBO<sub>5</sub> total es función de la DBO<sub>5</sub> soluble y de la concentración de sólidos suspendidos totales del efluente. En general, la DBO<sub>5</sub> que aportan los sólidos suspendidos totales excede la DBO<sub>5</sub> soluble y, por lo tanto, es importante minimizar los sólidos suspendidos totales excluyendo las algas del efluente<sup>40</sup>.

### II.1.7 PROBLEMAS DE ALGAS VERDE-AZULES

La presencia de algas verde-azules puede estar ocasionada por una sobrecarga en la laguna. En éste caso generalmente el pH < 6.5 y el oxígeno disuelto < 1 mg/l<sup>40</sup>. Un alto contenido de algas y bacterias en el efluente del estanque puede ejercer valores de la DBO<sub>5</sub> superiores a los del agua afluente<sup>35</sup>.

Las algas pueden presentar serios inconvenientes en las aguas superficiales, puesto que pueden reproducirse rápidamente cuando las condiciones son favorables. Este fenómeno que se conoce como *crecimiento explosivo* ("bloom algal") puede conducir a que las lagunas sean cubiertas por grandes colonias flotantes de algas<sup>35</sup>.

Como un resultado del proceso de fotosíntesis de las algas de la laguna, existe una variación diaria en la concentración de oxígeno disuelto. Después del amanecer, el nivel de oxígeno disuelto se incrementa gradualmente hasta llegar a un máximo al atardecer, disminuyendo al mínimo durante la noche (Figura 2.1). La posición de la oxipausa (la profundidad a la cual la concentración de oxígeno disuelto es cero) cambia de una forma similar. En el pico de la actividad algal, los iones carbonato y bicarbonato reaccionan para proveer más dióxido de carbono a las algas, produciendo un exceso de iones hidroxilo con lo cual el pH se puede elevar por arriba de 9, aumentando la tasa de mortalidad de las bacterias fecales<sup>30</sup>.



**Figura 2.1** Variación diaria de oxígeno disuelto y pH

Fuente: <http://cidta.usal.es>

La temperatura es uno de los factores de mayor importancia en el funcionamiento de las lagunas de estabilización. Se ha demostrado que el crecimiento de algas es máximo en un ámbito de temperatura de 25 a 30°C. Temperaturas más altas disminuyen el crecimiento y para temperaturas superiores a los 35°C se ha observado que la actividad de las algas se inhibe totalmente<sup>30</sup>.

En ausencia de un mezclado inducido por el viento, la población algal tiende a estratificarse en una capa angosta de aproximadamente 20 cm de espesor, durante las horas del día. Esta capa concentrada de algas se mueve hacia arriba o abajo de los primeros 50 cm superficiales como respuesta a los cambios de la intensidad de luz incidente y origina grandes fluctuaciones en la calidad del efluente (DBO y sólidos suspendidos) si la estructura de salida está dentro de esta zona<sup>30</sup>.

El crecimiento de algunas especies de algas en particular se debe a una compleja interacción de parámetros como la temperatura, intensidad de luz, nutrientes, salinidad, pH, mezcla y preadaptación<sup>11</sup>. Se ha reportado que las especies *Euglena*, *Chlorella* y *Chlamydomonas* son las más frecuentemente encontradas<sup>15</sup>.

A causa de la intensa actividad fotosintética durante el día, la supersaturación de oxígeno puede alcanzar hasta 36 mg/l, provocando alguna pérdida de oxígeno a la atmósfera. Las variaciones en el pH también son comunes durante el ciclo diario debido a la utilización del CO<sub>2</sub> por las algas, causando la disociación del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> para producir el ion hidroxilo. Variaciones en el pH de 7 a 9 pueden ocurrir durante algunas horas del día. A pH mayor de 9, la actividad bacteriana empieza a disminuir, causando una reducción en la producción del CO<sub>2</sub> y posiblemente la subsecuente limitación del crecimiento algal<sup>15</sup>.

## II.2 PROBLEMAS GENERADOS POR LA CANTIDAD EXCESIVA DE ALGAS

Se desea que las algas en exceso sean removidas en la instalación de tratamiento por varias razones:

- Estéticas
- Sanitarias: las bacterias patógenas pueden utilizar la materia flotante como refugio y nutrientes
- Al morir, se van al fondo, donde se descomponen en condiciones anaerobias y provocan la acumulación de sedimentos en el fondo, provocando azolve
- Si existe una gran cantidad de nutrientes, las algas comienzan a proliferar en forma anormal, cubren la superficie e impiden el paso de la luz y la oxigenación al cuerpo de agua, pudiendo provocar eutroficación
- Son difíciles de eliminar de los estanques de oxidación, ya que tienden a escapar con el efluente
- Pueden provocar que la DBO<sub>5</sub> y los sólidos en suspensión del efluente excedan los límites de descarga
- Pueden provocar olores desagradables en el agua

## II.3 FORMAS DE ELIMINACIÓN

A continuación se presentan algunas de las formas utilizadas para eliminar algas en las lagunas de estabilización; así como de su efluente, y las desventajas que presentan:

### II.3.1 APLICACIÓN DE ALGICIDAS

Es decir, químicos utilizados para matar las algas; tales como el sulfato de cobre o el permanganato de potasio<sup>44</sup>. Su aplicación continua produce disminución del alimento disponible para los peces, tienen efectos posteriores, provocan azolves y su aplicación debe realizarse con mucho cuidado<sup>34,41</sup>. El problema de la mayoría de los algicidas es que matan a todas las algas actuales, pero no quitan las toxinas que son lanzadas por las algas antes de la muerte.

### II.3.2 PRECIPITACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL SUSPENDIDO

La adición de químicos directamente en la laguna tiene la desventaja de que se requiere de una pequeña construcción adicional. Desafortunadamente, el lodo acumulado en la laguna se incrementa notablemente debido a la adición de químicos; además, se requiere un bombeo periódico del material de los lodos para mantenimiento, por la profundidad de diseño de la laguna.

Todos esos procesos, de cualquier forma, incrementarán los costos por mantenimiento, los cuales se desean mantener lo más bajo posible. Debido a eso, la precipitación química dentro de la laguna parece ser impráctica<sup>28</sup>.

### II.3.3 AUTOFLOCULACIÓN

La autofloculación es el término para referirnos a la precipitación de las algas y otra materia particulada en una laguna, cuando el pH alcanza niveles muy altos. Este fenómeno se relaciona con la presencia de carbonatos de calcio y de magnesio. Mientras las algas remueven  $\text{CO}_2$ , el pH alcanza el punto en el cual la precipitación de hidróxidos de magnesio y de carbonato de calcio junto con las algas, permite remover la materia particulada. Los problemas con la autofloculación son (1) se requiere de un tanque para sedimentación; (2) se requieren condiciones muy estáticas o tranquilas; y (3) se requiere de días muy calurosos y no nublados para obtener valores altos de pH (mayores a 11) necesarios para lograr la autofloculación<sup>27</sup>.

### II.3.4 FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO

Los parámetros más importantes en el diseño de un sistema para flotación son la velocidad de carga hidráulica (incluyendo recirculación), la concentración de SS contenidos en el flujo, y la relación aire-sólidos necesarias para una remoción efectiva. La flotación por aire disuelto no satisface requerimientos de simplicidad y operación en pequeñas comunidades. Además el proceso resulta relativamente caro, ya que se requiere la adición de coagulantes para una efectiva remoción, así como un gran consumo de energía eléctrica<sup>28</sup>.

### II.3.5 CLORACIÓN

Se adiciona cloro al agua para oxidar la materia orgánica y las algas presentes. Las dosis requeridas para lograr tal oxidación son muy elevadas, por lo cual, generalmente se requiere una posterior descloración<sup>41</sup>.

### II.3.6 COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

La coagulación seguida de una sedimentación ha sido muy utilizada para la remoción de materia suspendida y coloidal en el agua. Se han realizado estudios de tratamientos químicos para el efluente de lagunas de estabilización, como un post-tratamiento para remover algas y mejorar la calidad del efluente.

Como las células de las algas tienen carga negativa, se encontró que la remoción de las algas por medio de la coagulación química se lleva a cabo a través de una precipitación eléctrica; de manera que para obtener una floculación algal efectiva se han usado polielectrolitos catiónicos. Sin embargo, la coagulación-floculación no es fácilmente controlada y requiere personal operativo capacitado, además de que se producen grandes cantidades de lodo, por lo que no es práctico aplicarlo en comunidades pequeñas<sup>28</sup>.

### II.3.7 TRATAMIENTO EN SUELO

Para la irrigación con agua residual se deben analizar condiciones sanitarias, estéticas, económicas y ecológicas; así como técnicas. La filtración en el suelo es un importante mecanismo para remover partículas suspendidas de los efluentes residuales aplicados y por la retención de los microorganismos que facilitan la descomposición biológica de la materia orgánica suspendida y disuelta. La irrigación con agua residual se limita a las características del suelo y del agua subterránea, tanto como por las características químicas del agua de la laguna<sup>28</sup>.

### II.3.8 CONTROL CON BIOCIDAS

Como el sulfato ferroso<sup>44</sup>. Término aplicado a los productos químicos utilizados para destruir organismos vivos que interfieren o amenazan la salud y las actividades humanas.

Algunos biocidas son selectivos, siendo más potentes contra un número pequeño de especies, en tanto otros son más indiscriminadamente tóxicos. Tiene el inconveniente de que no se deben utilizar en lugares cercanos a zonas residenciales; así como de que tienen elevados costos<sup>41</sup>.

### II.3.9 CAMBIOS EN EL FLUJO HIDRÁULICO

Para lograrlo se pueden utilizar mamparas horizontales o verticales y sifones. Se provocan cambios en la hidráulica del sistema, incrementando el tiempo de retención real. Ayudan a reducir el corto circuito<sup>33</sup>.

## II.4 MAMPARAS

Son paredes o placas usadas para canalizar o dirigir el flujo de agua en las lagunas. Proveen área superficial sumergida por la cual los microorganismos pueden quedar atrapados, incrementando la estabilización orgánica. Se utilizan mucho cuando el influente contiene material en suspensión o flotante que se desea sedimentar o flotar para colectarlo posteriormente.

La instalación de mamparas ha sido propuesta por varios investigadores<sup>22,29</sup> como una forma de mejorar las características hidráulicas de las lagunas. Esta práctica busca romper el flujo estratificado, aminorar las zonas muertas y reducir los cortocircuitos, incrementando el tiempo de retención<sup>36</sup>.

De sus experimentos de laboratorio, Killani y Ogunrombi (1984) reportaron que las lagunas de estabilización instaladas con mamparas producían mejor tratamiento que aquellas sin las mismas. Ellos atribuyeron las eficiencias a la reducción del número de dispersión en las lagunas con mamparas y la biopelícula que crecía en la superficie de éstas, la cual podía, junto con la biomasa suspendida, contribuir en parte a la degradación de la materia orgánica<sup>22,36</sup>.

#### **II.4.1 VENTAJAS POR EL USO DE MAMPARAS, PARA PROVOCAR CAMBIOS EN EL FLUJO HIDRÁULICO DE SALIDA**

- Menor costo por modificaciones
- No requieren mucho mantenimiento
- No tienen efectos posteriores (como los alguicidas)
- No existe costo por reactivos
- No requieren instalaciones muy complicadas
- No requieren personal especializado
- Reducen el corto circuito
- Al disminuir la dispersión se mejora la eficiencia
- Pueden recuperarse las algas y de no tener toxicidad, utilizarse como abono agrícola, o bien, como alimento para animales

## CAPÍTULO III PROPUESTA DE SOLUCIÓN

---

Antes de describir la metodología llevada a cabo para la realización del presente estudio, fue necesario analizar el diseño de las unidades experimentales, ya que ambas fueron construidas con anterioridad y se tuvieron que adaptar las ubicaciones de las mamparas a las dimensiones ya establecidas de las mismas; respetándose las condiciones hidráulicas necesarias para su funcionamiento.

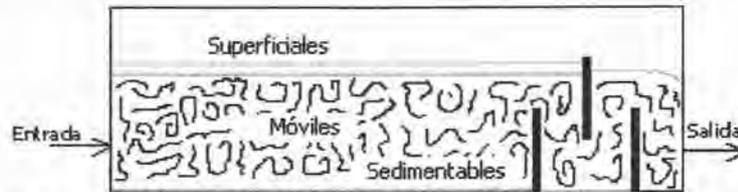
En el presente capítulo se describe la manera en la cual se realizaron las corridas; así como las variables de medición y las técnicas utilizadas.

En las lagunas de estabilización se pueden presentar tres tipos de algas: las que son sedimentables y se acumulan en el fondo del estanque; aquellas que tienen flagelos que les permiten tener un libre desplazamiento a través del estanque (móviles) y las superficiales (filamentosas), que por su naturaleza se encuentran en la parte superior del estanque.

Debido a que no existía la certeza de cuales algas estarían presentes dentro del sistema, se colocaron las mamparas de forma tal que pudieran quedar retenidas, sin importar el tipo de alga.

Se colocó la primera mampara de forma sumergida, para que retuviera aquellas algas que sedimentan. La segunda mampara se ubicó de forma mas elevada, para retener las algas superficiales, así como para colocarles un obstáculo a aquellas que tienen la capacidad de moverse y tratando de que queden retenidas entre ambas mamparas.

Sin embargo, como es muy posible que dichas algas aún puedan pasar a través de esas dos mamparas, se decidió colocar una tercera mampara sumergida y determinar con ello si era significativa la diferencia de remoción entre las dos o las tres mamparas (Figura 3.1).



**Figura 3.1** Movimientos de las algas presentes en las lagunas de estabilización

### III.1 METODOLOGÍA

Como ya se ha mencionado anteriormente, las algas en grandes cantidades pueden constituir un problema para las lagunas de estabilización. Sobre todo porque pueden provocar que la DBO y los sólidos en suspensión excedan los límites máximos permisibles para su descarga a cuerpos receptores.

Por tal motivo se decidió llevar a cabo el presente estudio para determinar la remoción de las mismas en el efluente de las lagunas de estabilización mediante el uso de mamparas sumergidas. Así como analizar los resultados obtenidos y definir cual de ambas propuestas (2 ó 3 mamparas), en caso de serlo, es la más eficiente para tal propósito.

La literatura muestra que las mamparas sumergidas son un método que ha ganado muchos adeptos al utilizarse con resultados favorables para la remoción de materia suspendida y mejoramiento de la calidad bacteriológica del agua, pero sobre todo, para la remoción de objetos flotantes. Pese a todo lo anterior, no se ha encontrado información acerca de la aplicación de éstas con el fin de reducir la cantidad de algas en las lagunas.

#### III.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Para el arreglo experimental se utilizaron 2 lagunas a nivel laboratorio construidas en acrílico transparente de 9 mm de espesor. Cada unidad tiene las mismas dimensiones (1.8 x 0.3 x 0.6 m; largo x ancho x profundidad, con un bordo libre de 0.1 m). La forma de las lagunas es rectangular. Ambas unidades se instalaron a temperatura ambiente.

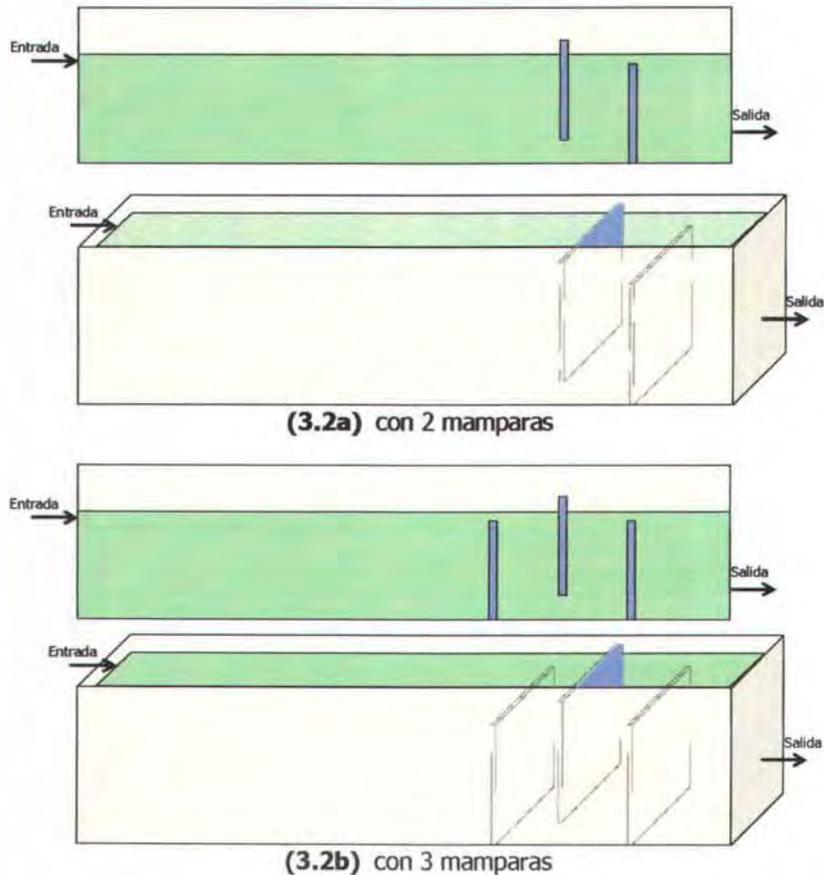
La parte experimental se desarrolló en la Planta piloto de tratamiento de agua residual del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) localizado en el municipio de Jiutepec, en el área conurbada de la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Como este estudio se centra en las lagunas facultativas, se decidió utilizar el agua cruda y del efluente del sedimentador secundario de la Planta de tratamiento de agua residual (PTAR) "Solidaridad", la cual trata agua residual doméstica. Además, se tomaron muestras del agua de la laguna de la PTAR del IMTA, la cual contiene diversas algas, necesarias para el objetivo de éste estudio. Dicha planta trata el agua residual proveniente de las oficinas del Instituto.

Con el fin de evitar que los rayos solares pasaran a través de las paredes de las unidades, éstas se forraron con un plástico de color negro.

### III.1.2 ARREGLOS DENTRO DE LAS LAGUNAS

La laguna A tuvo inicialmente dos mamparas y en la segunda parte del estudio se le colocó una tercera mampara; mientras que la laguna B fue el control, es decir, no contó con ninguna. Los arreglos en la laguna A se muestran en la Fig. 3.2a y 3.2b.



**Figura 3.2** Arreglos utilizados en la laguna A

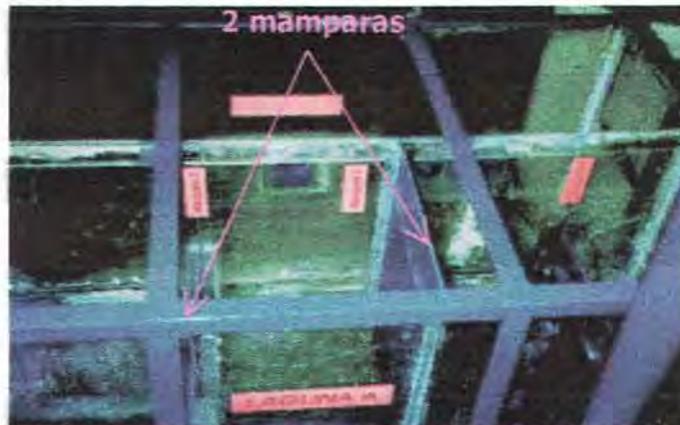
### III.1.3 TIPO DE MAMPARAS UTILIZADAS

Las mamparas consistieron en una cortina rígida de material plástico (Figura 3.3). Dado que el fin de este trabajo es determinar la remoción al utilizar las mamparas sumergidas, se optó por utilizar un material sólido sin orificios, ya que de haberse utilizado un material poroso, aún tomando en cuenta la formación de una biopelícula, no se podría garantizar que las algas microscópicas no fueran arrastradas por el movimiento del agua atravesando las mamparas de manera horizontal; es decir, los resultados que se obtuvieran en la remoción no serían solamente por el uso de mamparas, sino también debido a otros factores.

### III.1.4 UBICACIÓN DE LAS MAMPARAS

Se realizaron los cálculos para determinar el distanciamiento entre las mamparas, ya que se deseaba afectar el tratamiento dentro de las lagunas lo menos posible. Sin embargo, debido a que ambos canales ya se encontraban construidos con anterioridad, se trató de que la ubicación de las mamparas se apegara a las dimensiones de los mismos.

Para la colocación de las mamparas se optó por afectar solamente el 75% de la longitud de las lagunas y a partir de esa distancia fueron situadas. Cuando la laguna A tuvo 2 mamparas, la ubicación de éstas fue al 75% y al 87.5% de la distancia total. Pero al realizar la colocación de la tercer mampara ésta se tuvo que ubicar al 62.50% de dicha distancia, para evitar que las 3 mamparas quedaran muy cercanas (Capítulo IV).



**Figura 3.3** Mamparas utilizadas durante el estudio

En la literatura no existen reportes que brinden unas guías adecuadas para un correcto y eficiente diseño de las mamparas sumergidas. Cigana *et al.* (1998), realizaron estudios a escala piloto para proponer un criterio de diseño de las mismas. Dicho criterio fue el que se utilizó en este estudio, para el cálculo de la ubicación y distanciamiento entre las mamparas.

Para calcular la ubicación de las mamparas se requieren las dimensiones de la laguna y la velocidad horizontal del flujo; así como la velocidad vertical del objeto que se desea remover, necesaria para determinar la influencia de la turbulencia, dada por el número de Rouse.

### III.1.5 PRUEBAS DE FUNCIONALIDAD

Antes de comenzar las corridas experimentales, se realizaron pruebas con agua de la llave para evaluar que no existieran fugas.

Al inicio se ubicó un tanque de alimentación (sedimentador primario), el cual se llenaba con agua cruda procedente de la PTAR "Solidaridad" (Figura 3.4); éste era conectado con tuberías de entrada a ambos canales. El gasto se controlaba por medio de válvulas tipo mariposa, ya que el flujo utilizado debía ser constante, tanto a la entrada como a la salida de los canales.

Posteriormente se encontraban las tuberías de salida, que llevaban el agua al tanque recolector de aguas tratadas, las cuales también contaban con válvulas para lograr el flujo necesario (Figura 3.5).



(3.4a) Vista en planta de la Entrada del agua residual cruda, a la Planta de tratamiento

Figura 3.4 Canal de entrada de agua cruda, PTAR "Solidaridad"

Se efectuó la calibración en el gasto y volumen tanto a la entrada como a la salida de ambas unidades.

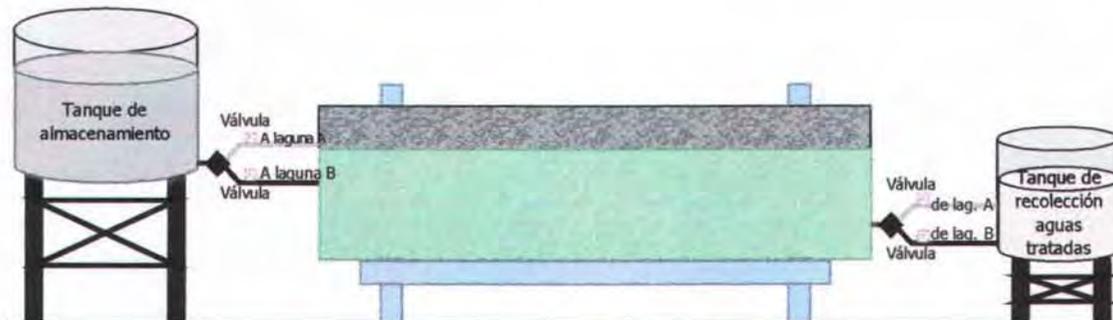


Figura 3.5 Esquema del sistema utilizado

### III.1.6 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA TURBULENCIA

Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar la influencia de la turbulencia provocada por la colocación de las mamparas, tomándose en cuenta los valores de los números de Reynolds y de Froude. Notándose valores muy pequeños que van de 1.11 a 2.21 en el caso de Reynolds, lo cual nos indica que se mantiene un régimen laminar; mientras que valores de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  son obtenidos para el caso de Froude, lográndose condiciones de estabilidad (Capítulo IV).

### III.1.7 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO UTILIZADO

Existe mucha variación en el tiempo de retención recomendado por los investigadores. De acuerdo con Metcalf y Eddy, para una laguna de estabilización facultativa el TRH adecuado va de 5 a 30 días, mientras que Arceivala asegura que el periodo de retención varía entre 7 y 110 días. Parker recomienda 7 días durante el verano y más de un mes durante el invierno. Mering indica utilizar al menos 25 días. Para McGarry y Pescod 1 ó 2 días son suficientes para satisfacer los requerimientos del influente para la DBO. Para este estudio, se determinó utilizar un tiempo de retención hidráulico de 7 días.

### III.1.8 TIPO DE ILUMINACIÓN UTILIZADA

Inicialmente se utilizó iluminación artificial consistente en 2 lámparas fluorescentes de 40W localizadas a 50 cm sobre la superficie de la laguna; manteniéndose ciclos de 12 horas de encendido al día (Figura 3.6), para observar el comportamiento de las lagunas bajo condiciones de iluminación controlada.



**Figura 3.6** Iluminación del sistema utilizando una lámpara fluorescente (luz de día)

Durante un periodo de 3 semanas se dejó estabilizar el agua para lograr el desarrollo algal. Sin embargo, transcurrido ese tiempo se notó que el crecimiento no se llevaba a cabo, debido probablemente a la falta de radiación.

Por ello se colocó alrededor de la lámpara una campana para concentrar mejor la luz (Figura 3.7) ya que las lagunas empezaron a tornarse anaerobias (el aspecto físico del agua de éstos estanques era de color gris oscuro y se comenzó a percibir un mal olor, característico de las lagunas anaerobias).



**Figura 3.7** Concentración de la iluminación por medio de una campana

Uno de los signos del buen funcionamiento en las lagunas facultativas es el desarrollo de un color verde brillante debido a la presencia de las algas. Sin embargo, durante esta etapa no se logró lo anterior.

Por tal motivo se decidió que la iluminación se llevaría a cabo a través de la luz solar, para lo cual el modelo se colocó a la intemperie (Figura 3.8). No obstante, de esta forma no se controlan factores como el clima o la precipitación.



**Figura 3.8** Iluminación de manera natural, a ambos canales

### III.1.9 DESARROLLO ALGAL

Se tomó agua de la laguna de la PTAR del IMTA y se dejó estabilizar durante una semana para el desarrollo de las algas (Figura 3.9). Transcurrido ese lapso, se le agregó como inóculo a cada uno de los canales  $0.04 \text{ m}^3$  de la misma, así como  $0.0036 \text{ m}^3$  de algas flotantes del tipo *Hydrodictyon spp.* (se colocaron aproximadamente 60 cm de largo por 30 cm de ancho) tomadas de la misma laguna.

Además de lo anterior, el reactor experimental fue llenado con agua residual cruda proveniente de la PTAR "Solidaridad"; dejándose estabilizar durante una semana más.

Al cabo de este periodo, se observó un color verde oscuro en el agua de ambos canales. El muestreo se inició hasta después de transcurrido el TRH, con el objeto de que el agua residual de alimentación pasara a través de la laguna y se obtuvieran resultados relativos al uso de las mamparas.

El reactor se mantuvo a gasto constante de 39 l/d.



**Figura 3.9** Inóculo agregado a cada uno de los canales

### III.1.10 AGUA DE ALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

La caracterización del agua cruda residual de la PTAR "Solidaridad" se presenta en la Tabla 3.1.

HORA	SST (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)		pH	Tempe- ratura (°C)	OD (mg/l)	N <sub>total</sub> (mg/l)	P <sub>total</sub> (mg/l)
		soluble	total					
10:00 AM	70	99	121	7.60	20.4	0.37	30.83	8.13
11:30 AM	60	72	103	7.47	22.1	0.31	30.36	8.65
13:00 PM	110	100	125	7.35	22.4	0.23	31.45	13.11
14:30 PM	72	89	111	7.38	23.1	0.23	29.42	12.56
16:00 PM	112	118	170	7.37	24.4	0.19	27.60	12.64
<b>PROMEDIO</b>	<b>85</b>	<b>96</b>	<b>126</b>	<b>7.43</b>	<b>22.5</b>	<b>0.27</b>	<b>29.93</b>	<b>11.02</b>

**Tabla 3.1** Caracterización del agua cruda de alimentación

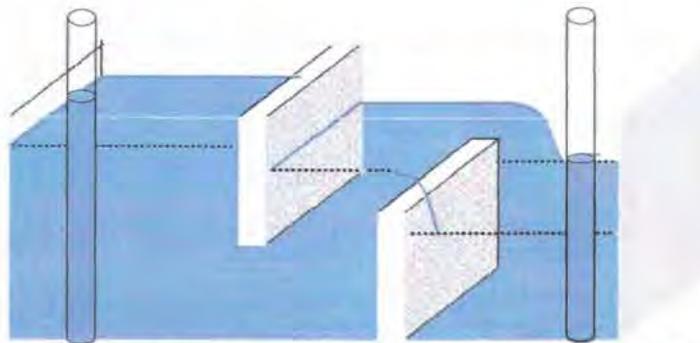
De acuerdo con la caracterización, se puede establecer que el tipo de agua residual utilizada como alimentación tiene una concentración baja (Tabla 1.1), con excepción del P<sub>total</sub>, el cual, se encuentra entre la concentración media-alta.

Los valores promedios de N<sub>total</sub> y P<sub>total</sub> se encuentran dentro de los rangos favorables para la presencia de algas y zooplancton (0.05 a 40 mg/l y de 3 a 15 mg/l, respectivamente)<sup>35</sup>.

### III.1.11 TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS REALIZADOS

La primera fase del estudio se efectuó con 2 mamparas en la laguna A, mientras que la laguna B fue el control, sin mamparas, para comparar las remociones obtenidas entre ambas lagunas y decidir si su uso es apropiado. El periodo de estudio fue de 15 días, durante los cuales se tomaron muestras por medio de un tubo de acrílico de 22" de largo y 1" de diámetro, con el fin de recolectar toda la columna de agua (Figura 3.10). Se tomaron muestras, por duplicado, tanto a entrada como a la salida de cada una de las lagunas, a las 8:30 horas.

Los parámetros analizados durante el periodo de prueba fueron: DBO<sub>5</sub> soluble y total, sólidos suspendidos totales y clorofilas *a*, *b* y *c*. Además, se midió el oxígeno disuelto, el pH y la temperatura, tanto ambiental como del sistema. Los resultados obtenidos se muestran en el Capítulo V.



**Figura 3.10** Toma de muestra a la entrada y salida de las lagunas

Una vez concluido el periodo de muestreo para la primera corrida, se procedió a colocar la tercera mampara en la laguna A (Figura 3.11); dejándose nuevamente transcurrir el tiempo de retención hidráulico. De igual manera se realizó el muestreo tanto a la entrada como a la salida de ambos canales; manteniéndose la misma cantidad de pruebas que en el primer caso, durante un periodo de tiempo similar.



**Figura 3.11** Laguna con tres mamparas

### III.1.12 MONITOREO DE 24 HORAS

Durante el día existen variaciones tanto en el pH, como en el oxígeno disuelto. Con el objeto de conocer dicho comportamiento dentro de los canales, se realizó el monitoreo de temperatura, pH y oxígeno disuelto cada hora, durante un periodo de 24 horas, el cual se presenta en el Capítulo V.

### III.1.13 OBSERVACIÓN AL MICROSCOPIO

Se realizó una observación al microscopio de muestras del agua existente en los canales tanto en la entrada como en la salida; así como de la capa superficial de las algas presentes para determinar los tipos de algas que prevalecieron durante el estudio. Los resultados obtenidos se muestran en el Capítulo V.

La fijación de las muestras se efectuó de acuerdo con el método 10200 B, del Standard Methods<sup>2</sup>.

## III.2 PARÁMETROS DE MEDICIÓN Y TÉCNICAS

Entre los principales factores que intervienen en el funcionamiento de una laguna se tienen los siguientes: pH, temperatura, carga orgánica, luz solar, nutrientes, concentración de clorofila *a*, gasto y tiempo de retención. Otros parámetros como DBO, SST y coliformes fecales son importantes para evaluar la calidad del agua tratada. A continuación se describen los procedimientos utilizados durante la toma de las muestras.

### III.2.1 MUESTREO

La toma de muestras se realizó a través de un tubo de acrílico de 22" de largo y 1" de diámetro para recolectar toda la columna de agua (Método de la manguera). La muestra se colocó en envases de vidrio forrados con papel aluminio, para evitar que los rayos solares pasaran al interior de la botella.

Se tomó la muestra tanto en la entrada como en la salida de cada una de las lagunas, diariamente a las 8:30 horas, durante 15 días. Para la toma de muestras del agua residual se consideró lo establecido por la norma oficial mexicana NMX-AA-003-1980.

### III.2.2 MEDICIÓN DE CAUDAL

Para la medición del caudal de entrada y de salida se utilizó el método volumétrico, el cual es un método sencillo que se utiliza cuando los caudales a medir son pequeños. El material que se requiere para hacer la medición es un recipiente aforado (cubeta, bote, tambo, etc.) y un cronómetro.

La medición consiste en llenar un recipiente a un volumen específico, tomando el tiempo que tarda en llenarse. Esta medición debe ser realizada por lo menos tres veces y obtener un promedio. Los datos que se generen se sustituyen en la ecuación 3.1.

$$Q = \frac{\text{Vol}}{t} \quad (3.1)$$

Donde:

Q = Gasto, en l/s

Vol = volumen, en litros

t = tiempo, en segundos

La medición del caudal se realizó diariamente, 2 veces al día, utilizando una probeta graduada, tanto a la entrada como a la salida de cada canal, mínimo durante 5 veces.

La probeta se llenaba en 40 segundos y se verificaba que contuviera el volumen apropiado, es decir, que pasaran 18 ml en dicho lapso. Una vez tomadas las 5 lecturas se tomaba un promedio y de existir errores en la medición, se calibraban de nuevo las válvulas de entrada y/o salida.

### III.2.3 TEMPERATURA

En general, las aguas residuales son más cálidas que las de abastecimiento<sup>40</sup>. La temperatura afecta la producción de oxígeno disuelto y otros gases. A altas temperaturas se intensifica la producción de gases del material sedimentado creando resuspensión de sólidos y detritus de algas azul-verdes que al morir provocan malos olores y otras causas que afectan el funcionamiento de la laguna.

Las mediciones de temperatura *in situ*, se realizaron por medio de termómetros colocados dentro de las lagunas, leyéndose cada 24 horas.

### III.2.4 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

Es el cologaritmo de la concentración de los iones hidronio, es decir,  $([-1] \times \log [H^+])$ . La escala del pH varía entre 0 a 14, siendo el valor de 7 el de la neutralidad.

El pH de los cuerpos de agua y el agua residual doméstica, en general, es ligeramente alcalino por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos. El pH del agua residual doméstica es de aproximadamente 7.2<sup>20</sup>.

Las mediciones de pH se realizaron utilizando un potenciómetro ORIÓN modelo 710a, calibrado antes de usarse con buffer de pH de 7 y 9.



**Figura 3.12** Medición de pH por medio del potenciómetro

### III.2.5 OXÍGENO DISUELTO (OD)

La concentración de OD es un indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables, de la aptitud del agua para mantener vivos peces u otros organismos aerobios y de la capacidad autodepuradora de un cuerpo receptor<sup>20</sup>.

Es el mejor indicador de una operación satisfactoria en una laguna facultativa o de maduración. La principal fuente de OD proviene del oxígeno producido por la acción fotosintética de las algas<sup>39</sup>.



**Figura 3.13** Medidor de oxígeno disuelto YSI 550D, para campo

El oxígeno disuelto varía en función de la temperatura, presión atmosférica, salinidad y radiación solar. Al medio día se alcanza la máxima producción de OD, en horas tempranas el OD disminuye por la continua demanda de las bacterias en el proceso de bioxidación, y el periodo más crítico ocurre en la noche hasta cerca de las seis de la mañana donde el OD puede estar ausente creando condiciones anaerobias.

El rango normal del OD es de 6 a 35 mg/l. Si se tienen valores cercanos a cero mg/l se presentan condiciones anaerobias y a valores mayores a 35 mg/l se trata de sobresaturación<sup>37</sup>.

Las mediciones se realizaron con un equipo medidor de oxígeno disuelto para campo YSI 550D, después de tomada la muestra, *in situ*.

### III.2.6 CLOROFILA



**Figura 3.14** Medición de la clorofila

La clorofila es el pigmento que da el color verde a los vegetales y que se encarga de absorber la luz necesaria para realizar la fotosíntesis<sup>14</sup>. La cuantificación o estimación de clorofila *a* aporta información sobre la abundancia de productores primarios (fotoautótrofos). Se emplea para monitorear poblaciones de fitoplancton. El rango normal de la clorofila va de 500 a 2,000  $\mu\text{g/l}$ . Valor nulo significa anaerobiosis; valores grandes, aerobiosis<sup>37</sup>.

Todo el proceso debe llevarse a cabo en condiciones de semioscuridad y a baja temperatura; teniendo especial cuidado con la nomenclatura, puesto que se deben correr las lecturas por duplicado<sup>42</sup>.

Para el análisis de este parámetro se tomaron muestras tanto en la entrada como a la salida de ambas unidades, cada tercer día. Determinándose de acuerdo a lo recomendado por la Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental del IMTA<sup>42</sup>.

Para los cálculos se utilizaron las ecuaciones tricromáticas de Jeffrey y Humphrey (1975), siguiendo el procedimiento mencionado a continuación:

- Restar el valor de la absorbancia a 750 nm de los valores de la absorbancia a 664, 647 y 630 nm.
- Calcular las concentraciones (mg/l) de clorofila *a*, *b*, y  $c_1+c_2$  en la solución del extracto insertando los valores con la absorbancia corregida (restada a la absorbancia a 750 nm) en las ecuaciones siguientes:

$$C_{E,a} = 11.85 (\text{Abs } 664) - 1.54 (\text{Abs } 647) - 0.08 (\text{Abs } 630) \quad (3.2)$$

$$C_{E,b} = 21.03 (\text{Abs } 647) - 5.43 (\text{Abs } 664) - 2.66 (\text{Abs } 630) \quad (3.3)$$

$$C_{E,c} = 24.52 (\text{Abs } 630) - 7.60 (\text{Abs } 647) - 1.67 (\text{Abs } 664) \quad (3.4)$$

Donde:

$C_{E,a}$  = concentración (mg/l) de clorofila *a* en la solución extraída

$C_{E,b}$  = concentración (mg/l) de clorofila *b* en la solución extraída

$C_{E,c}$  = concentración (mg/l) de clorofilas  $c_1+c_2$  en la solución extraída

Todas las algas contienen clorofila *a*. La clorofila *b* indica la presencia de los grupos clorofita y euglenofita. La clorofila *c* muestra la presencia de cromofitas y criptofitas.

### III.2.7 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Son los sólidos retenidos al pasar agua a través de un filtro con apertura de poro de  $0.45 \mu\text{m}$ . Representa la fracción contaminante susceptible de ser eliminada por sedimentación, floculación o filtración. Lo constituyen las partículas inorgánicas (arcillas, arenas, suelos) y orgánicas (fibras de plantas, células de algas, bacterias, microorganismos, etc.).



**Figura 3.15** Determinación de los SST

El impacto que provoca la presencia de sólidos suspendidos es la formación de un área expuesta a la adsorción de agentes químicos y biológicos, y la presencia de la materia orgánica que al degradarse deteriora la calidad del agua. Un tratamiento secundario convencional de agua residual municipal arroja un resultado del orden de  $30 \text{ mg/l}$  de SST<sup>20</sup>.

La determinación de los sólidos suspendidos totales se realizó a ambos canales, tanto a la entrada como a la salida, cada tercer día.

Las muestras se analizaron con el método 2540 D, descrito en el Standard Methods<sup>2</sup>.

### III.2.8 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO<sub>5</sub>)

Es una medida de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica en el agua en 5 días a  $20^\circ\text{C}$ . Sólo evalúa la demanda ejercida por la fracción carbonada, la de los sulfuros y del ion ferroso; excluye la fracción nitrogenada. La DBO no mide un compuesto en especial, sino todos los biodegradables, por vía aerobia y se expresa en  $\text{mg/l}$ <sup>20</sup>.

Puesto que la oxidación biológica continúa indefinidamente, la prueba de la DBO última se ha limitado de manera arbitraria a 20 días, cuando se ha consumido quizá el 95% o más del oxígeno necesario. No obstante, incluso este periodo es demasiado largo para que la medición de DBO sea útil, por lo cual una prueba de 5 días, la DBO<sub>5</sub>, que se lleva a cabo a  $20^\circ\text{C}$ , se ha convertido en la norma<sup>37</sup>. La DBO se practica tanto en una muestra que contiene sólidos (total) como sólo en la fracción filtrable (soluble)<sup>20</sup>.

El rango normal de valores de la DBO<sub>5</sub> total va de  $60$  a  $300 \text{ mg/l}$ , lo cual indica que existe aumento de DBO total en el efluente en algunos casos. Mientras que el rango normal para la DBO<sub>5</sub> soluble es de  $40$  a  $200 \text{ mg/l}$ , indicando que existe buena remoción de la misma<sup>37</sup>.



**Figura 3.16** Determinación de la DBO<sub>5</sub>

La determinación de ambos parámetros se realizó para los dos canales, tanto a la entrada como a la salida, cada tercer día. Las muestras se analizaron con los métodos propuestos por el Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA, claves CAQAF6-14 (DBO<sub>5</sub> total) y CAQAF6-42 (DBO<sub>5</sub> soluble)<sup>19</sup>.

El tratamiento de las muestras se realizó por el método de diluciones tanto para la DBO<sub>5</sub> total como para la soluble. Por ser un efluente de agua residual doméstica, se recomienda utilizar de 1 - 5% de dilución, haciendo al menos dos diluciones diferentes por muestra. En este caso, se realizaron diluciones por duplicado al 1, 2 y 3%; reportándose los resultados de aquellas diluciones donde el consumo de oxígeno es cercano al 80%; correspondiendo al 1% en ambos casos.

Para calcular la DBO<sub>5</sub> total, se realiza la siguiente operación:

$$DBO_5 \text{ total (mg/l)} = \frac{OD_1 - OD_5}{\% \text{ dilución}} \quad (3.5)$$

Donde:

OD<sub>1</sub> = Oxígeno disuelto inicial, mg/l

OD<sub>5</sub> = Oxígeno disuelto al quinto día, mg/l

% dilución expresado en decimales: 100% = 1; 10% = 0.1, etc.

Para calcular la DBO<sub>5</sub> soluble, se realiza la siguiente operación:

$$DBO_{5 \text{ soluble}} \text{ (mg/l)} = \frac{OD_1 - OD_5}{\% \text{ dilución}} \quad (3.6)$$

Donde:

OD<sub>1</sub> = Oxígeno disuelto inicial, mg/l

OD<sub>5</sub> = Oxígeno disuelto al quinto día, mg/l

% dilución expresado en decimales: 100% = 1; 10% = 0.1, etc.

### III.2.9 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

La temperatura ambiental, la temperatura máxima y mínima diaria, la precipitación pluvial y la radiación solar se recopilaron de la Estación hidroclimatológica (EHCA) de la red del SMN, estación IMTA, ubicada dentro del propio Instituto.

#### III.2.9.1 TEMPERATURA AMBIENTAL

Las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren en las lagunas de estabilización son muy influenciadas por la temperatura. Es un parámetro que se relaciona con la radiación solar y afecta tanto la velocidad de la fotosíntesis como la del metabolismo de las bacterias responsables de la depuración de las aguas residuales. Esos fenómenos son retardados por las bajas temperaturas. Por eso, el proyecto de las lagunas debe tener en cuenta siempre las condiciones de temperatura más adversas.

Una caída de 10°C en la temperatura reducirá la actividad microbiológica en aproximadamente 50%. Como en una laguna de estabilización no existe temperatura uniforme, es más conveniente usar la expresión *temperatura media* de la laguna o *temperatura superficial* de la laguna, de acuerdo con el caso, en vez de temperatura de la laguna<sup>39</sup>.

La temperatura ambiental máxima es la mayor temperatura registrada en un día, y que se presenta entre las 14:00 y las 16:00 horas; mientras que la temperatura ambiental mínima es la menor temperatura registrada en un día, y que se observa entre las 6:00 y las 8:00 horas.

#### III.2.9.2 PRECIPITACIÓN PLUVIAL

Contribuye como agua de dilución dentro de las lagunas, afectando la concentración de los materiales contenidos en las aguas residuales y el funcionamiento hidráulico de aquellas<sup>45</sup>.

#### III.2.9.3 RADIACIÓN SOLAR GLOBAL (RSG)

En las lagunas facultativas y de maduración las algas utilizan del 2 al 9% de luz solar, siendo el 5% un valor común absorbido.

Hay numerosos factores que impiden la utilización de la luz solar. La turbiedad es el principal factor que dificulta la penetración de la luz en el cuerpo de agua. El ciclo diurno de oxigenación es afectado mucho más por las variaciones de las poblaciones de las algas que por las variaciones de la intensidad de luz, por lo tanto, la luz que penetra a mayores profundidades es utilizada con mayor eficiencia para la remoción de patógenos<sup>13</sup>.

### III.3 PROPUESTA DEL MODELO EXPERIMENTAL

En muchos problemas prácticos que requieren experimentación, es necesario diseñarlo en forma tal que la variabilidad de los datos provenientes de fuentes extrañas pueda ser controlada adecuadamente. En general, los agrupamientos que permiten tener homogeneidad en las condiciones de prueba se denominan bloques, y el orden en el cual los tratamientos se aplican dentro de cada bloque se determina aleatoriamente. A un diseño de este tipo se le denomina **diseño con bloques aleatorizados completos**, indicando esta última palabra que cada bloque contiene todos los tratamientos.

Esta estrategia de diseño permite incrementar la precisión en las comparaciones entre tratamientos o niveles de un factor, permitiendo a la vez separar la variación entre los bloques del error aleatorio asociado a la realización del experimento, a través del modelo lineal correspondiente (Villarreal, 1996).

De acuerdo con esto, se empleará un análisis de variancia con un factor en cuatro niveles (tratamientos) y siete niveles de bloques, en el cual los tratamientos (control 1, control 2, con 2 mamparas y con 3 mamparas) se juzgarán al azar, y el bloque como fijo. De esta manera es factible efectuar la comparación de los cuatro métodos (o procedimientos) mencionados, aislando estadísticamente la variación en los datos debida a la presencia de la variable sistemática días.

El interés primordial para analizar los datos obtenidos en el experimento es el de emplear un procedimiento estadístico de mayor confiabilidad que permita probar la igualdad de las medias para todos los tratamientos. La igualdad de dichas medias se probará a un nivel de significancia  $\alpha = 5\%$ , el cual se considera, de acuerdo con las prácticas estadísticas habituales, como el más conveniente para evitar la inclinación marcada por parte del investigador hacia la aceptación o rechazo de la hipótesis en cuestión (Villarreal, 1996).

Para efectuar el análisis de este modelo, es necesario comprobar los siguientes supuestos:

- Que los datos a los que se aplique el modelo expuesto, se busque en observaciones independientes entre y dentro de las muestras, es decir, que cada observación no se relacione con las restantes, con el fin de soportar debidamente la suposición inicial de independencia de la información.
- Normalidad. Que los datos se encuentren distribuidos normalmente.
- Homoscedasticidad. Igualdad de variancias para los cuatro métodos (o procedimientos) con el método de "Bartlett" al 95% de probabilidad de confianza.

#### III.3.1 DISEÑO CON BLOQUES COMPLETOS AL AZAR (BCA) <sup>47</sup>

Cuando se espera que la variación en las unidades experimentales (*u.e.*) pueda alterar los verdaderos efectos de los tratamientos, se plantean los bloques al azar como un método que se propone manejar la heterogeneidad de las unidades experimentales.

El diseño de bloques completos al azar es un diseño con aleatorización restringida en el cual las unidades experimentales se ordenan primero en grupos homogéneos (bloques) y, después, los tratamientos se asignan aleatoriamente dentro de los bloques.

El objetivo clave de bloquear las unidades experimentales es hacerlas tan homogéneas como sea posible dentro de cada bloque, y hacer los diferentes bloques lo suficientemente heterogéneos entre sí para reducir la variabilidad debida a las unidades experimentales. Cuando el tratamiento ocurre el mismo número de veces en cada bloque, el diseño se denomina balanceado.

En el caso de BCA, se restringe la aleatorización a cada bloque, y por eso se habla del modelo como de aleatorización con restricciones.

### III.3.1.1 MODELO ESTADÍSTICO <sup>47</sup>

El modelo estadístico para este diseño es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, k & \text{(tratamientos)} \\ j = 1, 2, \dots, n & \text{(bloques)} \end{cases} \quad (3.7)$$

Donde:

- $\mu$  = Media global para todos los tratamientos
- $\tau_i$  = Efecto aleatorio del tratamiento "i"
- $\beta_j$  = Efecto fijo del bloque "j"
- $\varepsilon_{ij}$  = Error aleatorio
- $Y_{ij}$  = Observación i-ésima para el j-ésimo tratamiento

El interés primordial para este diseño consiste en probar que las variancias para los efectos de todos los tratamientos (de los cuales k constituyen una muestra aleatoria y representativa), es nula, es decir, que todos los tratamientos provocan un efecto similar. Lo anterior equivale estadísticamente a decir que todos los tratamientos pueden considerarse como uno solo.

La prueba anterior se efectúa filtrando la variación en los datos por posibles efectos debidos a los bloques (días), permitiendo que la comparación entre los tratamientos (SST, DBO<sub>5</sub> soluble, DBO<sub>5</sub> total, clorofilas a, b y c) se efectúe en un medio libre de la presencia de componentes sistemáticas, que se lleguen a confundir con error experimental.

La hipótesis nula es, entonces,

$$\begin{aligned} H_0 &: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu \\ H_1 &: \text{Al menos una media es distinta de las otras} \end{aligned}$$

O, equivalentemente

$$\begin{aligned} H_0 &: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0 \quad \text{(no hay efectos de tratamientos)} \\ H_1 &: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos una } i \quad \text{(existen efectos de tratamientos)} \end{aligned}$$

Empleando el valor de la estadística F, con (k-1) y (k-1)(n-1) grados de libertad

$$F_0 = \frac{\frac{SS_{tr}}{k-1}}{\frac{SS_e}{(k-1)(n-1)}} \quad (3.8)$$

El valor de  $F_0$  se compara con el valor correspondiente de tablas con el nivel de significancia  $\alpha$  previsto, considerando (k-1) grados de libertad en el numerador y, (k-1)(n-1) en el denominador.

Si el valor  $F_0$  es igual o rebasa el valor de tablas, se rechaza la hipótesis nula, indicando ello que los tratamientos no son iguales entre sí.

### III.3.1.2 VENTAJAS<sup>47</sup>

Las principales ventajas al aplicar un diseño de bloques completos al azar son las siguientes:

1. Sí el agrupamiento – bloqueo – es efectivo, los resultados son sustancialmente más precisos que en un diseño completamente aleatorizado.
2. Puede acomodar cualquier número de tratamientos y repeticiones.
3. El análisis estadístico es relativamente simple.
4. La variabilidad de las u.e. puede introducirse deliberadamente para ampliar el rango de validez de los resultados experimentales sin sacrificar la precisión.

### III.3.1.3 DESVENTAJAS<sup>47</sup>

1. Las observaciones faltantes dentro de un bloque exigen cálculos adicionales: es un problema muy serio si existen muchas observaciones faltantes.
2. Los grados de libertad para el error experimental no son tan grandes como en el diseño completamente aleatorizado, por lo que se aumenta el cuadrado medio del error.
3. Se requieren más supuestos para este modelo que para el diseño completamente aleatorizado:  
a) No hay interacciones entre tratamientos y bloques, b) Variancia constante de bloque a bloque.

## **CAPÍTULO IV    HIDRÁULICA DEL SISTEMA**

---

### **INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se expondrán conceptos requeridos para el estudio del movimiento de los fluidos. Se realiza el cálculo de la influencia de la turbulencia debido al uso de mamparas, así como la determinación de las posibles eficiencias de remoción a obtenerse en las lagunas utilizadas. Además, se calcula el distanciamiento entre las mamparas empleadas en cada corrida.

El flujo de fluidos es complejo y no siempre puede ser estudiado de forma exacta mediante el análisis matemático. Contrariamente a lo que sucede con los sólidos, las partículas de un fluido en movimiento pueden tener diferentes velocidades y estar sujetas a distintas aceleraciones.

Tres principios fundamentales que se aplican al flujo de fluidos son:

- a) El principio de conservación de la masa, a partir del cual se establece la ecuación de continuidad
- b) El principio de la energía cinética, a partir del cual se deducen ciertas ecuaciones aplicables al flujo, y
- c) El principio de la cantidad de movimiento, a partir del cual se deducen ecuaciones para calcular las fuerzas dinámicas ejercidas por los fluidos en movimiento

## IV.1 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO EN UN CANAL

### IV.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO

El flujo en un canal se caracteriza por un líquido que corre por un conducto que tiene parte de su contorno expuesto a la presión atmosférica. Se distingue del flujo de tuberías, en el cual se haya completamente rodeado por una superficie limitante sólida y del flujo de chorro libre, en el cual el fluido se encuentra rodeado completamente por la atmósfera. De acuerdo con su origen, un canal puede ser natural o artificial<sup>1</sup>.

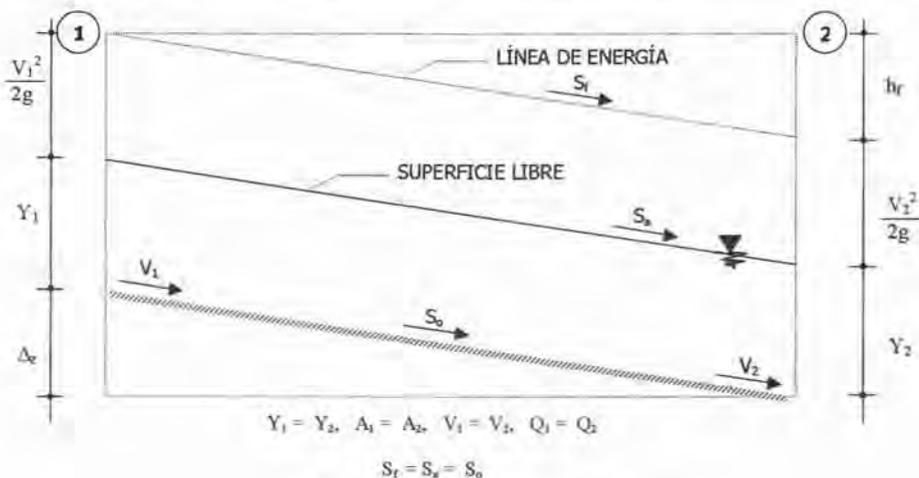
### IV.1.2 TIPOS DE FLUJO



Fuente: Aldana M. et al., (1987)

El flujo es **permanente**, si el tirante permanece constante en cualquier instante o lapso específico. Si acontece lo contrario, el flujo es **no permanente**.

El flujo **uniforme** ocurre cuando la velocidad media permanece constante en cualquier sección del canal. La sección transversal y el tirante permanecen constantes (Figura 4.1). La pendiente del terreno, la pendiente de la superficie libre del agua y la pendiente de la línea de energía son iguales. El tirante correspondiente al flujo uniforme se conoce como tirante normal. Un flujo uniforme sólo puede ocurrir en un canal artificial, nunca en un natural.



**Figura 4.1** Flujo uniforme

Fuente: Aldana et al., (1987)

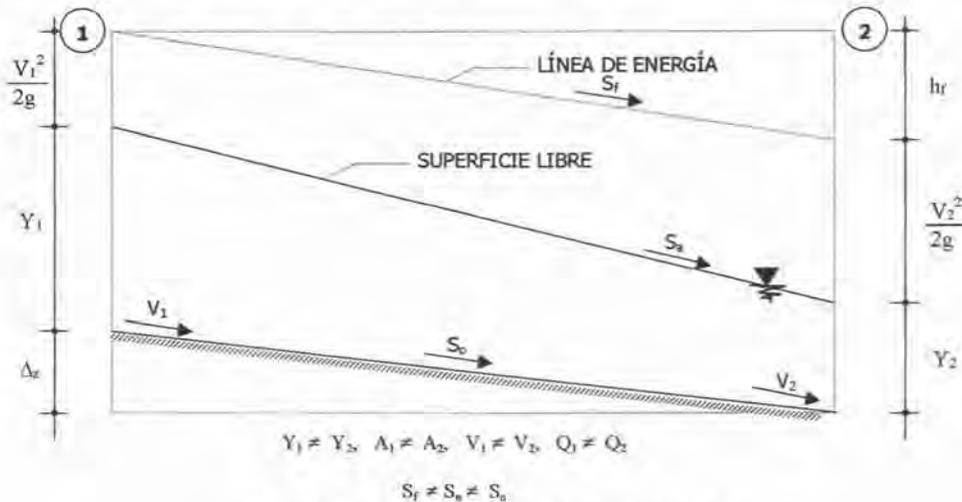
Si la velocidad se incrementa a valores superiores a 6 m/s, produce arrastre de aire, ocasionando un flujo no permanente, por lo que un flujo muy rápido no puede ser uniforme. El tipo fundamental de flujo tratado en hidráulica de canales es el uniforme permanente.

Para que ocurra un flujo uniforme no permanente sería necesario que la superficie del agua fluctuara de un lugar a otro, pero permaneciendo siempre paralela a la plantilla de un canal, lo cual es difícil en la práctica.

El flujo **variado** ocurre cuando la velocidad media cambia a lo largo del canal. La velocidad puede variar por un cambio en la sección, por la pendiente de un canal o por una estructura hidráulica interpuesta. En la Figura 4.2 se observa un flujo variado permanente. Este flujo si puede ser permanente y no permanente, ya que el flujo no permanente tiene que ser necesariamente variado.

El flujo variado puede ocurrir:

- Gradualmente: si el tirante cambia en forma gradual
- Rápidamente: si el tirante cambia bruscamente (salto)



**Figura 4.2** Flujo variado permanente  
Fuente: Aldana *et al.*, (1987)

En el flujo **laminar**, el flujo fluye en capas lisas o láminas. Una partícula que se haya en determinada capa permanece en ella. El esfuerzo cortante en el flujo laminar es producido por el deslizamiento de una capa sobre la otra.

El flujo **turbulento** se caracteriza por un movimiento irregular y errático de las partículas del fluido con respecto al tiempo y al espacio. Las fluctuaciones de la velocidad se producen, tanto en la dirección del fluido, como normal a él. En realidad dichas fluctuaciones son pequeñas en comparación de la media, mientras que la velocidad media no varía con el tiempo, se puede considerar el flujo como turbulento y permanente.

La magnitud de viscosidad de un fluido juega un papel muy importante, dado que es la fuerza viscosa la que amortigua las perturbaciones introducidas en el mismo. En el siglo XIX Reynolds demostró que el parámetro apropiado a usar como criterio para juzgar el tipo de flujo era:

$$N_{Re} = \frac{4 v R_h}{\nu} \quad (4.1)$$

Donde:

- $N_{Re}$  = Número de Reynolds, adimensional
- $v$  = velocidad media, en m/s
- $R_h$  = radio hidráulico, en m
- $\nu$  = viscosidad cinemática del fluido, en  $m^2/s$

En canales, el flujo laminar es aquel con valores del número de Reynolds  $N_{Re} < 500$ , el rango de 500 a 2000 es la región de transición; mientras que el flujo turbulento normalmente ocurre cuando  $N_{Re} > 2000$ .

### IV.1.3 GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN <sup>1</sup>

Los canales se diseñan con formas geométricas regulares, siendo las más comunes la trapezoidal, la rectangular, la triangular y la circular.

Los elementos geométricos más importantes en la sección de un canal son:

- a) Tirante (**Z**) es la distancia vertical entre el punto más bajo de la sección transversal de un conducto y la superficie libre del agua.
- b) Área hidráulica (**A**) es el área de la sección transversal de un conducto y la superficie libre del agua.
- c) Perímetro mojado (**P**) es el perímetro de la sección transversal en contacto con una frontera rígida.
- d) Radio hidráulico (**R<sub>h</sub>**) es la relación del área hidráulica al perímetro mojado.

### IV.1.4 NÚMERO DE FROUDE

El número de Froude, es un parámetro adimensional que sirve para describir el tipo de flujo de una corriente donde predomina la acción de la gravedad, como en los canales<sup>1</sup>.

$$N_{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gR_h}} \quad (4.2)$$

Se trata de un flujo crítico cuando el  $N_{Fr} = 1$ . Si el  $N_{Fr} < 1$ , el flujo es subcrítico (flujo tranquilo) y cuando el  $N_{Fr} > 1$ , el flujo es supercrítico (flujo rápido).

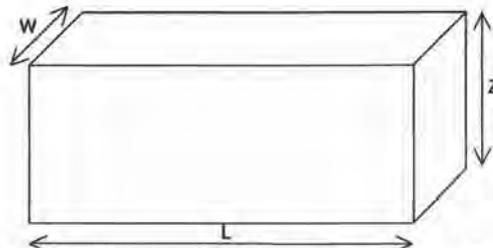
De manera que se pueden presentar los siguientes tipos de flujo:

1. Subcrítico-laminar.  $N_{Re} < 500$  y  $N_{Fr} < 1.0$
2. Subcrítico-turbulento.  $N_{Re} > 2000$  y  $N_{Fr} < 1.0$
3. Supercrítico-turbulento.  $N_{Re} > 2000$  y  $N_{Fr} > 1.0$
4. Supercrítico-laminar.  $N_{Re} < 500$  y  $N_{Fr} > 1.0$

## IV.2 CÁLCULOS EN EL REACTOR

Durante mucho tiempo, y con base en el criterio de diseño fundamentado en hipótesis de mezcla completa, se ha dicho que la forma de la laguna no es muy importante. Hoy en día se sabe, con base en resultados experimentales, que en las lagunas de estabilización no hay mezcla completa, sino que hay flujo disperso; y que el grado de dispersión depende de la geometría de las lagunas<sup>43</sup>.

Para el arreglo experimental se utilizaron 2 reactores rectangulares, de 1.8 x 0.3 x 0.6 m (largo x ancho x profundidad).



**Figura 4.3** Dimensiones de una laguna de estabilización

Siendo el paralelepípedo rectángulo la figura geométrica más simple, se han llegado a producir modelos matemáticos que facilitan el dimensionamiento de la laguna en función de L, W, Z (Figura 4.3).

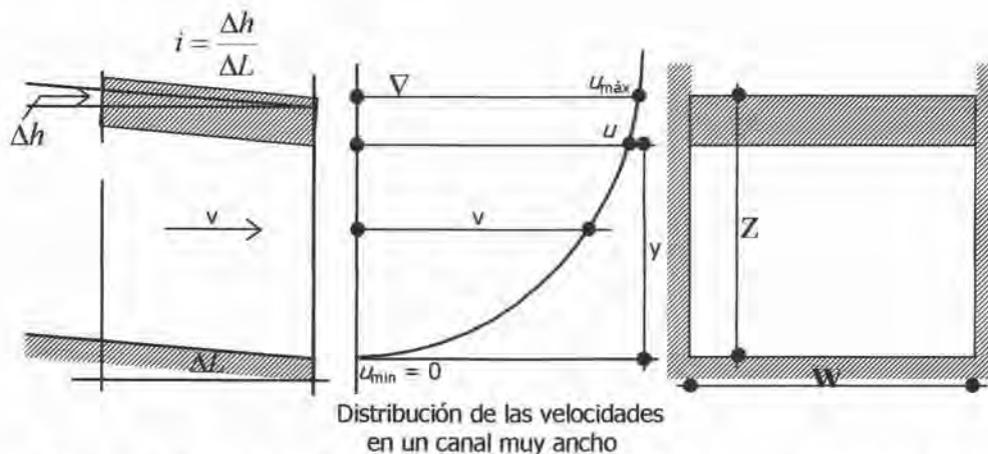
De manera que:

$$\text{Vol} = L W Z \quad (4.3)$$

$$\theta = \frac{\text{Vol}}{Q} = \frac{L W Z}{Q} \quad (4.4)$$

Donde:

- Vol = Volumen de la laguna, en m<sup>3</sup>
- Q = Caudal, en m<sup>3</sup>/d
- $\theta$  = Tiempo de retención hidráulica, en d
- L, W, Z = Dimensiones de la laguna, en m



**Figura 4.4** Variaciones de la velocidad del agua en la sección transversal de un canal rectangular muy ancho cuando el flujo es laminar

Fuente: Sáenz (2000)

Respecto al diseño y ubicación de las estructuras de entrada y salida, se sabe que conforme las lagunas se alargan ( $L/W > 4$ ) el tipo de estructura de entrada y salida pierde importancia y el flujo pasa a ser regido principalmente por las leyes de flujo laminar en canales abiertos.

Si el  $N_{Re} < 2000$  (como es usual en lagunas de estabilización), entonces:

$$v = k_h \cdot i \quad (4.5)$$

$$k_h = \frac{Z^2 g}{3v} \quad (4.6)$$

$$v = \frac{Q}{WZ} \quad (4.7)$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{i g (h-y)}{v} \quad (4.8)$$

$$u = \frac{-i g}{2v} [(Z-y)^2 - Z^2] \quad (4.9)$$

$$u_{\text{máx}} = \frac{i g Z^2}{2v} = \frac{3}{2} v \quad (4.10)$$

Donde:

- $v$  = velocidad promedio del agua en las lagunas, en m/s
- $u$  = velocidad real de las líneas de flujo en la laguna, en m/s
- $k_h$  = conductividad hidráulica, en m/s
- $i$  = gradiente hidráulico, adimensional
- $v$  = viscosidad cinemática, en  $\text{m}^2/\text{s}$
- $g$  = aceleración de la gravedad, en  $\text{m}/\text{s}^2$

La ecuación (4.10) indica que las líneas de flujo se desplazan a una velocidad 3/2 veces mayor que la promedio, es decir, la permanencia de estas líneas de flujo en la laguna es de 2/3 el periodo de retención, corrección fundamentada en las leyes de la hidráulica<sup>43</sup>.

De esta forma:

$$\text{Vol} = 0.50 \text{ m} * 0.30 \text{ m} * 1.80 \text{ m} = 0.270 \text{ m}^3$$

Determinando la relación  $X = \text{largo}/\text{ancho}$ , se obtiene:

$$X = \frac{L}{W} = \frac{1.80 \text{ m}}{0.30 \text{ m}} = 6; \quad X > 4$$

El  $\theta = 7$  días, entonces:

$$Q = \frac{0.270 \text{ m}^3}{7 \text{ d}} = 0.038 \text{ m}^3/\text{d}$$

Área hidráulica:

$$A = 0.50 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.15 \text{ m}^2$$

Velocidad promedio del agua en la laguna:

$$v = \frac{0.038 \text{ m}^3/\text{d}}{0.15 \text{ m}^2} = 0.2533 \text{ m}/\text{d} = 2.93 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{s}$$

Conductividad hidráulica:

$$k_h = \frac{(0.50 \text{ m})^2 (9.81 \text{ m}/\text{s}^2)}{3 (1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})} = 814,243 \text{ m}/\text{s}$$

Gradiente hidráulico:

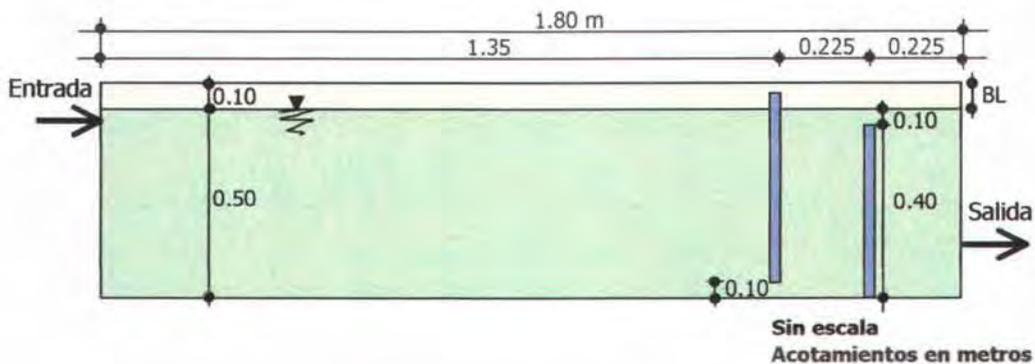
$$i = \frac{2.93 \times 10^{-6} \text{ m/s}}{814,243 \text{ m/s}} = 3.60 \times 10^{-12}$$

Calculando la velocidad real en las líneas de flujo:

$$u_{\text{máx}} = \frac{3.60 \times 10^{-12} (9.81 \text{ m/s}^2) (0.50 \text{ m})^2}{2 (1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})} = 4.40 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad \text{o bien,}$$

$$u_{\text{máx}} = \frac{3}{2} (2.93 \times 10^{-6} \text{ m/s}) = 4.40 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

#### IV.2.1 REACTOR CON DOS MAMPARAS



Para el caso del reactor con dos mamparas, hay cinco zonas a lo largo del canal. En cada una de ellas se calculó el Número de Froude y el Número de Reynolds, para determinar el tipo de flujo en cada zona, las cuales se describen a continuación.

##### a) ZONA 1: Área ubicada a la entrada de la laguna

Tomando en consideración los datos del reactor, se obtiene:



$$A_1 = 0.50 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.15 \text{ m}^2$$

$$Q_1 = \frac{0.270 \text{ m}^3}{7 \text{ d}} = 0.038 \text{ m}^3/\text{d} = 4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

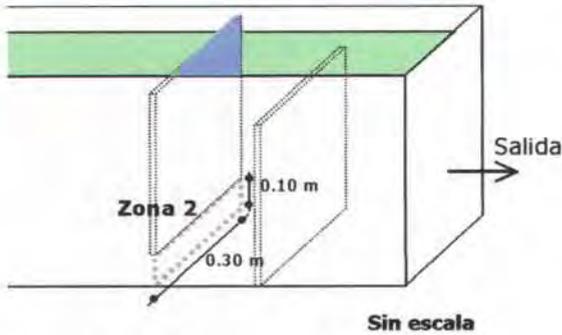
$$v_1 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.15 \text{ m}^2} = 2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 25.71 \text{ cm/d}$$

$$R_{hl} = \frac{(0.50 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.50 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.094 \text{ m}$$

$$N_{Re1} = \frac{4(2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s})(0.094 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} (20^\circ \text{ C})} = 1.11 \quad \text{Laminar}$$

$$N_{Fr1} = \frac{2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.094 \text{ m}}} = 3.10 \times 10^{-6} \quad \text{Estable}$$

**Figura 4.5** Ubicación de la zona 1, en el reactor con 2 mamparas

**b) ZONA 2:** Área ubicada sobre la primera mampara

**Figura 4.6** Ubicación de la zona 2, dentro del reactor con 2 mamparas

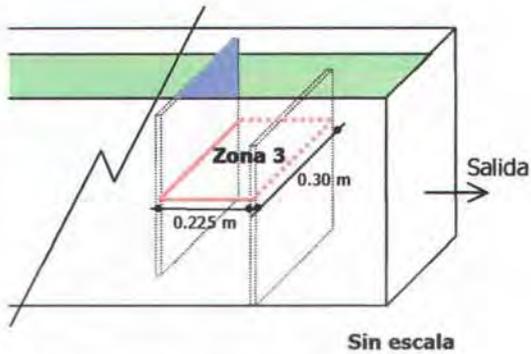
$$A_2 = 0.10 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.03 \text{ m}^2$$

$$v_2 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.03 \text{ m}^2} = 1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 128.45 \text{ cm/d}$$

$$R_{h2} = \frac{(0.10 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.10 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.0375 \text{ m}$$

$$N_{Re2} = \frac{4(1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s})(0.0375 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 2.21 \text{ Laminar}$$

$$N_{Fr2} = \frac{1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.0375 \text{ m}}} = 2.44 \times 10^{-5} \text{ Estable}$$

**c) ZONA 3:** Área comprendida entre las dos mamparas

**Figura 4.7** Ubicación de la zona 3, dentro del reactor con 2 mamparas

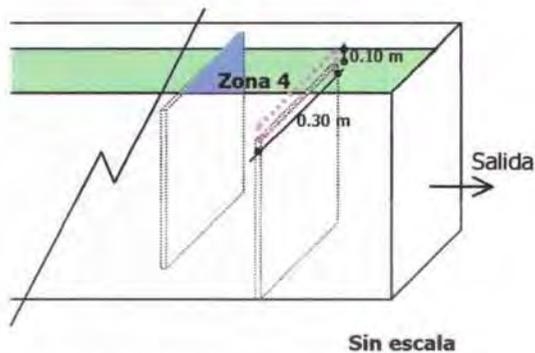
$$A_3 = 0.225 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.0675 \text{ m}^2$$

$$v_3 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.0675 \text{ m}^2} = 6.61 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 57.09 \text{ cm/d}$$

$$R_{h3} = \frac{(0.225 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.225 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.064 \text{ m}$$

$$N_{Re3} = \frac{4(6.61 \times 10^{-6} \text{ m/s})(0.064 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.69 \text{ Laminar}$$

$$N_{Fr3} = \frac{6.61 \times 10^{-6} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.064 \text{ m}}} = 8.34 \times 10^{-6} \text{ Estable}$$

**d) ZONA 4:** Área ubicada bajo la segunda mampara

**Figura 4.8** Ubicación de la zona 4, dentro del reactor con 2 mamparas

$$A_4 = 0.10 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.03 \text{ m}^2$$

$$v_4 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.03 \text{ m}^2} = 1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 128.45 \text{ cm/d}$$

$$R_{h4} = \frac{(0.10 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.10 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.0375 \text{ m}$$

$$N_{Re4} = \frac{4(1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s})(0.0375 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 2.21 \text{ Laminar}$$

$$N_{Fr4} = \frac{1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.0375 \text{ m}}} = 2.44 \times 10^{-5} \text{ Estable}$$

e) **ZONA 5:** Área comprendida entre la segunda mampara y la salida de la laguna

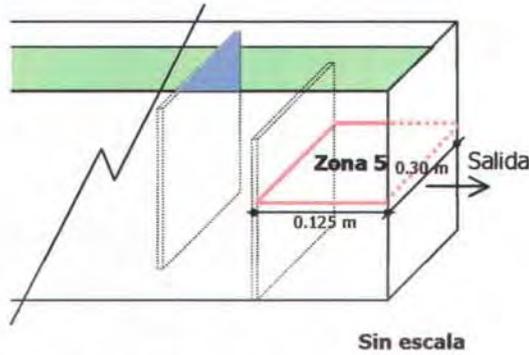


Figura 4.9 Ubicación de la zona 5, dentro del reactor con 2 mamparas

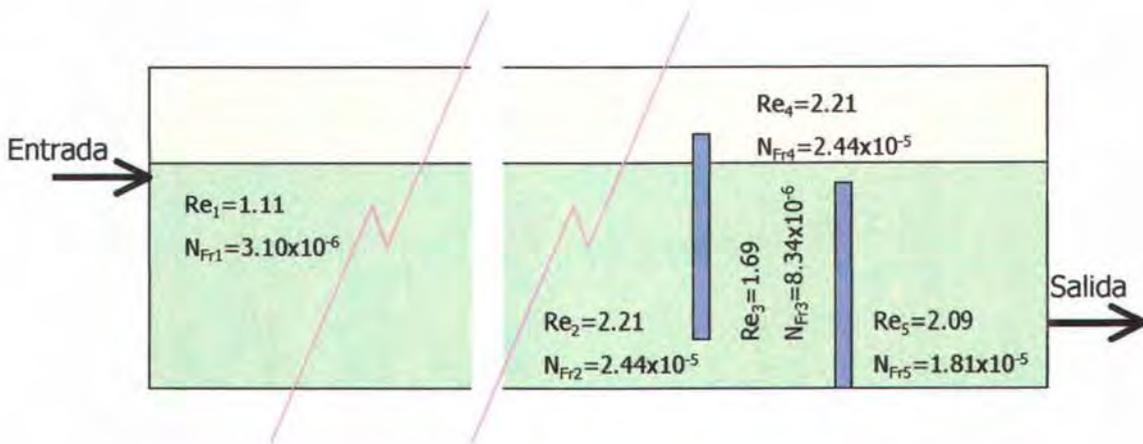
$$A_5 = 0.125 \text{ m} \cdot 0.30 \text{ m} = 0.0375 \text{ m}^2$$

$$v_5 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.0375 \text{ m}^2} = 1.19 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 102.76 \text{ cm/d}$$

$$R_{h5} = \frac{(0.125 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.125 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.044 \text{ m}$$

$$N_{Re5} = \frac{4(1.19 \times 10^{-5} \text{ m/s})(0.044 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 2.09 \text{ Laminar}$$

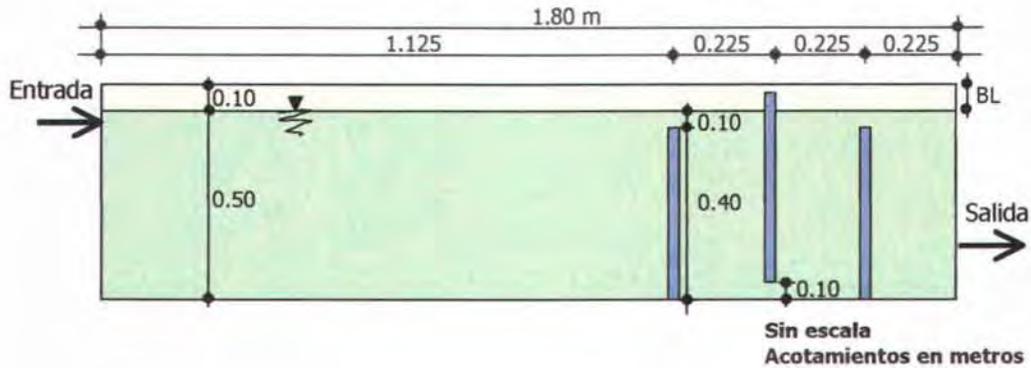
$$N_{Fr5} = \frac{1.19 \times 10^{-5} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.044 \text{ m}}} = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Estable}$$



Zona	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	Número de Froude	Tipo de flujo
1	0.150	2.97x10 <sup>-6</sup>	1.11	10 <sup>-6</sup>	Subcrítico – Laminar
2	0.030	1.48x10 <sup>-5</sup>	2.21	10 <sup>-5</sup>	Subcrítico – Laminar
3	0.0675	6.61x10 <sup>-6</sup>	1.69	10 <sup>-6</sup>	Subcrítico – Laminar
4	0.030	1.48x10 <sup>-5</sup>	2.21	10 <sup>-5</sup>	Subcrítico – Laminar
5	0.0375	1.19x10 <sup>-5</sup>	2.09	10 <sup>-5</sup>	Subcrítico – Laminar

Durante todo el paso del fluido a través del reactor se mantendrá un flujo **subcrítico laminar**, lo cual nos garantiza que no se presentarán condiciones de turbulencia por la presencia de las mamparas.

**IV.2.2 REACTOR CON TRES MAMPARAS**



En el reactor con tres mamparas se presentan siete zonas. Nuevamente se calcula el Número de Froude y el Número de Reynolds, para determinar el tipo de flujo en el reactor. El volumen es el mismo que el utilizado en el caso de las dos mamparas.

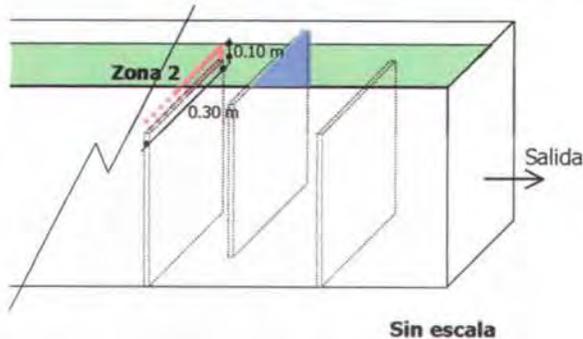
**a) ZONA 1:** Área ubicada a la entrada de la laguna



Los resultados son los mismos que en la zona 1 con 2 mamparas, es decir, se presenta un flujo laminar – estable.

**Figura 4.10** Ubicación de la zona 1, en el reactor con 3 mamparas

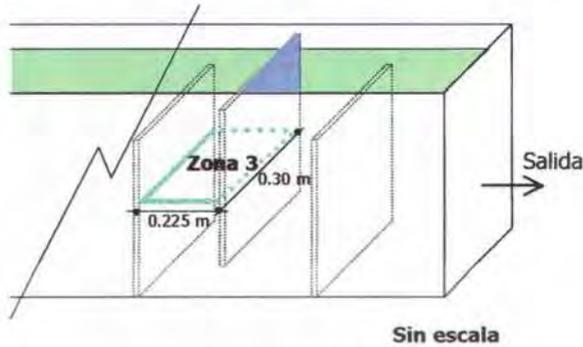
**b) ZONA 2:** Área ubicada sobre la primera mampara



Los resultados obtenidos son los mismos que para el caso de la zona 2 con 2 mamparas, obteniéndose un flujo laminar – estable.

**Figura 4.11** Ubicación de la zona 2, dentro del reactor con 3 mamparas

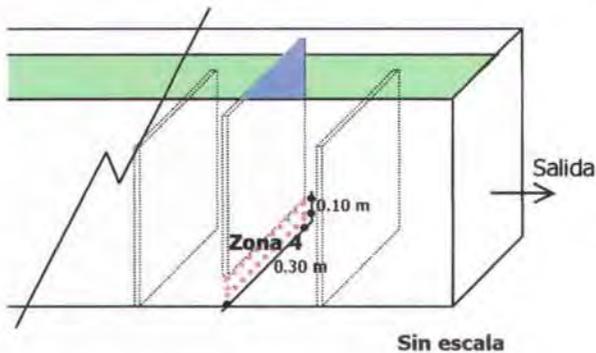
**c) ZONA 3:** Área ubicada entre la primera y la segunda mampara



Se obtienen los mismos resultados que para el caso de la zona 3 con 2 mamparas, lográndose condiciones de flujo laminar – estable.

**Figura 4.12** Ubicación de la zona 3, dentro del reactor con 3 mamparas

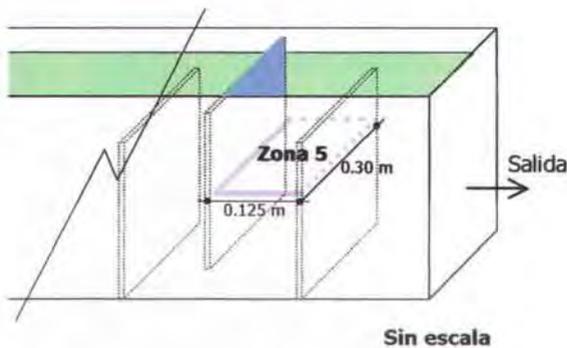
**d) ZONA 4:** Área ubicada bajo la segunda mampara



En ésta zona se obtienen los mismos resultados que en la zona 4 con 2 mamparas, existiendo flujo laminar – estable.

**Figura 4.13** Ubicación de la zona 4, dentro del reactor con 3 mamparas

**e) ZONA 5:** Área comprendida entre la segunda y la tercera mampara



$$A_5 = 0.225 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.0675 \text{ m}^2$$

$$v_5 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.0675 \text{ m}^2} = 6.61 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 57.09 \text{ cm/d}$$

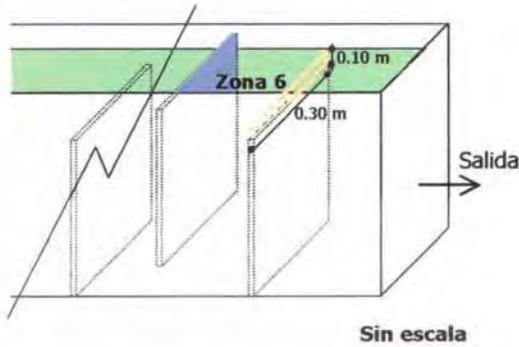
$$R_{h5} = \frac{(0.225 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.225 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.064 \text{ m}$$

$$N_{Re5} = \frac{4(6.61 \times 10^{-6} \text{ m/s})(0.064 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.69 \quad \text{Laminar}$$

$$N_{Fr5} = \frac{6.61 \times 10^{-6} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.064 \text{ m}}} = 8.34 \times 10^{-6} \quad \text{Estable}$$

**Figura 4.14** Ubicación de la zona 5, dentro del reactor con 3 mamparas

**f) ZONA 6:** Área ubicada sobre la tercera mampara



$$A_6 = 0.10 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.03 \text{ m}^2$$

$$v_6 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.03 \text{ m}^2} = 1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 128.45 \text{ cm/d}$$

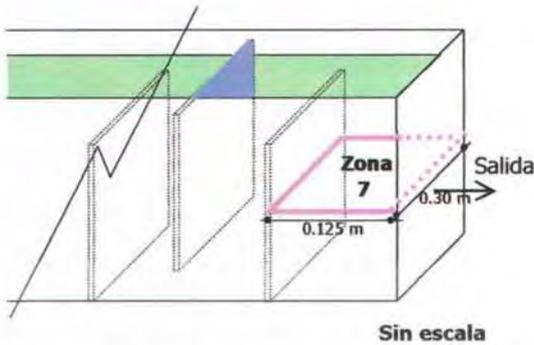
$$R_{h6} = \frac{(0.10 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.10 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.0375 \text{ m}$$

$$N_{Re6} = \frac{4(1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s})(0.0375 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 2.21 \text{ Laminar}$$

$$N_{Fr6} = \frac{1.48 \times 10^{-5} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.0375 \text{ m}}} = 2.44 \times 10^{-5} \text{ Estable}$$

**Figura 4.15** Ubicación de la zona 6, dentro del reactor con 3 mamparas

**g) ZONA 7:** Área comprendida entre la tercera mampara y la salida de la laguna



$$A_7 = 0.125 \text{ m} * 0.30 \text{ m} = 0.0375 \text{ m}^2$$

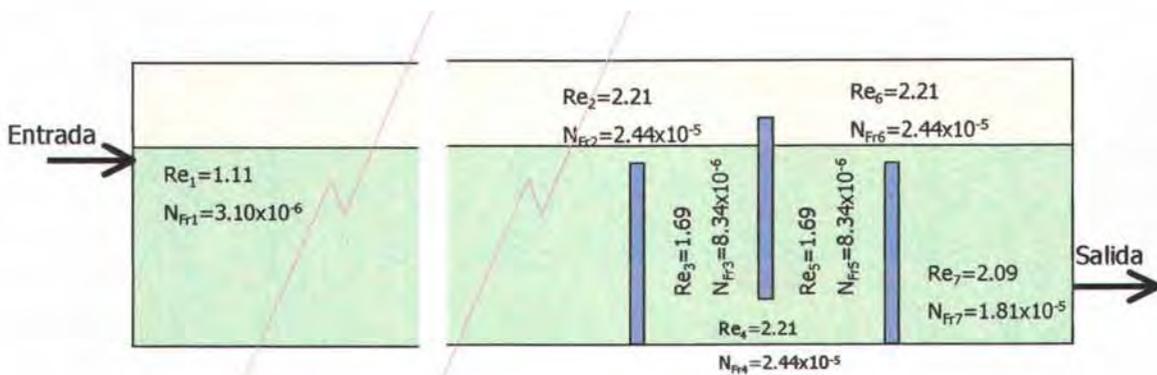
$$v_7 = \frac{4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}}{0.0375 \text{ m}^2} = 1.19 \times 10^{-5} \text{ m/s} = 102.76 \text{ cm/d}$$

$$R_{h7} = \frac{(0.125 \text{ m})(0.30 \text{ m})}{2(0.125 \text{ m} + 0.30 \text{ m})} = 0.044 \text{ m}$$

$$N_{Re7} = \frac{4(1.19 \times 10^{-5} \text{ m/s})(0.044 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 2.09 \text{ Laminar}$$

$$N_{Fr7} = \frac{1.19 \times 10^{-5} \text{ m/s}}{\sqrt{9.81 \text{ m/s}^2 * 0.044 \text{ m}}} = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Estable}$$

**Figura 4.16** Ubicación de la zona 7, dentro del reactor con 3 mamparas



Zona	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	Número de Froude	Tipo de flujo
1	0.150	2.97x10 <sup>-6</sup>	1.11	10 <sup>-6</sup>	Subcrítico – Laminar
2	0.030	1.48x10 <sup>-5</sup>	2.21	10 <sup>-5</sup>	Subcrítico – Laminar
3	0.0675	6.61x10 <sup>-6</sup>	1.69	10 <sup>-6</sup>	Subcrítico – Laminar
4	0.030	1.48x10 <sup>-5</sup>	2.21	10 <sup>-5</sup>	Subcrítico – Laminar
5	0.0675	6.61x10 <sup>-6</sup>	1.69	10 <sup>-6</sup>	Subcrítico – Laminar
6	0.030	1.48x10 <sup>-5</sup>	2.21	10 <sup>-5</sup>	Subcrítico – Laminar
7	0.0375	1.19x10 <sup>-5</sup>	2.09	10 <sup>-5</sup>	Subcrítico – Laminar

Los resultados indican que el flujo es **subcrítico laminar**, lo que garantiza que no hay condiciones de turbulencia por la presencia de las tres mamparas.

### IV.3 CRITERIO DE DISEÑO PARA LAS LAGUNAS FACULTATIVAS

El modelo de flujo disperso o de mezcla parcial se utilizó en la revisión del diseño de las lagunas para las reducciones de DBO, porque las características de flujo en estos reactores no es ni de mezcla completa ni de flujo pistón.

De acuerdo con Wehner y Wilhelm (1958), citado en Romero (1998), para un reactor en flujo no ideal:

$$\frac{L_e}{L_i} = \frac{4 a e^{1/2d}}{\left[ (1+a)^2 \right] e^{a/2d} - \left[ (1-a)^2 \right] e^{-a/2d}} \quad (4.11)$$

Donde:

$L_e$  = concentración de la DBO<sub>5</sub> en el efluente, en mg/l

$L_i$  = concentración de la DBO<sub>5</sub> en el influente, en mg/l

$$a = \sqrt{1 + 4 K \theta d} \quad (4.12)$$

$K$  = constante de reacción de primer orden de la DBO a la temperatura de diseño, en d<sup>-1</sup>

$\theta$  = tiempo de retención hidráulico, en d

$d$  = grado de dispersión del flujo, adimensional

En Romero (1998), con base en las propiedades geométricas de las lagunas se calcula la dispersión mediante la fórmula desarrollada por Polprasert:

$$d = \frac{0.184 [\theta v (W + 2 Z)]^{0.489} W^{1.511}}{(L Z)^{1.489}} \quad (4.13)$$

Donde:

$\theta$  = tiempo de retención hidráulico, en s

$v$  = viscosidad cinemática del agua, en m<sup>2</sup>/s

$L$  = largo de la laguna en dirección del flujo, en m

$W$  = ancho de la laguna, en m

$Z$  = profundidad media de la laguna, en m

En Romero (1998), en lagunas de estabilización para aguas residuales domésticas Thirimurthy propone la relación:

$$K = 0.15 (1.072)^{T-20} \quad (4.14)$$

Donde:

T = temperatura de diseño, en °C

La carga superficial de una laguna ( $\lambda_s$ , kg/ha d), está dada por<sup>35</sup>:

$$\lambda_s = \frac{10 L_1 Q_{med}}{A_f} \quad (4.15)$$

Donde:

$Q_{med}$  = gasto medio, en m<sup>3</sup>/d

$A_f$  = área a la profundidad media de la laguna facultativa, en m<sup>2</sup>

Existen varias ecuaciones para el cálculo de  $\lambda_s$ . Sin embargo, de acuerdo con el IMTA (1994), citado en Rolim (2000), la ecuación que más se aplica a las condiciones de México (en kg DBO<sub>5</sub>/ha d) es:

$$\lambda_s = 250 (1.085)^{T_{mm}-20} \quad (4.16)$$

Donde:

$T_{mm}$  = temperatura media mensual mínima del aire, en °C

Una vez que el valor de  $\lambda_s$  ha sido seleccionado, se calcula el área de la laguna de acuerdo con la ecuación (4.15). El tiempo de residencia hidráulico ( $\theta_f$ , d)<sup>35</sup>:

$$\theta_f = \frac{A_f Z}{Q_{med}} \quad (4.17)$$

Assumiendo una relación largo/ancho (X) entre 3 y 8, se calcula el ancho de la laguna y después el largo de la misma. Citado en Pearson (1994), Yáñez (1992) menciona que las relaciones largo/ancho mayores de 8 no son recomendables, ya que los reactores a flujo pistón son muy sensibles a cargas pico y tienen un considerable tiempo de recuperación.

$$W = \sqrt{\frac{A_f}{X}} \quad (4.18)$$

$$L = W X \quad (4.19)$$

La remoción de DBO en lagunas facultativas primarias es generalmente del 70 al 80% basada en muestras no filtradas (esto es, incluyendo la DBO ejercida por las algas), y superior del 90% basado en muestras filtradas. En lagunas facultativas secundarias la remoción es menor, pero el funcionamiento combinado de lagunas anaerobias y lagunas facultativas secundarias generalmente se aproxima (o es ligeramente mejor que) a la asegurada por las lagunas facultativas primarias<sup>39</sup>.

Citado en Rolim (2000), para calcular la remoción de DBO<sub>5</sub> soluble se utiliza la correlación de carga, de Yáñez (1993):

$$\lambda_{sr} = 0.765 \lambda_s - 0.80 \quad (4.20)$$

Donde:

$\lambda_{sr}$  = carga superficial removida, en kg DBO<sub>5</sub>/ha d

Es necesario realizar el cálculo de la constante de reacción de la DBO<sub>5</sub> total. De acuerdo con la Ley de Chick, para una reacción de primer orden se tiene:

$$\begin{aligned}\frac{d\text{DBO}}{dt} &= -K \text{ DBO} \\ \int_{\text{DBO}_o}^{\text{DBO}_f} \frac{d\text{DBO}}{\text{DBO}} &= -K \int_0^t dt \\ \text{Ln} \frac{\text{DBO}_f}{\text{DBO}_o} &= -K t\end{aligned}$$

De manera que,

$$K = \frac{\text{Ln} (\text{DBO}_o / \text{DBO}_f)}{t_t} \quad (4.21)$$

Donde:

- K = constante de reacción de la DBO<sub>5</sub> total, en d<sup>-1</sup>
- DBO<sub>o</sub> = concentración de la DBO<sub>5</sub> en el influente, en mg/l
- DBO<sub>f</sub> = concentración de la DBO<sub>5</sub> en el efluente, en mg/l
- t<sub>t</sub> = periodo transcurrido entre la primera y la última DBO medida, en d

### IV.3.1 REVISIÓN DEL DISEÑO DE LAS LAGUNAS

Debido a que los reactores utilizados habían sido construidos con anterioridad, es necesario realizar la verificación de los cálculos, con los parámetros ya definidos, para conocer las remociones que se pueden obtener con tales dimensiones.

De esta manera, la relación L/W:

$$X = \frac{1.80 \text{ m}}{0.30 \text{ m}} = 6$$

El área de la profundidad media de la laguna:

$$A_f = (0.30 \text{ m})^2 (6) = 0.54 \text{ m}^2$$

Tiempo de residencia hidráulico:

$$\theta_f = \frac{0.54 \text{ m}^2 (0.50 \text{ m})}{0.038 \text{ m}^3/\text{d}} = 7 \text{ días}$$

Carga superficial:

$$\lambda_s = \frac{10 L_i Q_{med}}{A_f} = \frac{10 (96 \text{ mg/l}) (0.038 \text{ m}^3/\text{d})}{0.54 \text{ m}^2} = 67 \text{ kg DBO}_5/\text{ha d}$$

En climas cálidos, donde la temperatura ambiental mínima promedio mensual, es mayor a 15°C, la carga orgánica superficial se recomienda esté en el rango de los 45 a los 90 kg DBO<sub>5</sub>/ha d<sup>12</sup>.

Remoción de la DBO<sub>5</sub> soluble:

$$\lambda_{sr} = 0.765 (67 \text{ kg DBO}_5/\text{ha d}) - 0.8 = 50 \text{ kg DBO}_5/\text{ha d}$$

Para realizar el cálculo de K (ecuación 4.14) es necesario el valor de la temperatura de diseño. En la tabla siguiente se presenta la temperatura ambiental mínima observada de 1982 al 2000 en la EHCA-IMTA, ubicada dentro de las instalaciones del propio Instituto.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	MÍNIMA ANUAL
1982	10.0	10.0	10.0	15.5	15.5	15.5	13.5	13.5	14.0	11.5	8.0	6.5	6.5
1983	7.5	6.5	8.0	12.5	14.5	15.0	13.5	14.0	13.5	10.5	11.0	10.0	6.5
1984	6.0	9.5	12.0	13.5	13.0	14.0	14.5	14.0	12.0	13.0	8.0	8.5	6.0
1985	9.5	9.5	11.5	12.0	13.5	14.5	13.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	9.0
1986	7.0	10.0	7.5	13.5	14.0	15.0	12.0	14.0	13.5	9.5	10.0	10.0	7.0
1987	7.0	10.0	8.0	12.0	12.0	12.5	13.5	14.0	15.0	10.0	9.0	11.0	7.0
1988	4.0	9.0	10.0	10.0			12.0						4.0
1989	6.0	5.0	8.0	14.0	15.5	15.0	14.0	14.0	14.0	11.0	11.0	10.0	5.0
1990	12.0	12.5	9.0	13.0	14.0	14.5	13.0	11.0	14.0	12.0	6.5	8.0	6.5
1991	9.0	12.0	12.0	14.0	15.0	16.0	13.5	11.0	12.5	10.5	9.0	8.0	8.0
1992	10.5	8.0	12.0	13.0	13.0	15.0	13.0	14.0	13.0	11.5	10.5	9.5	8.0
1993	9.5	9.0	11.0	12.0	12.0	17.0	12.0	14.0	14.0	13.0	11.0	9.0	9.0
1994	8.0	12.0	12.0	14.0	16.0	15.0	14.0	14.0	13.0	13.0	11.0	10.0	8.0
1995	11.0	10.0	12.0	13.0	16.0								10.0
1996	7.0	7.5	8.0	13.0	16.0	13.0	13.5	13.5	14.0	11.0	8.0	10.5	7.0
1997	7.5	11.0	11.5	11.5	14.0	15.0	13.0	14.0	14.0	12.5	11.5	8.0	7.5
1998	7.0	6.0	10.5	15.0	15.0	16.0	12.0	13.5	16.0	14.0	11.0	9.0	6.0
1999	6.0	8.0	12.0	9.0	13.0	15.0	11.5	14.0	12.0	7.5	6.0	7.5	6.0
2000	6.5	8.5	12.0	13.0	13.5	15.0	13.5	14.7	13.3	12.7	10.4	9.0	6.5
<b>MÍNIMA MENSUAL</b>	<b>4.0</b>	<b>5.0</b>	<b>7.5</b>	<b>9.0</b>	<b>12.0</b>	<b>12.5</b>	<b>11.5</b>	<b>11.0</b>	<b>12.0</b>	<b>7.5</b>	<b>6.0</b>	<b>6.5</b>	<b>4.0</b>

En el mes de enero de 1988 se presentó la temperatura mínima (4°C) y para los cálculos se tomó la temperatura promedio de ese mes más frío, siendo de 17°C.

Citado en Rolim (2000), Vargas y Sánchez (1972) proponen la siguiente ecuación para el cálculo de la temperatura del agua, utilizando la temperatura ambiental<sup>39</sup>:

$$T_{\text{agua}} = 3.685 + 1.137 T_{\text{aire}} \quad (4.22)$$

$$T_{\text{agua}} = 3.685 + 1.137(17)$$

$$T_{\text{agua}} = 23^{\circ}\text{C}$$

La constante de reacción de la DBO, a la temperatura de diseño:

$$K = 0.15 (1.072)^{17-20}$$

$$K = 0.12 \text{ d}^{-1}$$

El grado de dispersión:

$$d = \frac{0.184 \left\{ [604800 \text{ s} (1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})] [0.30 \text{ m} + 2(0.50 \text{ m})] \right\}^{0.489} (0.30 \text{ m})^{1.511}}{[(1.80 \text{ m})(0.50 \text{ m})]^{1.489}}$$

$$d = 0.03$$

Para reactor en flujo no ideal:

$$a = \sqrt{1 + \{4(0.12 \text{ d}^{-1})(7 \text{ d})(0.03)\}} = 1.05$$

$$\frac{L_e}{L_i} = \frac{4(1.05)e^{[1/2(0.03)]}}{[(1+1.05)^2]e^{[1.05/2(0.03)]} - [(1-1.05)^2]e^{[-1.05/2(0.03)]}} = 0.43$$

$$L_e = 0.43 \text{ (96 mg/l)}$$

$$L_e = 41 \text{ mg/l}$$

Se debe verificar, además, que la carga de diseño sea menor a la que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L_a = 357.40 \bar{o}^{T-20} \quad (4.23)$$

Donde:

$L_a$  = carga orgánica por unidad de área, en kg /ha d  
 $\bar{O}$  = parámetro teta de Arrhenius = 1.07

Sustituyendo valores:

$$L_a = 357.40 \bar{o}^{(17-20)} = 291.74 \text{ kg DBO}_5 / \text{ha d}$$

Es decir, se cumple con lo establecido anteriormente, al ser menor que la carga de diseño.

De acuerdo al *régimen de flujo*, los sistemas son de flujo pistón si se tiene un grado de dispersión  $d \leq 0.2$  y una relación largo/ancho  $X \geq 3$ . Asimismo, de acuerdo a la *carga orgánica* por unidad de superficie, las lagunas son facultativas cuando la carga por unidad de superficie es  $< 357 \text{ kg/ha d}$ .

Como en este caso se cumplen ambas condiciones, se puede decir que **el sistema es facultativo, de flujo pistón**. Dicho tipo de flujo es el que presenta mayor eficiencia de remoción de contaminantes. Así mismo, se trata de un sistema regido principalmente por las leyes de flujo laminar en canales abiertos.

#### IV.4 CRITERIO DE DISEÑO PARA LAS MAMPARAS SUMERGIDAS

Varios investigadores coinciden en que el uso de mamparas sumergidas mejora la eficiencia del proceso, afectando el patrón de flujo de la hidráulica del sistema y reduciendo el corto circuito. Además, se han obtenido remociones en nitrógeno total, nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos totales, así como reducción en el número de dispersión.

De acuerdo con la búsqueda bibliográfica se ha encontrado que no existen guías o instrucciones para el diseño de las mamparas sumergidas. Cigana *et al.*, (1998) proponen un criterio de diseño deducido de un estudio piloto en un modelo de 17 metros con distintos flujos. El objetivo del estudio fue la deducción de dicho criterio mediante el uso de flotantes como envolturas de dulces, cotonetes, bolsas tipo zip-loc, etc. La información obtenida puede ser utilizada con dos fines completamente diferentes: para el correcto diseño de una nueva cámara o para evaluar la eficiencia de cámaras ya existentes.

##### IV.4.1 TEORÍA DE LA SUSPENSIÓN <sup>6</sup>

Una suspensión ocurre cuando un material alcanza un estado de equilibrio entre la gravedad y las fuerzas de flotación y no está en contacto con la superficie libre o el fondo del canal.

La velocidad vertical efectiva de un flotante en una suspensión ( $w'$ ) se obtiene al sustraerle la influencia de la turbulencia a la velocidad vertical del flotante aún en el agua,  $w$ .

$$w' = w - w_{(\text{turbulencia})} \quad (4.24)$$

La influencia de la turbulencia está dada en relación al número de Rouse ( $N_z$ ). Es decir,

$$N_z = \frac{w_{(\text{turbulencia})}}{k_v U^*} \quad (4.25)$$

Donde:

$k_v$  = Constante de Von Kármán = 0.40 para todos los fluidos homogéneos

$$U^* = v n_M \sqrt{\frac{g}{R_h^{1/3}}} \quad (4.26)$$

$n_M$  = Coeficiente de Manning = 0.010 (para cemento muy pulido o madera muy bien cepillada; como en este caso las paredes son de acrílico, este valor es el que más se asemeja a las condiciones de la cámara), adimensional

$g$  = Aceleración de la gravedad = 9.81 m/s<sup>2</sup>

$R_h$  = Radio hidráulico de la sección, en m

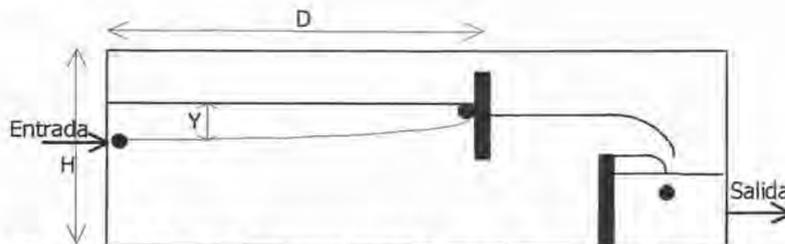
Por lo que:

$$w' = w - k_v N_{ZCR} U^* \quad (4.27)$$

$$w = w' + k_v N_{ZCR} U^* \quad (4.28)$$

Donde:

$N_{ZCR}$  = Número de Rouse crítico



**Figura 4.17** Vista esquemática de la trayectoria del flotante en una cámara con mamparas sumergidas

Fuente: Cigana *et al.*, (1998)

Si el flotante es interceptado por una mampara en una distancia horizontal dada, llamada  $D$ , cuando su velocidad horizontal es  $v$  y la distancia vertical por recorrer es  $Y$  (Figura 4.17), entonces la velocidad vertical efectiva  $w'$  se convierte en:

$$w'(D) \geq \frac{Y v}{D} \quad (4.29)$$

De manera que la ecuación (4.28) puede ser reescrita como:

$$w = \frac{Y v}{D} + k_v N_{ZCR} U^* \quad (4.30)$$

La literatura muestra que el rango para los valores del  $N_{ZCR}$  va de 1 a 4, de esa manera los valores dados para  $w$  quedan en el rango de:

$$\frac{Y v}{D} + 0.40 U^* \leq w \leq \frac{Y v}{D} + 1.60 U^* \quad (4.31 \text{ y } 4.32)$$

#### IV.4.2 DISEÑO DE LA LONGITUD DE LA CÁMARA <sup>6</sup>

La longitud de la cámara es la más importante de las tres longitudes requeridas para un diseño adecuado. Es decir:

$$\text{Long} = L_{CR} + L_{mampara} + L_{salida} \quad (4.33)$$

Donde:

Long = longitud mínima requerida para la cámara, en m

$L_{CR}$  = Distancia crítica entre la primera y la segunda mampara sumergida, en m

$L_{mampara}$  = Distancia entre la primera y la segunda mampara sumergida, en m

$L_{salida}$  = Distancia de la segunda mampara a la pared de salida de la cámara, en m

La distancia crítica,  $L_{CR}$ , es la longitud mínima que permite que el flotante de diseño alcance la superficie, donde será retenido por la mampara. La distancia  $L_{CR}$  debe ser mucho más grande que las otras dos pequeñas dimensiones. Después de seleccionar el ancho y la profundidad, el diseñador puede calcular la longitud mínima de la cámara con la ecuación siguiente:

$$L_{CR} = v \frac{Y}{W} \quad (4.34)$$

Donde:

$v$  = Velocidad promedio del flujo =  $\frac{Q_{diseño}}{W * Z}$ , en m/s

$Y$  = Profundidad vertical máxima que el flotante tendrá que recorrer, en m

#### IV.4.3 LOCALIZACIÓN Y PROFUNDIDAD DE LAS MAMPARAS

No existe un consenso entre los diseñadores en la localización de las mamparas. De hecho, de acuerdo con Cigana *et al.*, (1998) no existen estudios creíbles al respecto. Parece ser que la eficiencia del sistema se ve afectada por la localización y profundidad de la mampara.

En dicho estudio se probó con mamparas a profundidades de 15, 30 y 50 cm, obteniéndose la mejor remoción de objetos flotantes al utilizar la mayor profundidad.

Debido a que no se podía utilizar una mampara con la profundidad recomendada en el estudio, por tener la misma profundidad que la de las lagunas utilizadas, se optó porque las mismas tuvieran 40 cm de profundidad para tratar de obtener las mejores eficiencias de remoción. Se dejó una longitud vertical equivalente al 20% de la profundidad total, para el paso del flujo, el cual no provoca turbulencia.

De cualquier forma no se recomienda que las mamparas sean muy profundas, ya que si se colocan muy cerca del fondo de la cámara crearán condiciones desfavorables bajo la mampara y puede provocar los siguientes problemas:

- Incrementar la velocidad local y la turbulencia bajo la mampara. En consecuencia, disminución de la eficiencia debido a la reintroducción de los flotantes ya interceptados por la mampara
- Posible desbordamiento ocasionado por la restricción en el flujo

#### IV.4.4 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD VERTICAL DEL FLOTANTE

Los principios que gobiernan la sedimentación de una partícula en un fluido son aplicables para la eliminación de los sólidos en suspensión de un río o lago o en el tratamiento de aguas residuales<sup>16</sup>.

La velocidad de asentamiento de una partícula es una función de la gravedad específica y el diámetro de la partícula, y de la gravedad específica y viscosidad del fluido<sup>26</sup>.

Considerando la situación de que una partícula individual se sedimenta a una velocidad  $w$  en un fluido estático. Por acción de la gravedad una partícula que cae se acelera hasta que la resistencia al avance por fricción del fluido equilibra la aceleración gravitatoria, después de lo cual continúa cayendo a una velocidad constante que se conoce como la velocidad de sedimentación terminal  $w_t$ . Esta velocidad se calcula haciendo un balance de fuerzas sobre la partícula (Figura 4.18)<sup>16</sup>.

$$F_R = F_E - F_B - F_D \quad (4.35)$$

Donde:

$F_E$  = Fuerza externa sobre la partícula, en este caso, la gravedad

$F_B$  = Fuerza de flotación

$F_D$  = Fuerza de fricción o de resistencia al avance que se opone a la sedimentación de la partícula

$F_R$  = Fuerza resultante (igual a cero cuando se alcanza la velocidad terminal)

Estas fuerzas se pueden expresar como

$$F_R = M \frac{dw}{dt} \quad (4.36)$$

$$F_E = M a_E = M g \quad (4.37)$$

$$F_B = \frac{\rho}{\rho_p} M a_E = \frac{\rho}{\rho_p} M g \quad (4.38)$$

Donde:

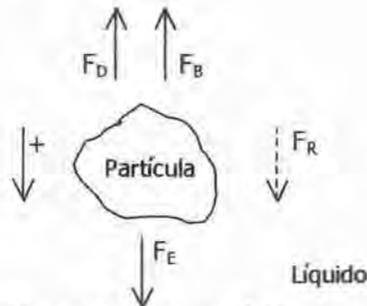
$M$  = Masa de la partícula

$w$  = Velocidad de sedimentación de la partícula

$a_E$  = Aceleración, igual a  $g$  para sedimentación gravitatoria

$\rho$  = Densidad del fluido

$\rho_p$  = Densidad de la partícula



**Figura 4.18** Fuerzas que actúan sobre una partícula que se sedimenta en un fluido estático  
Fuente: Henry *et al.*, (1999)

Sustituyendo las ecuaciones (4.36), (4.37) y (4.38) en la ecuación (4.35) y reordenando:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - \frac{F_D}{M} \quad (4.39)$$

Experimentalmente, se ha encontrado que

$$F_D = \frac{C_D A_p \rho w^2}{2} \quad (4.40)$$

Donde:

$C_D$  = Coeficiente de resistencia al avance (o de fricción), adimensional

$A_p$  = Área proyectada de la partícula en ángulo recto a la dirección de sedimentación

Sustituyendo (4.40) en (4.39)

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - \frac{C_D A_p \rho w^2}{2M} \quad (4.41)$$

Si se supone que la partícula es esférica

$$\frac{A_p}{M} = \frac{\pi d_p^2 / 4}{(\pi d_p^3 / 6) \rho_p} = \frac{3}{2 \rho_p d_p} \quad (4.42)$$

Donde:

$d_p$  = Diámetro de la partícula

Sustituyendo (4.42) en (4.41)

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - \frac{3 C_D \rho w^2}{4 \rho_p d_p} \quad (4.43)$$

La velocidad de sedimentación terminal  $w_t$  se alcanza muy pronto. En ese punto

$$\frac{dw}{dt} = 0 \quad (4.44)$$

Por lo tanto, despejando  $w_t$

$$w_t = \left[ \frac{4g(\rho_p - \rho)d_p}{3C_D\rho} \right]^{1/2} \quad (4.45)$$

La ecuación (4.45) es aplicable a partículas en proceso de sedimentación ( $\rho_p > \rho$ ), así como a partículas en ascenso ( $\rho_p < \rho$ ), como aceite o aire en agua<sup>16</sup>.

Experimentalmente se ha encontrado que  $C_D$  es una función del número de Reynolds, adimensional

$$C_D = \frac{b}{N_{Re}^m} \quad (4.46)$$

en donde los valores de  $b$  y  $m$  son los que se indican en la tabla siguiente:

Flujo	b	m	Comentarios
Laminar	24.00	1.00	Predomina la resistencia al avance por fricción
Intermedio	18.50	0.60	La resistencia al avance por fricción y por forma son importantes
Turbulento	0.44	0.00	Predomina la resistencia al avance por forma

Para condiciones de flujo laminar,

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} = \frac{24 \mu}{\rho w d_p} \quad (4.47)$$

Sustituyendo (4.47) en (4.45)

$$w_t = \frac{(\rho_p - \rho) g d_p^2}{18 \mu} \quad (4.48)$$

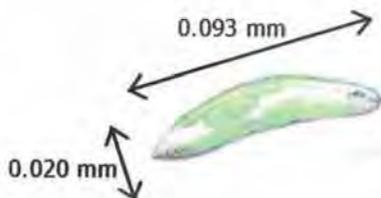
La ecuación (4.48) es la de velocidad terminal de Stokes, aplicable si el flujo es laminar<sup>16</sup>.

Las partículas naturales poseen diversas formas, generalmente diferentes a una esfera, aunque constantemente son parecidas a ellas.

Para el cálculo de la velocidad de asentamiento se decidió utilizar las algas flageladas, por ser las que poseen la capacidad de movimiento en la columna de agua, pudiendo llegar al lugar donde se coloquen las mamparas. Para definir el distanciamiento entre las mamparas en el reactor, se debe determinar la velocidad vertical del tipo de alga.

León (1995) afirma que en las lagunas facultativas predominan las algas flageladas (*Euglena*, *Pyrobotrys*, *Chlamydomonas*). Fritz *et al.*, (1979) comentan que las especies *Euglena*, *Chlorella* y *Chlamydomonas* son las más frecuentemente encontradas. En el anexo II, de las técnicas analíticas se reporta que las especies más comúnmente observadas son la *Euglena* y las *diatomeas*.

Con base en lo anterior, se decidió realizar los cálculos para remoción con las características del alga *Euglena*, cuya densidad relativa es de 1.10 y cuya forma se puede apreciar en la Figura 4.19<sup>5</sup>.



**Figura 4.19** *Euglena* típica  
Fuente: Bold *et al.*, (1978)

$$a = 0.02 \text{ mm} = 0.00002 \text{ m}$$

$$b = 0.093 \text{ mm} = 0.000093 \text{ m}$$

Para igualar las dimensiones a las de una esfera, se considera<sup>4</sup>:

$$d_p = \frac{0.00002 \text{ m} + 0.000093 \text{ m}}{2}$$

$$d_p = 5.65 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Cálculo de  $C_D$ , considerando  $b = 24$  y  $m = 1$

$$C_D = \frac{24}{(1.11)^1} = 21.62$$

Velocidad de caída del alga:

$$w_t = \left[ \frac{4 (9.81 \text{ m/s}^2) (1,100 \text{ kg/m}^3 - 1,000 \text{ kg/m}^3) (5.65 \times 10^{-5} \text{ m})}{3 (21.62) (1,000 \text{ kg/m}^3)} \right]^{1/2}$$

$$w_t = 0.0018 \text{ m/s}$$

#### IV.4.5 VELOCIDAD VERTICAL Y TURBULENCIA<sup>6</sup>

De acuerdo con el estudio realizado por Cigana *et al.*, (1998) se obtuvo una gráfica de  $N_z$  como una función de  $w'$  para la remoción de los flotantes. La ecuación de regresión obtenida es:

$$N_z = 2.89 e^{13.74[w']} \quad (4.49)$$

Se puede escribir la ecuación (4.30) como:

$$w = \frac{Yv}{D} + 2.89 e^{13.74[w']} k_v U^* \quad (4.50)$$

Esta última ecuación puede ser simplificada al considerar solamente la intercepción con  $N_{zCR} = 2.89$ :

$$w = \frac{Yv}{D} + 1.20 U^* \quad (4.51)$$

La ecuación (4.51) se encuentra dentro del rango de valores citados en las ecuaciones (4.31 y 4.32) y proporciona una forma fácil y rápida de obtener resultados.

#### IV.4.6 APLICACIÓN AL SISTEMA

Al retomar los valores para el radio hidráulico, el caudal y la velocidad horizontal obtenidos en el punto IV.2.1 y utilizando las ecuaciones anteriores para determinar la ubicación de la primera mampara en la laguna A, se tiene que:

$$\begin{aligned} R_h &= 0.094 \text{ m} \\ Q &= 4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \\ v &= 2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s} \end{aligned}$$

La velocidad cortante:

$$U^* = (2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s})(0.010) \sqrt{\frac{9.81 \text{ m/s}^2}{(0.094 \text{ m})^{1/3}}} = 1.37 \times 10^{-7} \text{ m/s}$$

Número de Rouse:

$$N_z = \frac{w}{0.40 (1.37 \times 10^{-7} \text{ m/s})} = \frac{w}{5.40 \times 10^{-8} \text{ m/s}}$$

Al sustituir el valor de la velocidad del flotante (en este caso, el alga flagelada) en la ecuación anterior:

$$N_z = \frac{0.0018 \text{ m/s}}{5.40 \times 10^{-8} \text{ m/s}} = 33,333$$

La velocidad vertical efectiva del flotante:

$$\begin{aligned} N_z &= 2.89 e^{13.74[w']} \\ 33,333 &= 2.89 e^{13.74[w']} \\ w' &= 0.68 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Longitud crítica de la cámara:

$$L_{CR} = \left(2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s}\right) \frac{0.50 \text{ m}}{0.68 \text{ m/s}}$$

$$L_{CR} = 21.83 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Considerando las ecuaciones (4.50) y (4.51), se obtiene el valor de D:

$$0.0018 \text{ m} = \frac{(0.50 \text{ m})(2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s})}{D} + 0.40 (1.37 \times 10^{-7} \text{ m/s}) \Rightarrow D = 0.0012 \text{ m}$$

$$0.0018 \text{ m} = \frac{(0.50 \text{ m})(2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s})}{D} + 1.60 (1.37 \times 10^{-7} \text{ m/s}) \Rightarrow D = 0.0012 \text{ m}$$

Como los valores calculados anteriormente son muy pequeños e imprácticos para utilizarse en el reactor, es necesario proponer la distancia entre la entrada de la laguna y la primera mampara, verificando que se cumpla con los supuestos anteriores y las distancias calculadas. En este caso, se decidió no afectar más del 75% de la longitud total de la laguna, proponiéndose la colocación de la primera mampara a 1.35 m de la entrada.

Por lo que, si  $D = 1.35 \text{ m}$ ,  $H = 0.60 \text{ m}$  y  $Z = 0.50 \text{ m}$ , entonces se tiene que, de acuerdo con la ecuación 4.39 la velocidad vertical efectiva es:

$$w' \geq \frac{0.50 \text{ m} (2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s})}{1.35 \text{ m}} = 1.10 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

Se propuso dejar una distancia entre ambas mamparas de 0.225 m. Asimismo, la distancia de la segunda mampara a la salida de la cámara, fue la misma. Es decir, la  $L_{CR} = 1.35 \text{ m}$ , la  $L_{mampara} = 0.225 \text{ m}$  y la  $L_{salida} = 0.225 \text{ m}$ .

Sustituyendo valores en la ecuación (4.33) se determina que la  $L_{long} = 1.80 \text{ m}$ . Siendo estos valores mayores a los calculados mediante las fórmulas anteriores, por lo que se cumple con los supuestos.

## **CAPÍTULO V RESULTADOS OBTENIDOS**

---

Es importante comparar los resultados alcanzados en los distintos parámetros medidos durante ambas corridas, tanto en la laguna con mamparas como en la laguna control. Esto con el fin de determinar su comportamiento y la eficiencia en la remoción de las algas del efluente de la laguna de estabilización.

En el presente capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos; así como también se presenta el monitoreo durante 24 horas del oxígeno disuelto, el pH y la temperatura. Aunado a ello, se muestran además las observaciones al microscopio, en las cuales, se determinaron los tipos de algas presentes en las lagunas.

Al final del capítulo se expone el resultado del diseño de experimentos, aplicado a ambas corridas.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## V.1 CORRIDA 1 (Laguna A con 2 mamparas; Laguna B sin mamparas)

Inició el día viernes 13 de julio de 2001 y concluyó el día jueves 26 de julio del mismo año.

La variable dependiente o de respuesta que se tomó para evaluar el funcionamiento de las lagunas, con mamparas o sin ellas, fue la remoción del parámetro en cuestión, la cual está dada por la fórmula:

$$E_{\text{remoción}} (\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad (5.1)$$

Donde:

$E_{\text{remoción}} (\%)$  = Porcentaje de remoción del parámetro analizado

$P_i$  = Parámetro inicial (p.e. SST<sub>inicial</sub>), en mg/l

$P_f$  = Parámetro final (p.e. SST<sub>final</sub>), en mg/l

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros; así como las remociones alcanzadas. Los valores a la salida y las remociones se presentan tanto para el día cero, como 7 días después (TRH).

Los gráficos muestran los valores correspondientes al día de muestreo y los obtenidos una vez transcurrido el TRH.

### V.1.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Día	SST (mg/l) Con 2 mamparas					SST (mg/l) Control 1				
	Entrada	Salida		E <sub>remoción</sub> (%)		Entrada	Salida		E <sub>remoción</sub> (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Viernes 13 de julio	68	36	45	47	34	68	36	56	47	18
Viernes 13 de julio	68	36	45	47	34	68	36	56	47	18
Domingo 15 de julio	88	36	46	59	48	88	52	70	41	20
Domingo 15 de julio	88	36	46	59	48	88	52	70	41	20
Martes 17 de julio	84	40	47	52	44	84	64	72	24	14
Martes 17 de julio	84	40	47	52	44	84	64	72	24	14
Jueves 19 de julio	88	48	48	45	45	92	68	76	26	17
Jueves 19 de julio	88	48	48	45	45	92	68	76	26	17
Sábado 21 de julio	88	24	47	73	47	100	56	73	44	27
Sábado 21 de julio	88	24	47	73	47	100	56	73	44	27
Lunes 23 de julio	80	44	46	45	43	88	72	70	18	20
Lunes 23 de julio	80	44	46	45	43	88	72	70	18	20
Miércoles 25 de julio	204	76	45	63	78	84	128	67	-52	20
Miércoles 25 de julio	204	76	45	63	78	84	128	67	-52	20
Jueves 26 de julio	84	48	44	43	48	88	76	64	14	27
Jueves 26 de julio	84	48	44	43	48	88	76	64	14	27
<b>PROMEDIO</b>	98	44	46	53	48	87	69	69	20	21

Tabla 5.1 SST medidos en ambas lagunas, durante la corrida 1

Los valores a la entrada de ambas lagunas son muy similares (Tabla 5.1). Sin embargo, el 25 de julio se presentó en la laguna A un incremento considerable de SST a la entrada, mientras que a la laguna B le ocurrió lo contrario, ya que el incremento se aprecia a la salida de la laguna.

Durante la madrugada del día anterior hubo una lluvia de intensidad moderada (3.048 mm a la 1:00 a.m.) y ese mismo día también llovió (2.665 mm a las 7:00 a.m. y 0.718 mm a las 8:00 a.m.). No obstante, dado que los canales utilizados para las lagunas tienen una profundidad pequeña, tal factor afectó provocando una turbulencia dentro de las mismas, de manera tal que el material sedimentado se mezcló con el volumen de agua.

La turbulencia generó valores más altos a la entrada de la laguna con mamparas debido a que la primera mampara le sirvió de tope al paso del material, mezclándose en forma mayor en el área ubicada antes de dicha mampara; mientras que en la laguna control, el incremento ocurrió a la salida. La toma de muestra era a las 8:30 a.m.



**Figura 5.1** Comportamiento de los SST durante la corrida 1, en ambas lagunas

Los SST tuvieron un comportamiento muy similar (Figura 5.1), con excepción del miércoles 25 de julio, en el cual se presenta un pico en la concentración de SST, explicado anteriormente. Las remociones promedio fueron del 48% para la laguna con 2 mamparas y del 21% para el control 1, tomando en cuenta el día en que los valores sufrieron variaciones considerables. Sin embargo, si se eliminan los resultados del 25 de julio, las remociones promedio son del 44% para el caso con dos mamparas y del 21% para el control 1.

### V.1.2 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, SOLUBLE (DBO<sub>5</sub> soluble)

Día	DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l) Con 2 mamparas					DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l) Control 1				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Viernes 13 de julio	80	72	30	10	63	82	74	35	10	57
Viernes 13 de julio	80	72	30	10	63	82	74	34	10	59
Miércoles 18 de julio	76	61	50	20	34	69	61	55	12	20
Miércoles 18 de julio	77	62	50	19	35	69	61	55	12	20
Viernes 20 de julio	76	30	46	60	39	65	35	52	46	20
Viernes 20 de julio	76	30	46	60	39	65	34	52	48	20
Domingo 22 de julio	61	46	43	25	30	62	54	49	13	21
Domingo 22 de julio	60	45	43	25	28	62	54	49	13	21
Martes 24 de julio	74	52	39	30	47	68	58	46	15	32
Martes 24 de julio	74	52	39	30	47	68	58	46	15	32
<b>PROMEDIO</b>	73	52	42	29	43	69	56	47	19	30

Tabla 5.2 DBO<sub>5</sub> soluble medida en ambas lagunas, durante la corrida 1

La laguna con 2 mamparas obtuvo mejores remociones para la DBO<sub>5</sub> soluble, logrando en promedio una remoción del 43%; mientras que la laguna control alcanzó una remoción promedio del 30% (Tabla 5.2). Al inicio de la corrida los valores obtenidos en ambas lagunas tuvieron un comportamiento parecido. Sin embargo, a medida que los días transcurrieron se aprecia una diferencia entre la laguna con 2 mamparas y la laguna control.

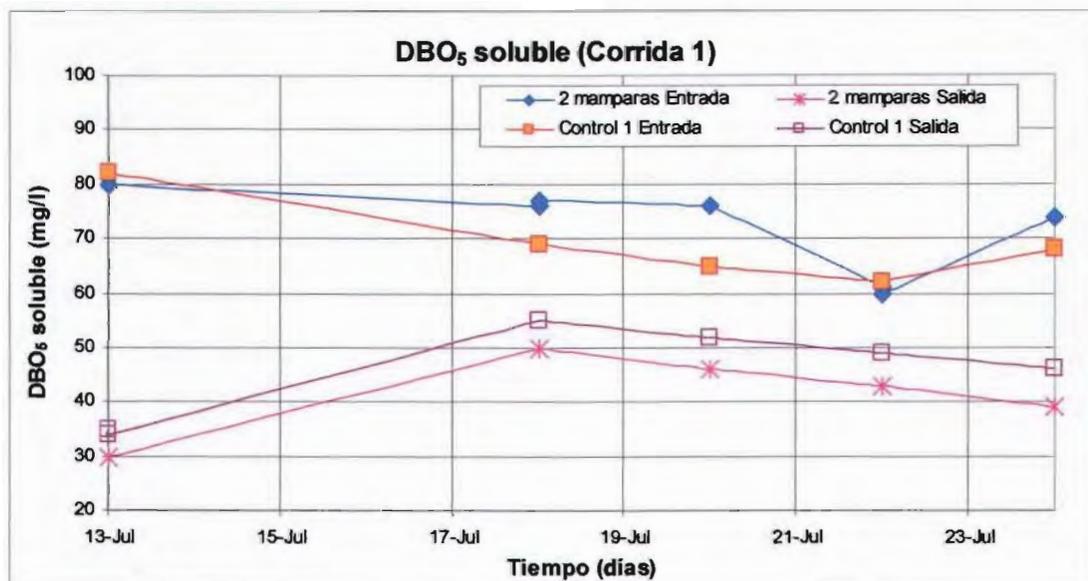


Figura 5.2 Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> soluble en ambas lagunas, durante la corrida 1

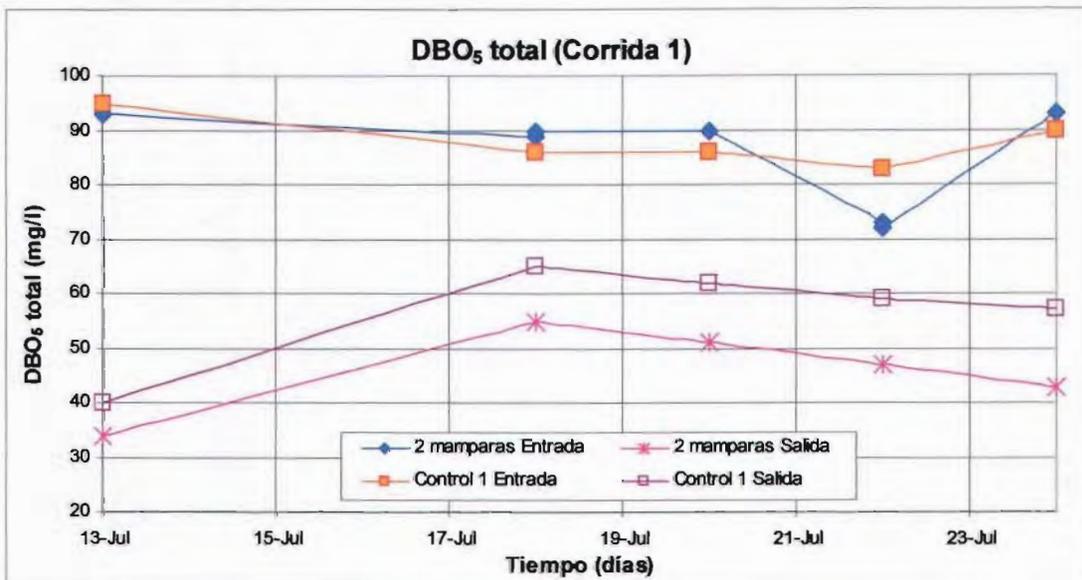
Los valores de entrada correspondientes al 20 de julio son extremadamente bajos (41 mg/l), por lo que se sospecha que se generó un error durante el muestreo o bien, durante el análisis. Se realizó una interpolación con el resto de los datos y la DBO calculada es de 76 y 65 mg/l, respectivamente. Valor que se presenta para fines de cálculo.

### V.1.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, TOTAL (DBO<sub>5</sub> total)

Día	DBO <sub>5</sub> total (mg/l) Con 2 mamparas					DBO <sub>5</sub> total (mg/l) Control 1				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Viernes 13 de julio	93	80	34	14	63	95	84	40	12	58
Viernes 13 de julio	93	80	34	14	63	95	84	40	12	58
Miércoles 18 de julio	89	69	55	22	38	86	67	65	22	24
Miércoles 18 de julio	90	70	55	22	39	86	67	65	22	24
Viernes 20 de julio	90	34	51	62	43	86	40	62	53	28
Viernes 20 de julio	90	34	51	62	43	86	40	62	53	28
Domingo 22 de julio	73	51	47	30	36	83	70	59	16	29
Domingo 22 de julio	72	50	47	31	35	83	70	59	16	29
Martes 24 de julio	93	58	43	38	54	90	69	57	23	37
Martes 24 de julio	93	57	43	39	54	90	69	57	23	37
<b>PROMEDIO</b>	88	58	46	33	47	88	66	57	25	35

**Tabla 5.3** DBO<sub>5</sub> total medida en ambas lagunas, durante la corrida 1

La laguna con 2 mamparas alcanzó mejores remociones que la laguna control, obteniendo en promedio un 47% de remoción, en tanto que en la laguna control se obtuvo un 35% de remoción promedio (Tabla 5.3).



**Figura 5.3** Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> total en ambas lagunas, durante la corrida 1

El comportamiento de este parámetro y de la DBO<sub>5</sub> soluble fue muy similar. En el caso de la laguna con 2 mamparas la DBO<sub>5</sub> soluble corresponde aproximadamente al 83% de la DBO<sub>5</sub> total; mientras que en la laguna control la DBO<sub>5</sub> soluble es 78% de la DBO<sub>5</sub> total.

De esta manera y durante la corrida la biomasa algal representa cuando mucho el 22% de la DBO.

Se determinó la constante de reacción de la DBO<sub>5</sub> total, para la laguna A con dos mamparas, acorde con la ecuación (4.21):

$$K = \frac{\text{Ln} \left( \frac{93 \text{ mg/l}}{43 \text{ mg/l}} \right)}{11 \text{ d}} = 0.07 \text{ d}^{-1}$$

Así mismo, para la laguna B, sin mamparas (control 1):

$$K = \frac{\text{Ln} \left( \frac{95 \text{ mg/l}}{57 \text{ mg/l}} \right)}{11 \text{ d}} = 0.04 \text{ d}^{-1}$$

En ambos casos se observa que el valor experimental del parámetro K es más pequeño que el determinado mediante la fórmula propuesta por Thirimurthy (Ecuación 4.14), siendo  $K=0.12 \text{ d}^{-1}$ . Este valor varía en función del tipo de agua residual, y para este estudio el influente se puede considerar como un agua residual de concentración baja (Tabla 1.1).

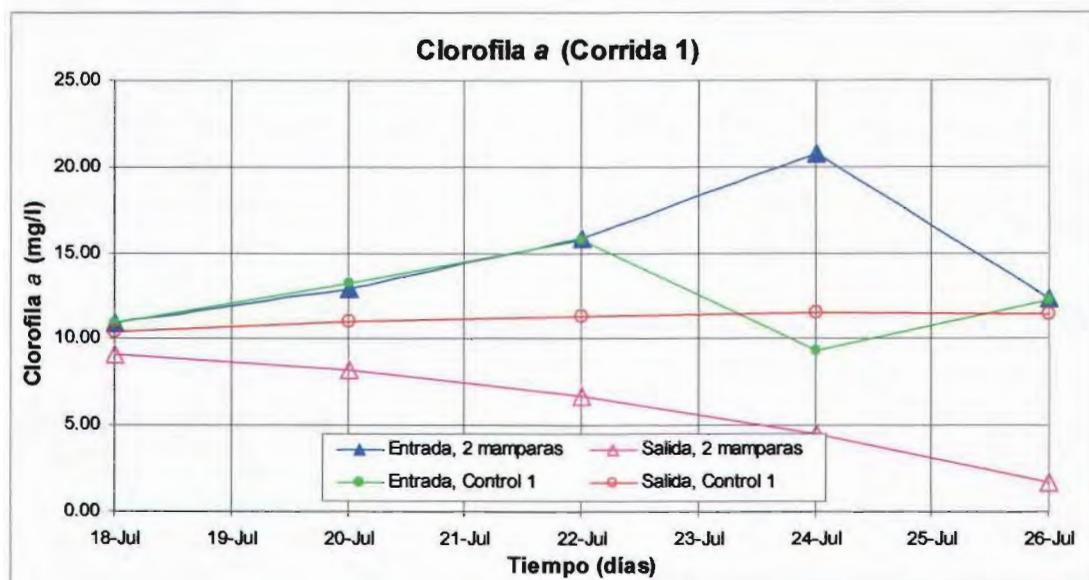
V.1.4 CLOROFILA *a*, *b* y *c*

Día	Clorofila <i>a</i> (mg/l) Con 2 mamparas					Clorofila <i>a</i> (mg/l) Control 1				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Miércoles 18 de julio	10.91	7.13	9.14	35	16	10.91	8.12	10.46	26	4
Miércoles 18 de julio	10.91	7.13	9.14	35	16	10.92	8.11	10.45	26	4
Viernes 20 de julio	12.94	7.99	8.26	38	36	13.25	10.54	11.07	20	16
Viernes 20 de julio	12.96	7.98	8.26	38	36	13.25	10.54	11.07	20	16
Domingo 22 de julio	15.89	9.65	6.73	39	58	15.78	11.47	11.30	27	28
Domingo 22 de julio	15.89	9.65	6.73	39	58	15.78	11.48	11.30	27	28
Martes 24 de julio	20.77	9.18	4.53	56	78	9.36	13.58	11.51	-45	-23
Martes 24 de julio	20.77	9.18	4.53	56	78	9.36	13.58	11.51	-45	-23
Jueves 26 de julio	12.36	5.05	1.67	59	86	12.29	10.46	11.41	15	7
Jueves 26 de julio	12.35	5.09	1.67	59	86	12.29	10.45	11.41	15	7
<b>PROMEDIO</b>	<b>14.58</b>	<b>7.80</b>	<b>6.07</b>	<b>45</b>	<b>55</b>	<b>12.32</b>	<b>10.83</b>	<b>11.09</b>	<b>9</b>	<b>7</b>
Día	Clorofila <i>b</i> (mg/l) Con 2 mamparas					Clorofila <i>b</i> (mg/l) Control 1				
Miércoles 18 de julio	5.68	3.67	2.34	35	59	4.68	3.67	4.54	22	3
Miércoles 18 de julio	5.81	3.78	2.34	35	60	4.73	3.68	4.54	22	4
Viernes 20 de julio	6.31	3.13	2.38	50	62	7.03	4.71	5.17	33	26
Viernes 20 de julio	6.51	3.31	2.38	49	63	6.44	4.29	5.17	33	20
Domingo 22 de julio	9.12	4.54	2.62	50	71	9.07	5.75	4.40	37	51
Domingo 22 de julio	9.31	4.56	2.62	51	72	9.12	5.74	4.40	37	52
Martes 24 de julio	13.33	7.97	3.07	40	77	4.79	7.57	3.22	-58	33
Martes 24 de julio	13.40	7.93	3.07	41	77	4.74	7.56	3.22	-59	32
Jueves 26 de julio	5.57	2.41	3.71	57	33	5.92	5.41	1.65	9	72
Jueves 26 de julio	5.57	2.52	3.71	55	33	5.93	5.40	1.65	9	72
<b>PROMEDIO</b>	<b>8.06</b>	<b>4.38</b>	<b>2.82</b>	<b>46</b>	<b>61</b>	<b>6.25</b>	<b>5.38</b>	<b>3.80</b>	<b>9</b>	<b>37</b>
Día	Clorofila <i>c</i> (mg/l) Con 2 mamparas					Clorofila <i>c</i> (mg/l) Control 1				
Miércoles 18 de julio	0.58	0.26	0.21	55	64	0.60	0.39	0.20	35	67
Miércoles 18 de julio	0.60	0.27	0.21	55	65	0.60	0.39	0.20	35	67
Viernes 20 de julio	0.70	0.47	0.17	33	76	0.71	0.53	0.15	25	79
Viernes 20 de julio	0.73	0.49	0.17	33	77	0.71	0.53	0.15	25	79
Domingo 22 de julio	0.26	0.16	0.15	38	42	0.20	0.16	0.11	20	45
Domingo 22 de julio	0.30	0.19	0.15	37	50	0.24	0.19	0.12	21	50
Martes 24 de julio	2.29	1.54	0.13	33	94	0.92	1.25	0.09	-36	90
Martes 24 de julio	2.45	1.63	0.13	33	95	0.93	1.26	0.09	-35	90
Jueves 26 de julio	0.31	0.17	0.11	45	65	0.26	0.16	0.07	38	73
Jueves 26 de julio	0.30	0.17	0.11	43	63	0.27	0.16	0.07	41	74
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.85</b>	<b>0.54</b>	<b>0.15</b>	<b>41</b>	<b>69</b>	<b>0.54</b>	<b>0.50</b>	<b>0.13</b>	<b>17</b>	<b>71</b>

Tabla 5.4 Clorofilas obtenidas en ambas lagunas, durante la corrida 1

Al determinar la clorofila *a* se cuantifica la presencia de algas, en general. Al determinar la clorofila *b*, se conocerá la que pertenece a las divisiones *Chlorophyta* (algas verdes o clorofíceas) y *Euglenophyta* (Euglenofíceas); mientras que al reportar la clorofila *c* se indica a las divisiones *Chromophyta* (Crisofíceas o algas pardas, bacilariofíceas o diatomeas y xantofíceas o amarillas) y *Cryptophyta* (Criptofíceas o criptomonales).

Las entradas de ambas lagunas son parecidas para los 3 parámetros (Figuras 5.4, 5.5 y 5.6). No obstante, el 24 de julio se aprecia un incremento en los valores de los 3 tipos de clorofilas a la entrada de la laguna A y a la salida de la laguna B, de forma similar a lo ocurrido con los SST.

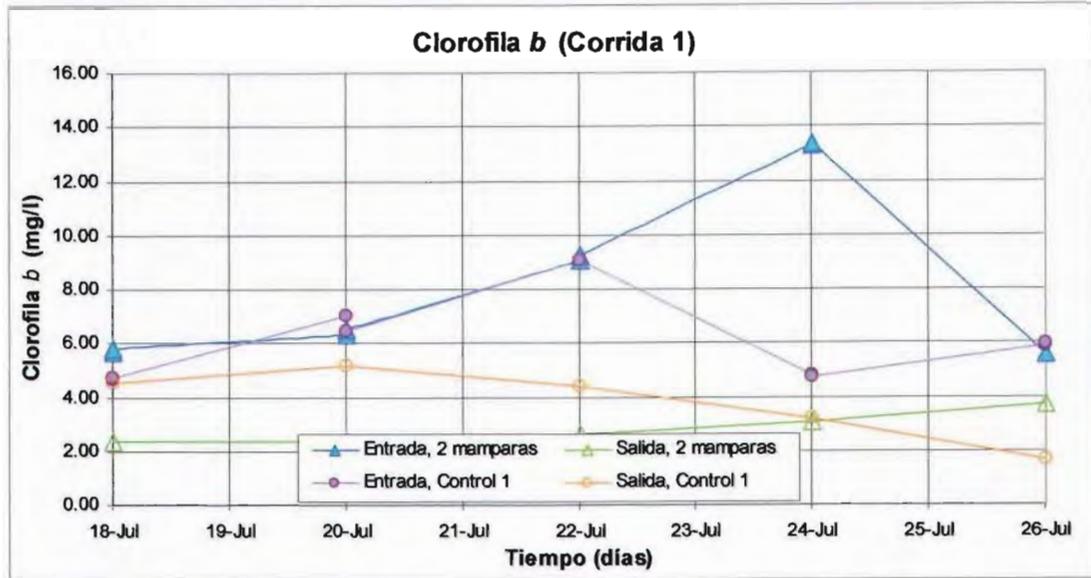


**Figura 5.4** Comportamiento de la clorofila *a* en ambas lagunas, durante la corrida 1

Ese día se presentó una lluvia de intensidad moderada a la 1:00 a.m. (3.048 mm) y de intensidad ligera a las 3:00, 4:00 y 5:00 a.m. (de 0.168, 0.293 y 0.042 mm, respectivamente). Debido a la poca profundidad de las lagunas es posible que hayan ocurrido turbulencias dentro de las mismas y al tomar la muestra no se hayan sedimentado aún los sólidos, por lo que los valores presentados ese día muestran alteraciones respecto a los demás.

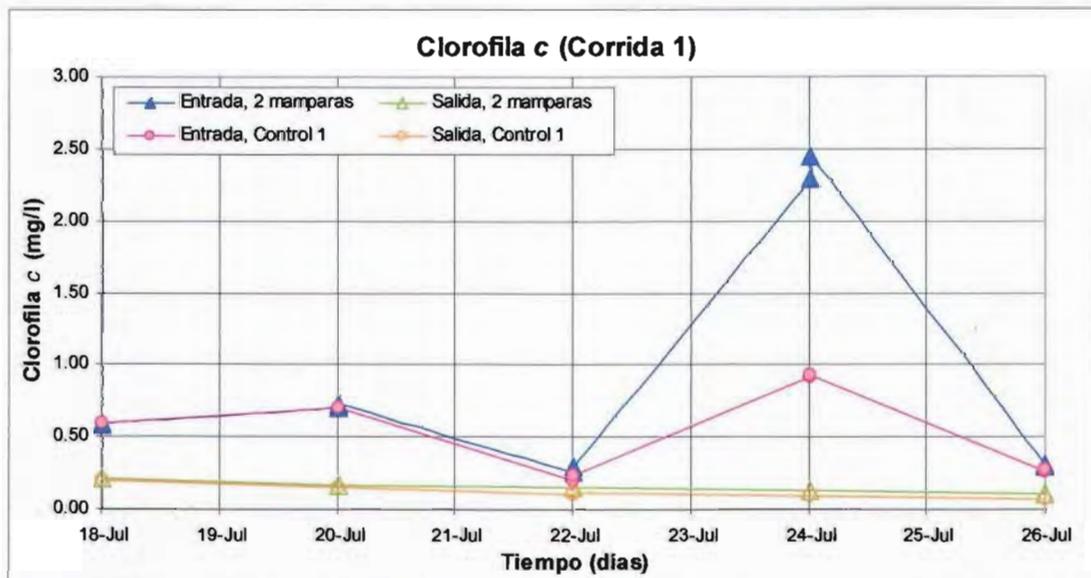
En cuanto a la clorofila *a*, se logró una eficiencia promedio de remoción del 55% en la laguna con 2 mamparas y del 7% en la laguna control. Dichos porcentajes se calculan considerando los valores del 24 de julio. Si se eliminan los resultados de ese día, los porcentajes de remoción varían a 49% para la laguna con 2 mamparas y 13% para la laguna control.

Para la clorofila *b* se alcanzaron remociones promedio del 61% en la laguna con 2 mamparas y de 37% en la laguna control. Al eliminar los resultados del 24 de julio, se obtiene una remoción promedio del 57% en la laguna con mamparas; mientras que la laguna control presenta una remoción promedio del 38%.



**Figura 5.5** Comportamiento de la clorofila *b* en ambas lagunas, durante la corrida 1

Respecto a la clorofila *c*, la remoción promedio en la laguna con 2 mamparas fue del 69% y del 71% en la laguna control. Tales valores se modifican a 63% en la laguna con 2 mamparas y a un 67% para la laguna control, al eliminar los del 24 de julio.



**Figura 5.6** Comportamiento de la clorofila *c* en ambas lagunas, durante la corrida 1

### V.1.5 POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH) y OXÍGENO DISUELTUO (OD)

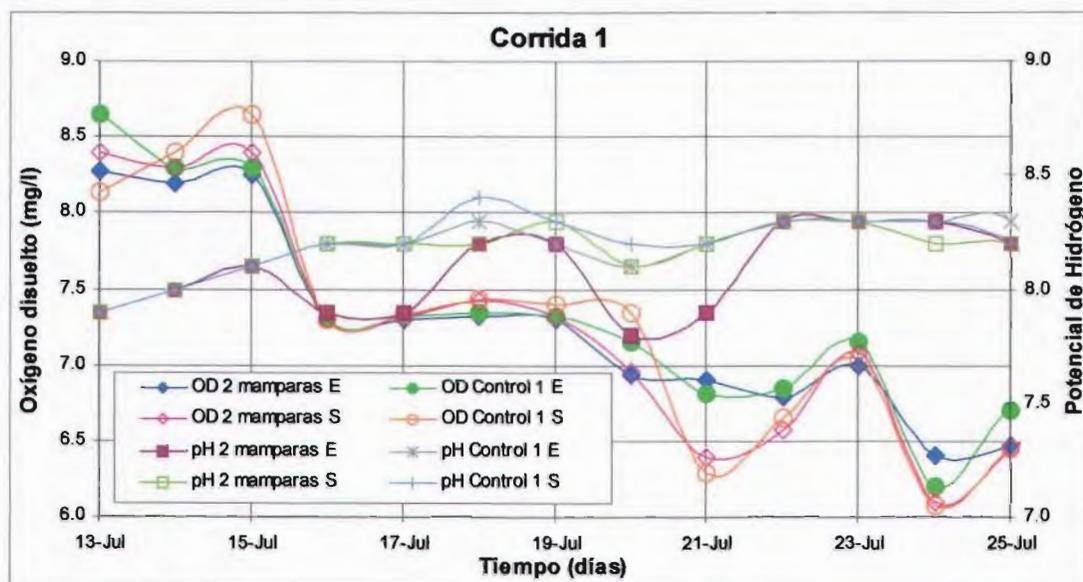
Día	pH Con 2 mamp.		pH Control 1		OD (mg/l) Con 2 mamp.		OD (mg/l) Control 1	
	E*	S*	E	S	E	S	E	S
	Viernes 13 de julio	7.9	7.9	7.9	7.9	8.3	8.4	8.7
Sábado 14 de julio	8.0	8.0	8.0	8.0	8.2	8.3	8.3	8.4
Domingo 15 de julio	8.1	8.1	8.1	8.1	8.3	8.4	8.3	8.7
Lunes 16 de julio	7.9	8.2	8.2	8.2	7.3	7.3	7.3	7.3
Martes 17 de julio	7.9	8.2	8.2	8.2	7.3	7.3	7.3	7.3
Miércoles 18 de julio	8.2	8.2	8.3	8.4	7.3	7.4	7.4	7.4
Jueves 19 de julio	8.2	8.3	8.2	8.3	7.3	7.3	7.3	7.4
Viernes 20 de julio	7.8	8.1	8.1	8.2	6.9	7.0	7.2	7.4
Sábado 21 de julio	7.9	8.2	8.2	8.2	6.9	6.4	6.8	6.3
Domingo 22 de julio	8.3	8.3	8.3	8.3	6.8	6.6	6.9	6.7
Lunes 23 de julio	8.3	8.3	8.3	8.3	7.0	7.1	7.2	7.0
Martes 24 de julio	8.3	8.2	8.3	8.3	6.4	6.1	6.2	6.1
Miércoles 25 de julio	8.2	8.2	8.3	8.2	6.5	6.5	6.7	6.5
Jueves 26 de julio	8.0	8.0	7.8	7.8	6.7	6.8	6.5	6.7
<b>PROMEDIO</b>	<b>8.2</b>	<b>8.2</b>	<b>8.2</b>	<b>8.2</b>	<b>7.2</b>	<b>7.2</b>	<b>7.3</b>	<b>7.2</b>

E\* = Entrada

S\* = Salida

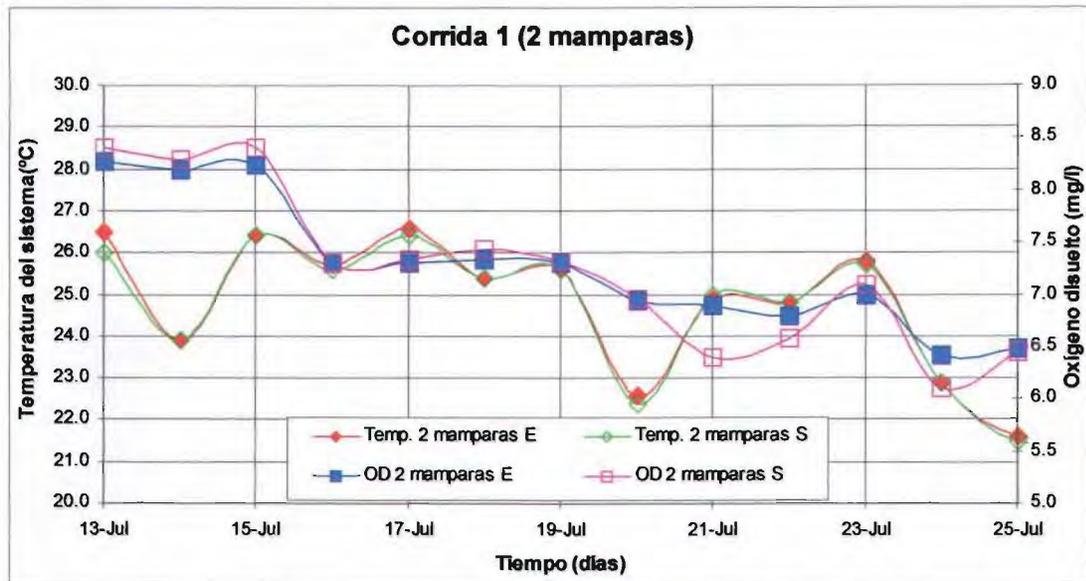
**Tabla 5.5** pH y OD medidos en ambas lagunas, durante la corrida 1

Durante la primera corrida, los valores de pH y de oxígeno disuelto se encontraron dentro del rango recomendado para favorecer el crecimiento algal; el cual va de 8.00 a 9.50 unidades para el pH y de 6 a 35 mg/l para el oxígeno disuelto. Se presentaron valores promedio de 8.00 para el pH y de 7 mg/l para el oxígeno disuelto (Tabla 5.5).



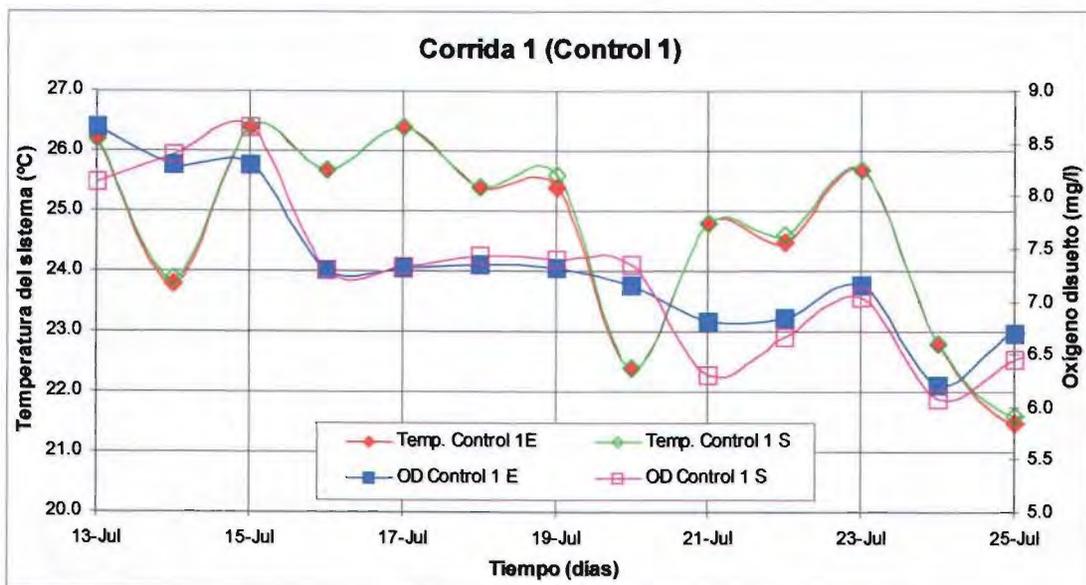
**Figura 5.7** Comportamiento del oxígeno disuelto y el pH en ambas lagunas, durante la corrida 1

Se observa que el comportamiento del oxígeno disuelto, en ambas lagunas, es inversamente proporcional al del pH, ya que a medida que uno se incrementa el otro se ve disminuido (Figura 5.7).



**Figura 5.8** Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna con dos mamparas

Respecto a la temperatura del sistema y el oxígeno disuelto en la laguna con 2 mamparas, se aprecia un comportamiento muy parecido entre ambas líneas, de manera tal, que al aumentarse la temperatura se favorece el incremento del otro parámetro en forma similar (Figura 5.8). Lo mismo ocurre en la laguna control, en la cual el incremento en los valores de temperatura del sistema favorece el aumento en el oxígeno disuelto presente en la laguna (Figura 5.9).



**Figura 5.9** Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna sin mamparas

## V.2 CORRIDA 2 (Laguna A con 3 mamparas; Laguna B sin mamparas)

Inició el día martes 14 de agosto de 2001 y finalizó el día lunes 27, del mismo mes.

Se le incrementó una mampara a laguna A, para analizar si dicho incremento favorecería la remoción de las algas en el efluente; manteniéndose la laguna B como el control 2, sin mamparas. Los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros, se presentan a continuación.

### V.2.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Día	SST (mg/l) Con 3 mamparas					SST (mg/l) Control 2				
	Entrada	Salida		E <sub>remoción</sub> (%)		Entrada	Salida		E <sub>remoción</sub> (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Martes 14 de agosto	88	44	29	50	67	88	48	57	45	35
Martes 14 de agosto	88	44	29	50	67	88	48	57	45	35
Jueves 16 de agosto	84	36	29	57	65	84	44	60	48	29
Jueves 16 de agosto	84	36	29	57	65	84	44	60	48	29
Sábado 18 de agosto	83	28	32	66	61	83	40	63	52	24
Sábado 18 de agosto	83	28	32	66	61	83	40	63	52	24
Lunes 20 de agosto	84	40	40	52	52	84	64	68	24	19
Lunes 20 de agosto	84	40	40	52	52	84	64	68	24	19
Miércoles 22 de agosto	80	24	43	70	46	80	56	69	30	14
Miércoles 22 de agosto	80	24	43	70	46	80	56	69	30	14
Viernes 24 de agosto	84	24	52	71	38	84	56	72	33	14
Viernes 24 de agosto	84	24	52	71	38	84	56	72	33	14
Domingo 26 de agosto	96	48	63	50	34	96	72	74	25	23
Domingo 26 de agosto	96	48	63	50	34	96	72	74	25	23
Lunes 27 de agosto	84	40	69	52	18	84	68	76	19	10
Lunes 27 de agosto	84	40	69	52	18	84	68	76	19	10
<b>PROMEDIO</b>	85	36	45	59	48	85	56	67	35	21

**Tabla 5.6** SST medidos en ambas lagunas, durante la corrida 2

Durante la corrida 2, los valores en las entradas de ambas lagunas son los mismos (Figura 5.10) y muy similares a la salida de ambas lagunas, durante los primeros días. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo se puede apreciar una diferencia en la remoción de los SST entre la laguna acondicionada con mamparas y la laguna control (Tabla 5.6).

Se alcanzaron remociones promedio del 48% en la laguna con 3 mamparas y del 21% para la laguna control, los cuales son parecidos a los obtenidos durante la corrida 1.



Figura 5.10 Comportamiento de los SST durante la corrida 2, en ambas lagunas

### V.2.2 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, SOLUBLE

Día	DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l) Con 3 mamparas					DBO <sub>5</sub> soluble (mg/l) Control 2				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Martes 14 de agosto	65	58	36	11	45	65	57	43	12	34
Martes 14 de agosto	65	58	36	11	45	65	57	43	12	34
Domingo 19 de agosto	60	43	30	28	50	60	49	39	18	35
Domingo 19 de agosto	60	43	30	28	50	60	49	39	18	35
Martes 21 de agosto	52	36	26	31	50	52	43	36	17	31
Martes 21 de agosto	52	36	26	31	50	52	43	36	17	31
Jueves 23 de agosto	50	37	21	26	58	50	41	34	18	32
Jueves 23 de agosto	50	37	21	26	58	50	41	34	18	32
Sábado 25 de agosto	52	35	17	33	67	54	44	31	19	43
Sábado 25 de agosto	52	35	17	33	67	54	44	31	19	43
<b>PROMEDIO</b>	56	42	26	26	54	56	47	37	17	35

Tabla 5.7 DBO<sub>5</sub> soluble medida en ambas lagunas, durante la corrida 2

Se aprecia que los valores a la entrada de ambas lagunas son iguales, con excepción del último día de medición (Figura 5.11). La laguna con 3 mamparas logró mayores remociones que la laguna control, alcanzando un 54% de remoción promedio, mientras que la laguna control obtuvo un 35%; tal y como ocurrió en la corrida 1 (Tabla 5.7).

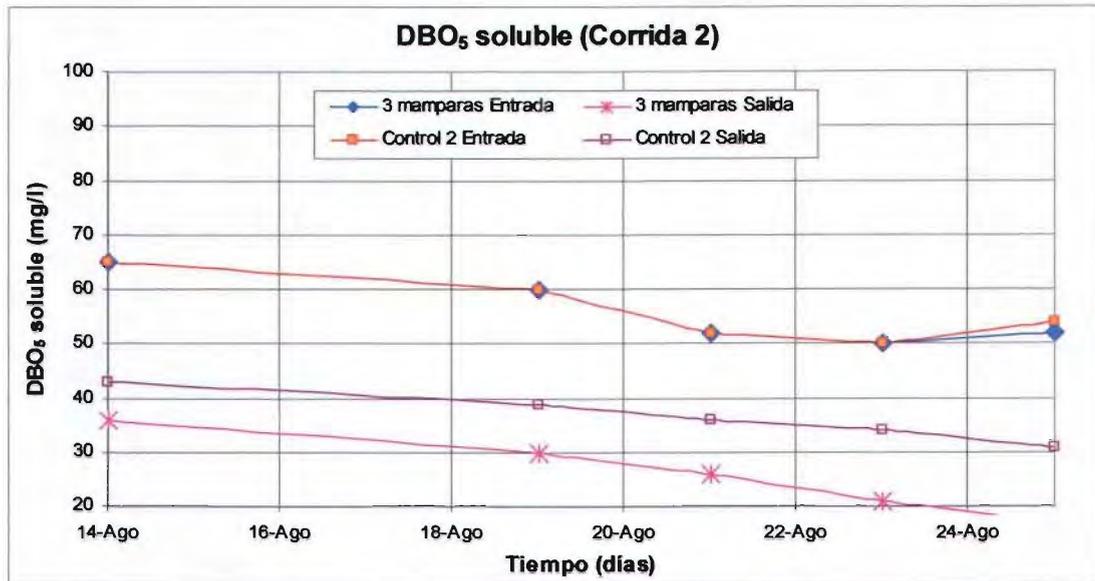


Figura 5.11 Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> soluble en ambas lagunas, durante la corrida 2

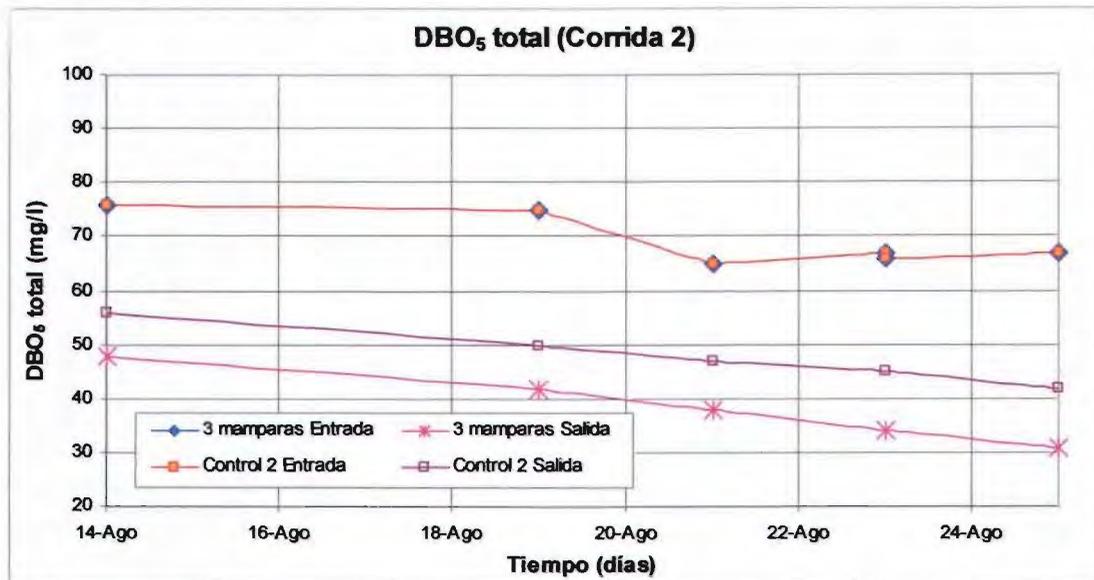
### V.2.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, TOTAL

Día	DBO <sub>5</sub> total (mg/l) Con 3 mamparas					DBO <sub>5</sub> total (mg/l) Control 2				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Martes 14 de agosto	76	67	48	12	37	76	70	56	8	26
Martes 14 de agosto	76	68	48	11	37	76	70	56	8	26
Domingo 19 de agosto	75	52	42	31	44	75	60	50	20	33
Domingo 19 de agosto	75	52	42	31	44	75	60	50	20	33
Martes 21 de agosto	65	48	38	26	42	65	56	47	14	28
Martes 21 de agosto	65	48	38	26	42	65	56	47	14	28
Jueves 23 de agosto	67	48	34	28	49	67	57	45	15	33
Jueves 23 de agosto	66	48	34	27	48	66	56	45	15	32
Sábado 25 de agosto	67	47	31	30	54	67	57	42	15	37
Sábado 25 de agosto	67	47	31	30	54	67	57	42	15	37
<b>PROMEDIO</b>	70	53	39	25	45	70	60	48	14	31

Tabla 5.8 DBO<sub>5</sub> total medida en ambas lagunas, durante la corrida 2

En esta corrida, los valores del influente son muy constantes durante las dos semanas. En los efluentes, la variación es más notoria con el transcurso de los días (Tabla 5.8).

La laguna con 3 mamparas logró mejores remociones que aquella sin mamparas, obteniendo un 45% de remoción promedio; mientras la laguna control alcanzó un 31% (Figura 5.12). Existiendo un comportamiento similar entre este parámetro y la DBO<sub>5</sub> soluble. Para ambos casos, tanto en la laguna con 3 mamparas como en la laguna control 2, la DBO<sub>5</sub> soluble corresponde al 80% de la DBO<sub>5</sub> total.



**Figura 5.12** Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> total en ambas lagunas, durante la corrida 2

Se determinó la constante de reacción de la DBO<sub>5</sub> total, para la laguna A, con tres mamparas:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{76 \text{ mg/l}}{31 \text{ mg/l}}\right)}{11 \text{ d}} = 0.08 \text{ d}^{-1}$$

Laguna B, sin mamparas (control 2):

$$K = \frac{\ln\left(\frac{76 \text{ mg/l}}{42 \text{ mg/l}}\right)}{11 \text{ d}} = 0.05 \text{ d}^{-1}$$

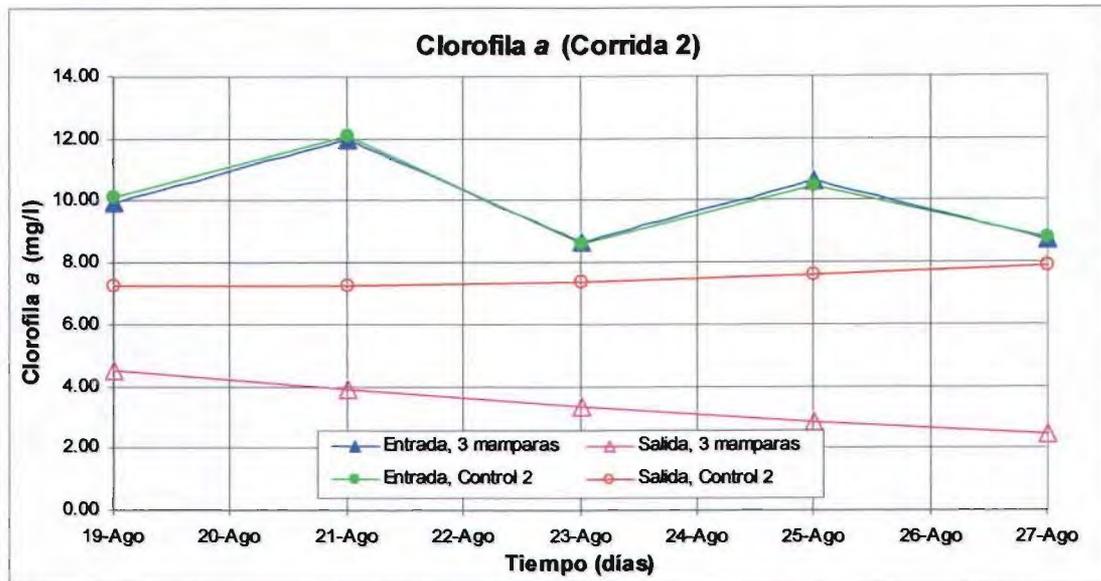
En ambos casos se observa que el parámetro K obtenido de acuerdo a los datos experimentales es más pequeño que el determinado mediante la fórmula propuesta por Thirimurthy (Ecuación 4.14).

V.2.4 CLOROFILA *a*, *b* y *c*

Día	Clorofila <i>a</i> (mg/l) Con 3 mamparas					Clorofila <i>a</i> (mg/l) Control 2				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Domingo 19 de agosto	9.99	6.65	4.55	33	54	10.12	7.69	7.27	24	28
Domingo 19 de agosto	9.99	6.64	4.55	34	54	10.12	7.69	7.27	24	28
Martes 21 de agosto	12.01	7.60	3.90	37	68	12.07	8.01	7.30	34	40
Martes 21 de agosto	12.00	7.62	3.90	37	68	12.07	8.01	7.30	34	40
Jueves 23 de agosto	8.67	4.43	3.35	49	61	8.64	5.68	7.41	34	14
Jueves 23 de agosto	8.66	4.44	3.35	49	61	8.64	5.68	7.41	34	14
Sábado 25 de agosto	10.63	6.09	2.88	43	73	10.49	6.89	7.61	34	27
Sábado 25 de agosto	10.63	6.09	2.88	43	73	10.49	6.89	7.61	34	27
Lunes 27 de agosto	8.71	3.52	2.47	60	72	8.79	7.48	7.91	15	10
Lunes 27 de agosto	8.71	3.52	2.47	60	72	8.79	7.48	7.91	15	10
<b>PROMEDIO</b>	<b>10.00</b>	<b>5.66</b>	<b>3.43</b>	<b>45</b>	<b>66</b>	<b>10.02</b>	<b>7.15</b>	<b>7.50</b>	<b>28</b>	<b>24</b>
Día	Clorofila <i>b</i> (mg/l) Con 3 mamparas					Clorofila <i>b</i> (mg/l) Control 2				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Domingo 19 de agosto	4.56	2.43	2.69	47	41	4.90	3.67	3.59	25	27
Domingo 19 de agosto	4.54	2.42	2.69	47	41	4.88	3.67	3.59	25	26
Martes 21 de agosto	6.14	3.00	2.71	51	56	5.78	3.66	3.58	37	38
Martes 21 de agosto	6.13	3.06	2.71	50	56	5.78	3.64	3.58	37	38
Jueves 23 de agosto	4.01	2.06	2.73	49	32	4.03	2.60	3.58	35	11
Jueves 23 de agosto	4.04	2.06	2.73	49	32	4.03	2.53	3.58	37	11
Sábado 25 de agosto	5.11	3.02	2.74	41	46	4.88	3.37	3.57	31	27
Sábado 25 de agosto	5.28	3.04	2.74	42	48	4.89	3.36	3.57	31	27
Lunes 27 de agosto	4.84	2.29	2.76	53	43	4.36	3.80	3.57	13	18
Lunes 27 de agosto	4.76	2.26	2.76	53	42	4.44	3.80	3.57	14	20
<b>PROMEDIO</b>	<b>4.94</b>	<b>2.56</b>	<b>2.73</b>	<b>48</b>	<b>44</b>	<b>4.80</b>	<b>3.41</b>	<b>3.58</b>	<b>29</b>	<b>24</b>
Día	Clorofila <i>c</i> (mg/l) Con 3 mamparas					Clorofila <i>c</i> (mg/l) Control 2				
	Entrada	Salida		Eremoción (%)		Entrada	Salida		Eremoción (%)	
		0 d	7 d	0 d	7 d		0 d	7 d	0 d	7 d
Domingo 19 de agosto	0.61	0.26	0.24	57	61	0.61	0.40	0.29	34	52
Domingo 19 de agosto	0.61	0.26	0.24	57	61	0.61	0.41	0.29	33	52
Martes 21 de agosto	0.71	0.53	0.22	25	69	0.71	0.40	0.26	44	63
Martes 21 de agosto	0.72	0.54	0.22	25	69	0.70	0.40	0.26	43	63
Jueves 23 de agosto	0.20	0.12	0.20	40	0	0.26	0.17	0.24	35	8
Jueves 23 de agosto	0.20	0.12	0.20	40	0	0.27	0.18	0.24	33	11
Sábado 25 de agosto	0.61	0.35	0.20	43	67	0.61	0.40	0.21	34	66
Sábado 25 de agosto	0.61	0.35	0.20	43	67	0.60	0.40	0.21	33	65
Lunes 27 de agosto	0.28	0.17	0.19	39	32	0.25	0.21	0.19	16	24
Lunes 27 de agosto	0.29	0.18	0.19	38	34	0.30	0.25	0.19	17	37
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.48</b>	<b>0.29</b>	<b>0.21</b>	<b>41</b>	<b>46</b>	<b>0.49</b>	<b>0.32</b>	<b>0.24</b>	<b>32</b>	<b>44</b>

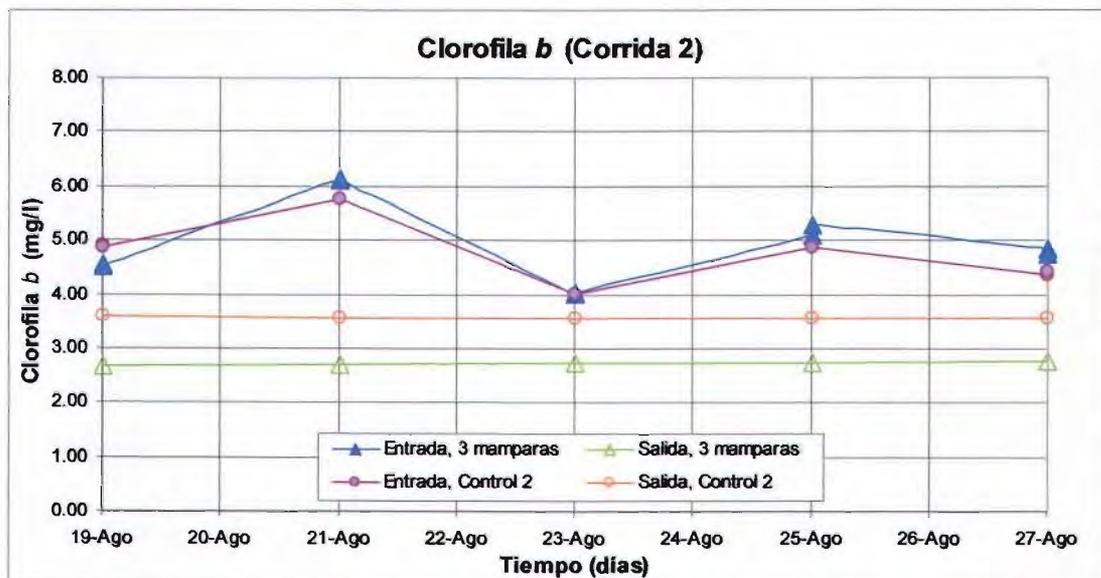
Tabla 5.9 Clorofilas obtenidas en ambas lagunas, durante la corrida 2

En el parámetro de la clorofila *a*, se obtuvo una eficiencia promedio de remoción del 66% en la laguna con 3 mamparas y del 24% en la laguna control (Figura 5.13).

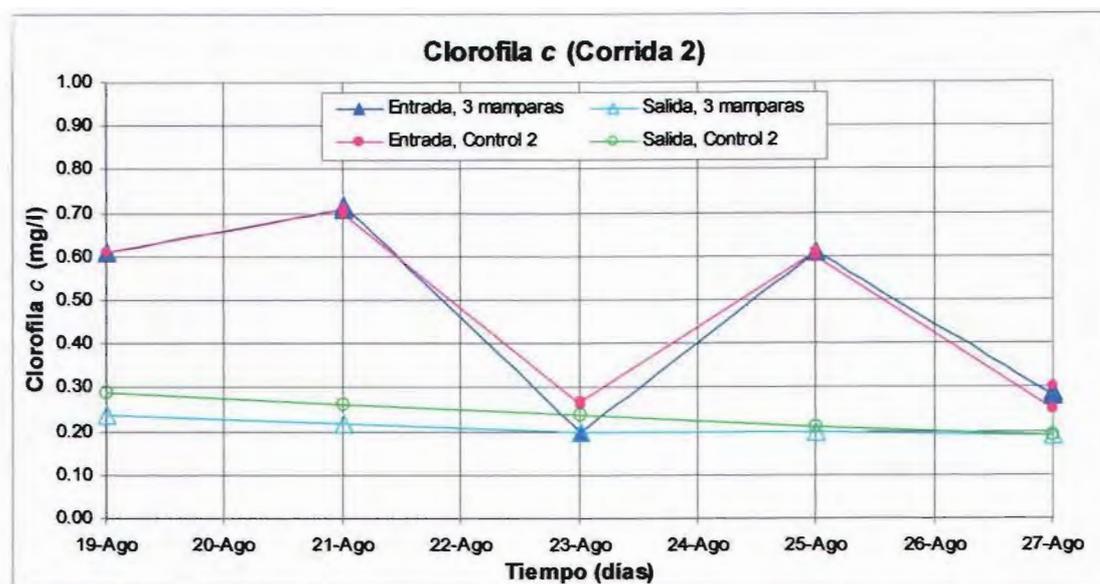


**Figura 5.13** Comportamiento de la clorofila *a* en ambas lagunas, durante la corrida 2

De manera similar, para la clorofila *b* se alcanzaron remociones promedio del 44% en la laguna con 3 mamparas y de 24% en la laguna control (Figura 5.14).



**Figura 5.14** Comportamiento de la clorofila *b* en ambas lagunas, durante la corrida 2



**Figura 5.15** Comportamiento de la clorofila  $c$  en ambas lagunas, durante la corrida 2

En cuanto a la clorofila  $c$ , la remoción promedio en la laguna con 3 mamparas fue del 46% y del 44% en la laguna control (Figura 5.15).

## V.2.5 CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

## V.2.5.1 TEMPERATURA AMBIENTAL Y DEL SISTEMA

Día		Temperatura (°C)						
		Ambiental			Del sistema			
		Máxima	Mínima	Media	Con mamparas		Control	
					Entrada	Salida	Entrada	Salida
CORRIDA UNO	Viernes 13 de julio	28.4	17.0	21.6	26.5	26.0	26.2	26.2
	Sábado 14 de julio	25.8	15.0	20.1	23.9	23.9	23.8	23.9
	Domingo 15 de julio	28.1	14.9	21.3	26.4	26.4	26.4	26.4
	Lunes 16 de julio	27.2	18.0	21.6	25.7	25.6	25.7	25.7
	Martes 17 de julio	28.1	16.2	21.3	26.6	26.4	26.4	26.4
	Miércoles 18 de julio	27.8	15.3	21.5	25.4	25.4	25.4	25.4
	Jueves 19 de julio	27.0	16.6	20.5	25.6	25.6	25.4	25.6
	Viernes 20 de julio	25.1	16.7	20.7	22.6	22.4	22.4	22.4
	Sábado 21 de julio	27.5	15.0	21.3	24.9	25.0	24.8	24.8
	Domingo 22 de julio	27.3	14.7	21.5	24.8	24.8	24.5	24.6
	Lunes 23 de julio	27.9	15.0	21.3	25.8	25.7	25.7	25.7
	Martes 24 de julio	25.5	16.4	20.9	22.9	22.9	22.8	22.8
	Miércoles 25 de julio	24.2	16.4	19.9	21.6	21.5	21.5	21.6
Jueves 26 de julio	25.5	16.7	20.0	22.0	22.0	22.2	22.2	
CORRIDA DOS	Martes 14 de agosto	26.7	15.9	21.0	24.5	26.0	26.2	26.2
	Miércoles 15 de agosto	26.9	14.4	20.1	25.6	25.5	25.7	25.6
	Jueves 16 de agosto	27.1	17.6	22.4	25.3	26.4	26.4	26.4
	Viernes 17 de agosto	27.8	14.2	21.2	24.9	24.9	24.9	25.0
	Sábado 18 de agosto	29.3	13.5	21.5	27.5	27.6	27.4	27.5
	Domingo 19 de agosto	28.9	16.3	22.4	25.8	26.0	26.0	25.9
	Lunes 20 de agosto	28.8	15.5	23.0	26.0	26.2	26.1	26.0
	Martes 21 de agosto	29.0	16.1	22.8	26.4	26.5	26.4	26.4
	Miércoles 22 de agosto	27.6	15.3	21.3	24.9	24.8	24.9	24.9
	Jueves 23 de agosto	27.9	15.0	21.6	25.0	24.9	24.5	24.5
	Viernes 24 de agosto	28.2	17.2	22.4	26.6	26.6	26.4	26.4
	Sábado 25 de agosto	27.9	17.8	22.0	26.0	26.0	26.0	26.1
	Domingo 26 de agosto	25.6	16.9	19.4	23.2	23.1	23.2	23.1
Lunes 27 de agosto	25.9	17.1	20.2	24.0	24.0	24.0	24.0	

**Tabla 5.10** Temperatura ambiental y del sistema, durante ambas corridas

Durante la corrida 1 la temperatura promedio ambiental fue de 21°C; mientras que en el transcurso de la corrida 2 fue de 21.5°C, prevaleciendo en ambas corridas condiciones de clima templado.

El comportamiento de la temperatura del sistema tanto a la entrada como a la salida de ambas lagunas es el mismo. Se observa, además, la misma tendencia con la temperatura ambiental máxima (Figura 5.16).

Los límites óptimos para el desarrollo algal varían de 25 a 30°C y durante ambas corridas la temperatura diaria del sistema se encontró dentro de ese intervalo de valores, siendo de 25°C la temperatura promedio aproximada en ambas lagunas. Pudiendo concluir que en ambas corridas prevalecieron condiciones favorables para el desarrollo algal.

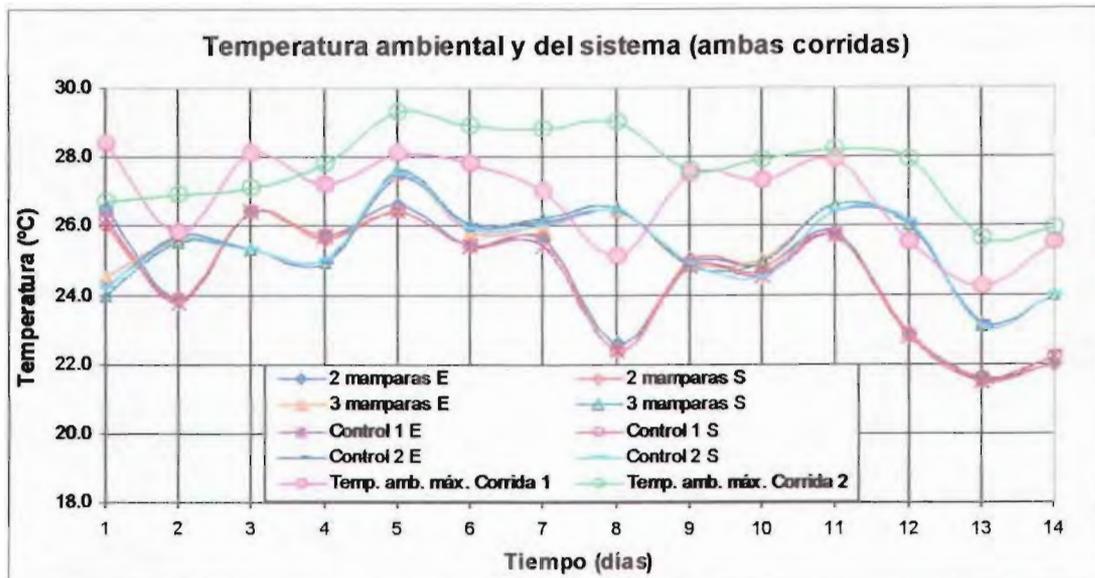


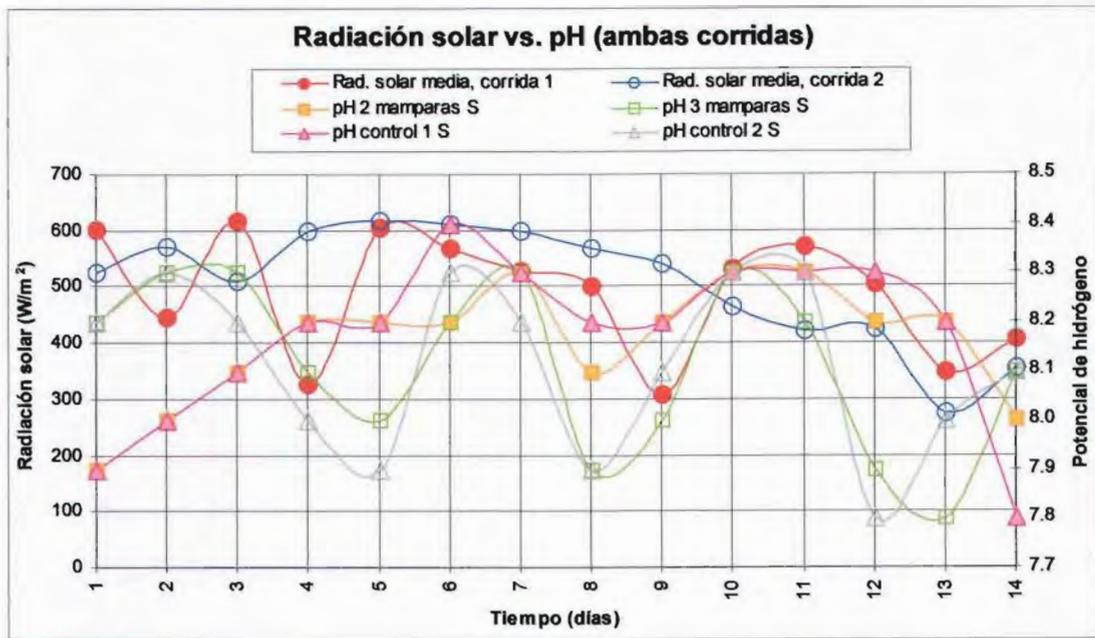
Figura 5.16 Temperatura ambiental vs. temperatura del sistema, en ambas corridas

### V.2.5.2 RADIACIÓN SOLAR

Día	Radiación solar ( $W/m^2$ )			Día	Radiación solar ( $W/m^2$ )		
	Máxima	Mínima	Media		Máxima	Mínima	Media
13 de julio	1111	3	601	14 de agosto	1058	0	525
14 de julio	1146	0	446	15 de agosto	1033	2	573
15 de julio	1030	3	616	16 de agosto	1027	6	512
16 de julio	1123	3	326	17 de agosto	1019	0	598
17 de julio	1052	6	605	18 de agosto	1038	0	616
18 de julio	1114	1	568	19 de agosto	1030	1	612
19 de julio	1042	7	529	20 de agosto	1010	1	598
20 de julio	1074	2	501	21 de agosto	1003	1	570
21 de julio	745	3	310	22 de agosto	988	2	540
22 de julio	1008	1	531	23 de agosto	1032	0	466
23 de julio	1043	1	571	24 de agosto	1117	1	422
24 de julio	1171	5	503	25 de agosto	1165	1	424
25 de julio	877	2	350	26 de agosto	1062	2	276
26 de julio	1132	0	407	27 de agosto	1294	0	355

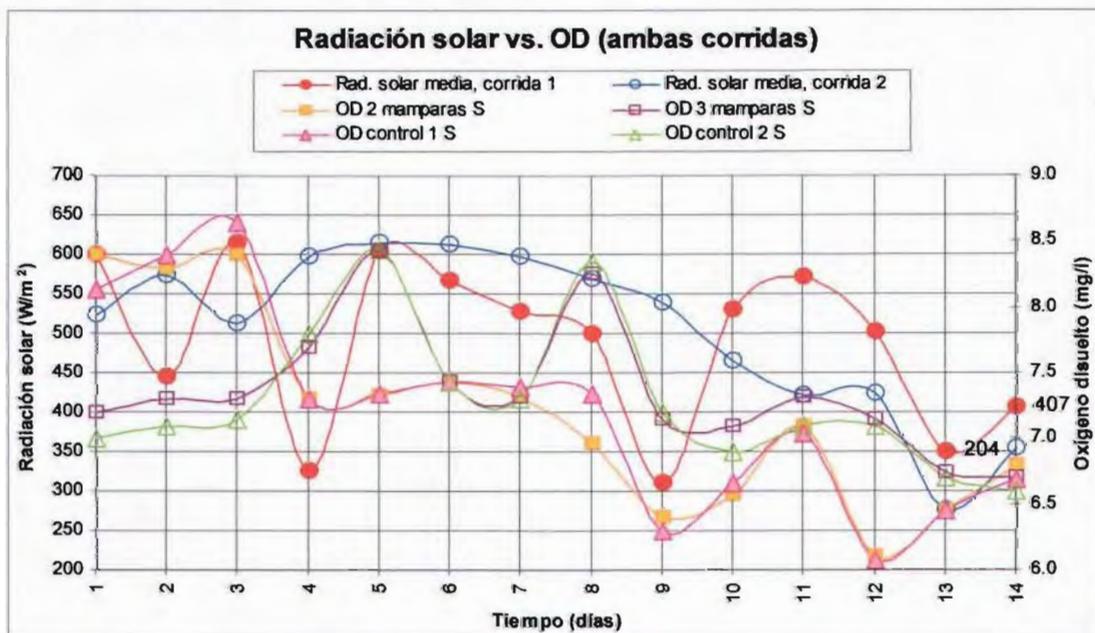
Tabla 5.11 Radiación solar presente en ambas corridas

Es la radiación total de luz directa, difusa o dispersa, recibida sobre una superficie horizontal, por día. La luz es fundamental para la actividad fotosintética y depende tanto de la luz que alcanza la superficie del agua, así como de la que penetra en profundidad. Dado que el medio es normalmente muy turbio, debido sobre todo a la presencia de las mismas algas (este fenómeno se conoce como *autocombreado*), la luz que penetra en la laguna se atenúa rápidamente y se anula a poca distancia de la superficie. Por esta razón la profundidad de las lagunas debe ser pequeña, garantizando así que la mayor parte de la columna de agua va a contar con cierto grado de iluminación. Se considera que existen buenas condiciones para el crecimiento de algas y de dispersión de oxígeno en los primeros 60 centímetros de profundidad.



**Figura 5.17** Comportamiento de la radiación solar y el potencial de hidrógeno, en ambas corridas

Durante el desarrollo de la corrida 1 se presentó una radiación solar promedio de  $490 \text{ W/m}^2$ , mientras que durante la corrida 2 fue de  $506 \text{ W/m}^2$  (Tabla 5.11).



**Figura 5.18** Comportamiento de la radiación solar y el oxígeno disuelto, en ambas corridas

A medida que la cantidad de radiación solar se ve incrementada, los valores de pH en ambas lagunas se ve disminuido (Figura 5.17). Mientras que, para el parámetro del oxígeno disuelto se puede apreciar un comportamiento directamente proporcional a dicho incremento (Figura 5.18).

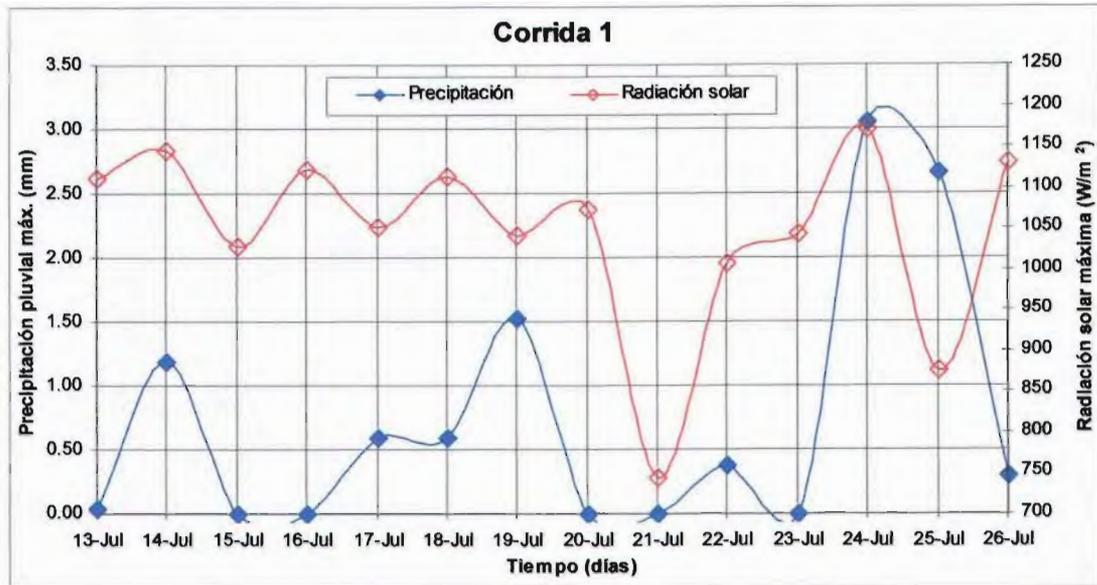
## V.2.5.3 PRECIPITACIÓN PLUVIAL

Día	Hora México	Precipitación		Día	Hora México	Precipitación		
		mm	cm			mm	cm	
13 de julio	00:00	0.042	0.004	14 de agosto	00:00	0.083	0.008	
	02:00	0.042	0.004		22:00	0.210	0.021	
	23:00	0.042	0.004		23:00	0.380	0.038	
14 de julio	00:00	0.083	0.008	15 de agosto	20:00	0.125	0.013	
	01:00	0.042	0.004		21:00	0.295	0.030	
	23:00	1.185	0.119		16 de agosto	18:00	0.085	0.009
15 de julio	--:--	0.000	0.000	17 de agosto	19:00	0.297	0.030	
16 de julio	--:--	0.000	0.000	18 de agosto	--:--	0.000	0.000	
17 de julio	20:00	0.593	0.059	19 de agosto	--:--	0.000	0.000	
	21:00	0.042	0.004	20 de agosto	--:--	0.000	0.000	
18 de julio	23:00	0.592	0.059	21 de agosto	--:--	0.000	0.000	
19 de julio	00:00	1.525	0.153	22 de agosto	21:00	0.168	0.017	
	01:00	0.507	0.051	22:00	0.083	0.008		
	21:00	0.083	0.008	23 de agosto	--:--	0.000	0.000	
19 de julio	23:00	0.763	0.076	24 de agosto	--:--	0.000	0.000	
	20 de julio	--:--	0.000	0.000	25 de agosto	01:00	1.565	0.157
21 de julio	--:--	0.000	0.000	18:00	1.693	0.169		
22 de julio	00:00	0.378	0.038	26 de agosto	03:00	0.042	0.004	
23 de julio	--:--	0.000	0.000		04:00	0.422	0.042	
24 de julio	01:00	3.048	0.305		05:00	0.125	0.013	
	02:00	0.042	0.004		06:00	0.295	0.030	
25 de julio	07:00	2.665	0.267		07:00	0.678	0.068	
	08:00	0.718	0.072		08:00	1.018	0.102	
26 de julio	03:00	0.168	0.017		09:00	0.593	0.059	
	04:00	0.293	0.029		10:00	0.083	0.008	
	05:00	0.042	0.004		21:00	0.042	0.004	
					27 de agosto	02:00	0.042	0.004
					03:00	0.338	0.034	
				04:00	0.763	0.076		
				05:00	0.890	0.089		
				06:00	0.467	0.047		
				07:00	0.127	0.013		
				08:00	0.042	0.004		
				15:00	0.085	0.009		
				16:00	0.042	0.004		
				17:00	0.085	0.009		

Tabla 5.12 Precipitación pluvial durante ambas corridas

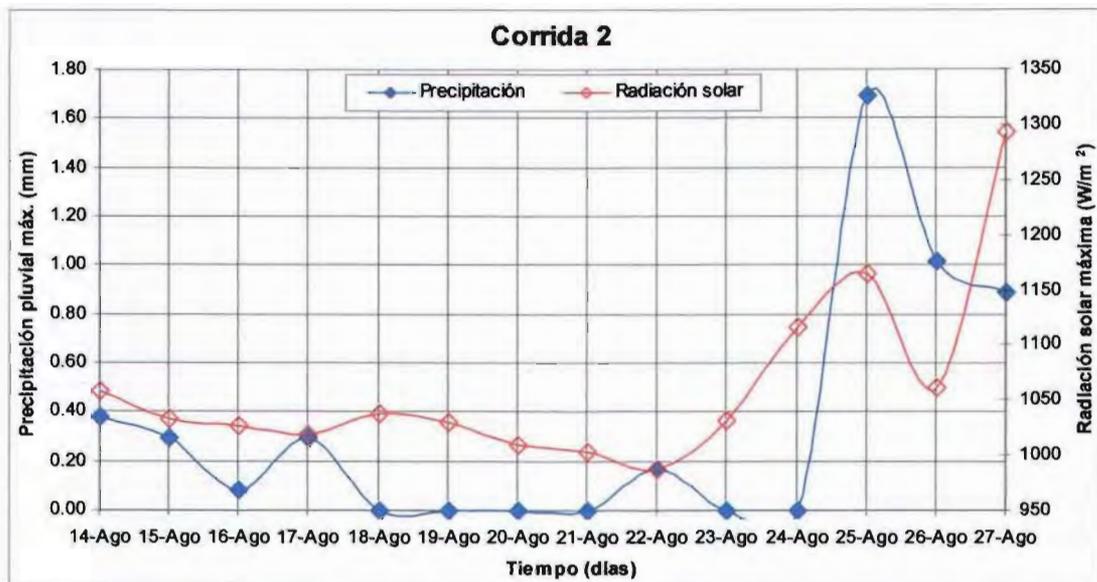
En ambas corridas se presentaron días con precipitación pluvial, desde lluvias ligeras hasta de intensidad moderada. Dicho factor afectó en algunos parámetros, sobre todo, durante el desarrollo de la primera corrida, como ya se mencionó anteriormente.

Al llevarse a cabo la experimentación a la intemperie, existen ciertos factores (como la precipitación) que son imposibles de controlar. Sin embargo, se considera que sólo causó cambios considerables en la determinación de las remociones alcanzadas durante los días 24 y 25 de julio.



**Figura 5.19** Precipitación pluvial vs. radiación solar media, durante la corrida 1

Se puede observar en ambas corridas (Figuras 5.19 y 5.20), que existe un comportamiento análogo entre la precipitación pluvial y la radiación solar máxima del día. Cabe mencionar que en tales figuras se grafica la precipitación pluvial máxima presente durante el día en cuestión.



**Figura 5.20** Precipitación pluvial vs. radiación solar media, durante la corrida 2

## V.2.6 POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO DISUELTO

Día	pH Con 3 mamp.		pH Control 2		OD (mg/l) Con 3 mamp.		OD (mg/l) Control 2	
	E*	S*	E	S	E	S	E	S
	Martes 14 de agosto	7.2	7.2	7.3	7.2	7.2	7.2	7.1
Miércoles 15 de agosto	8.2	8.3	8.2	8.3	7.2	7.3	7.1	7.1
Jueves 16 de agosto	7.3	7.3	7.2	7.2	7.4	7.3	7.3	7.2
Viernes 17 de agosto	8.1	8.1	8.1	8.0	7.6	7.7	7.6	7.8
Sábado 18 de agosto	7.0	7.0	7.0	6.9	8.3	8.4	8.4	8.4
Domingo 19 de agosto	7.2	7.2	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4
Lunes 20 de agosto	7.2	7.3	7.2	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3
Martes 21 de agosto	6.9	6.9	7.0	6.9	8.2	8.3	8.2	8.4
Miércoles 22 de agosto	7.0	7.0	7.0	7.1	7.3	7.2	7.4	7.2
Jueves 23 de agosto	7.3	7.3	7.3	7.3	7.0	7.1	7.0	6.9
Viernes 24 de agosto	7.3	7.2	7.2	7.3	7.3	7.3	7.2	7.1
Sábado 25 de agosto	6.9	6.9	6.9	6.8	7.0	7.2	7.2	7.1
Domingo 26 de agosto	6.8	6.8	6.8	7.0	6.9	6.8	6.9	6.7
Lunes 27 de agosto	7.0	7.1	7.1	7.1	6.9	6.7	6.8	6.6
<b>PROMEDIO</b>	8.1	8.1	8.1	8.1	7.3	7.4	7.3	7.3

E\* = Entrada

S\* = Salida

Tabla 5.13 pH y OD medidos en ambas lagunas, durante la corrida 2

Durante la corrida 2, los valores de pH y de oxígeno disuelto (al igual que en la corrida 1) se encontraron en el rango recomendado para favorecer el crecimiento algal. De igual forma, los valores promedio fueron de 8.00 para el pH y de 7.00 mg/l para el oxígeno disuelto.

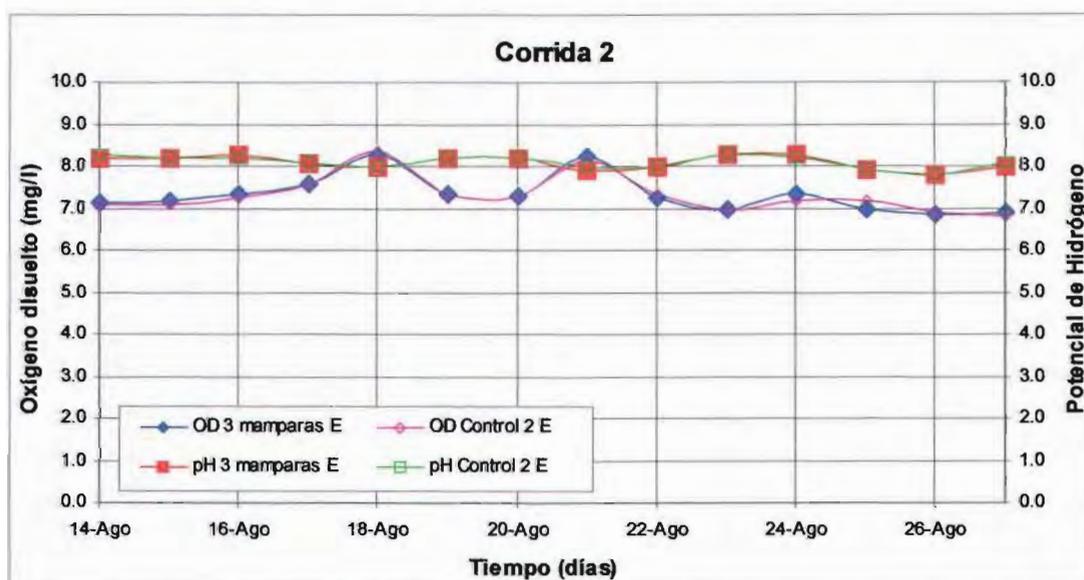
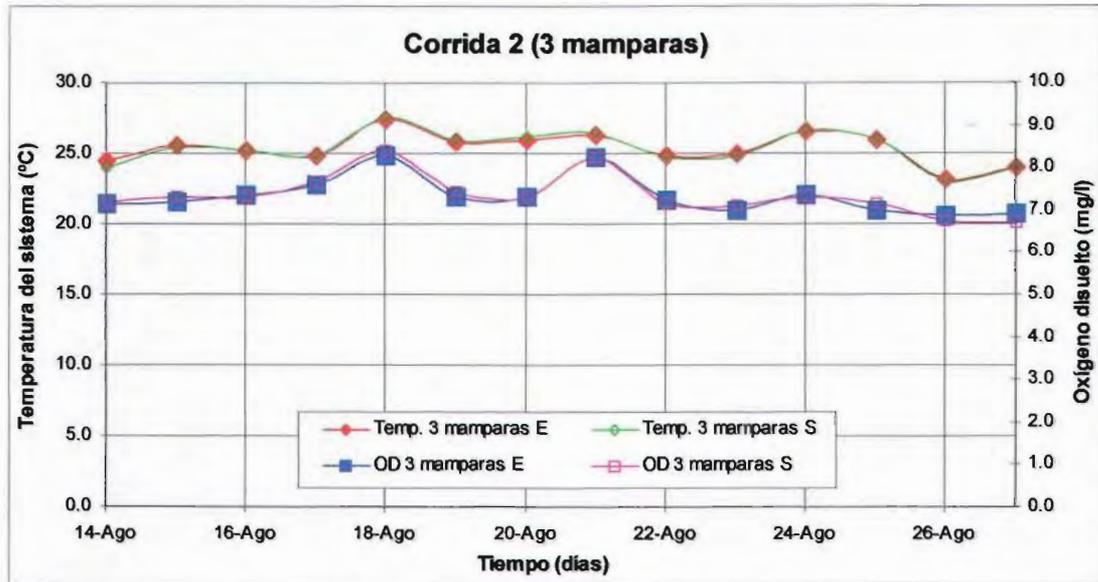


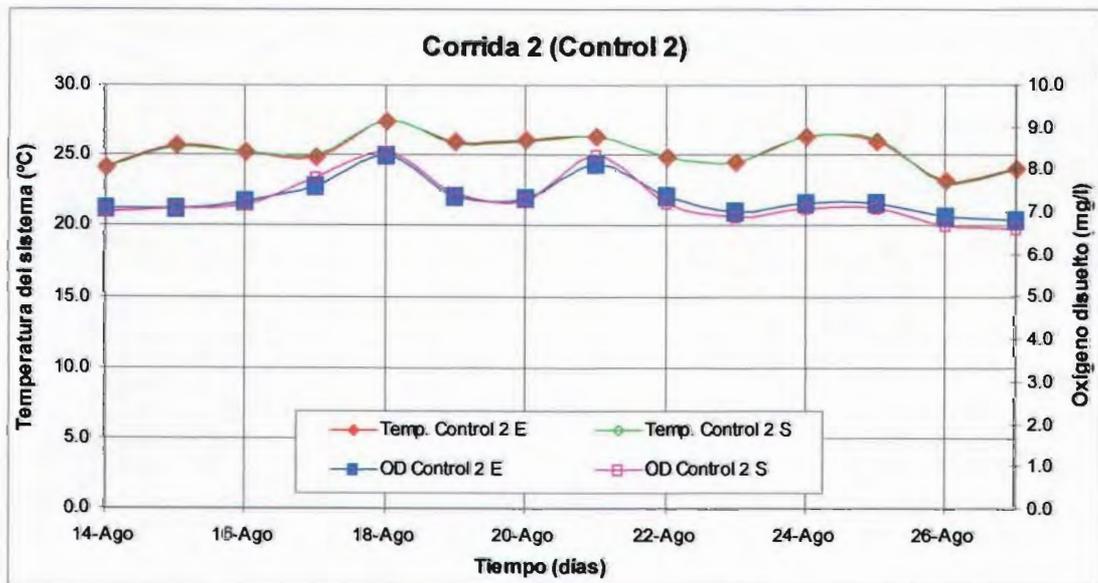
Figura 5.21 Comportamiento del oxígeno disuelto y el pH en ambas lagunas, durante la corrida 2

El comportamiento del oxígeno disuelto es muy similar a la entrada de ambas lagunas; lo mismo ocurre con el pH, el cual, al incrementarse provoca una disminución en la cantidad de oxígeno disuelto (Figura 5.21).



**Figura 5.22** Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna con 3 mamparas

En la laguna con 3 mamparas la temperatura del sistema y el oxígeno disuelto tienen la misma tendencia, ya que un incremento en la temperatura favorece el aumento del valor de oxígeno disuelto (Figura 5.22). Lo mismo ocurre en la laguna control, ya que al incrementarse la temperatura, el valor del oxígeno disuelto aumenta, de igual forma (Figura 5.23).



**Figura 5.23** Comportamiento de la temperatura del sistema y del oxígeno disuelto, en la laguna sin mamparas

### V.3 MONITOREO DE 24 HORAS

Se realizó un monitoreo cada hora, durante un lapso de 24 horas, para medir los parámetros de oxígeno disuelto, temperatura y potencial de hidrógeno, tanto a la entrada como a la salida de ambas lagunas; con el objeto de ver su comportamiento en función del tiempo.

Dicho monitoreo se realizó el día 13 de septiembre de 2001 y los resultados obtenidos, así como las observaciones realizadas, se muestran en las tablas siguientes:

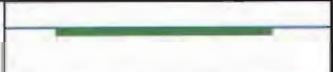
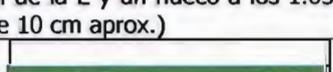
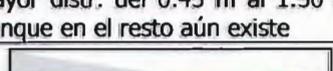
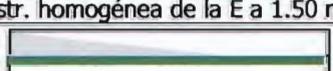
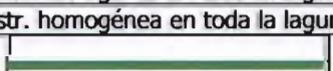
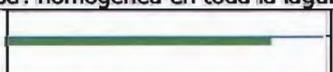
HORA	Con mamparas						Observaciones
	Entrada			Salida			
	pH	Temp. (°C)	OD (mg/L)	pH	Temp. (°C)	OD (mg/L)	
12:00 AM	9.14	25.7	6.35	9.16	25.6	6.32	
01:00 AM	9.24	25.6	5.52	9.23	25.4	6.77	
02:00 AM	9.11	25.1	6.38	9.11	25.2	7.03	
03:00 AM	9.00	24.9	6.20	9.03	24.7	6.39	
04:00 AM	8.94	24.0	6.53	8.99	24.4	6.44	Distribución de los 15 a los 60 cm de la entrada (E)
05:00 AM	8.99	24.1	6.04	9.02	23.9	6.09	Distr. desde los 30 cm.
06:00 AM	<b>8.31</b>	23.7	5.83	<b>8.73</b>	23.3	5.13	
07:00 AM	8.59	23.2	6.23	9.00	22.9	6.02	
08:00 AM	9.05	22.5	5.60	9.10	22.8	5.72	Distr. desde los 30 cm.
09:00 AM	9.01	<b>22.1</b>	<b>4.99</b>	8.94	<b>22.0</b>	<b>4.84</b>	Distr. horizontal a 60 cm de la E
10:00 AM	9.22	22.5	5.06	9.11	22.6	5.20	Distr. horiz. a 65 cm de la E
11:00 AM	8.81	23.9	5.60	8.85	24.0	5.58	Distr. horiz. a 65 cm de la E y en la primera mampara (15 cm aprox.)
12:00 PM	9.01	24.9	5.60	9.08	25.5	5.90	Distr. horiz. a 65 cm de la E y en la primera mampara
01:00 PM	9.37	25.8	6.50	9.18	26.3	6.20	Distr. horiz. a 70 cm de la E y en la primera mampara
02:00 PM	9.15	26.4	7.19	9.20	29.2	7.70	Inicia sombra a 70 cm de la E. Distr. horiz. a 60 cm de la E y en la primera mampara

03:00 PM	9.23	<b>28.5</b>	7.46	9.16	<b>29.9</b>	7.53	 Sombra a 1.25 m de la E. Distr. horiz. a 75 cm de la E y ya no en la primera mampara
04:00 PM	9.29	28.1	9.16	9.30	29.3	8.70	 Sombra total. Distr. horiz. a 95 cm de la E
05:00 PM	<b>9.43</b>	28.1	9.04	<b>9.31</b>	28.8	<b>8.90</b>	 Distr. horiz. a 75 cm de la E
06:00 PM	9.28	27.8	8.65	9.11	28.2	8.72	Distr. horiz. a 75 cm de la E
07:00 PM	9.22	27.2	9.01	9.27	27.6	7.64	 Distr. horiz. a 70 cm de la E; así como a los 90 cm (10 cm)
08:00 PM	9.28	26.6	8.81	9.01	27.2	8.36	Distr. horiz. a 70 cm de la E; así como a los 90 cm (10 cm)
09:00 PM	9.17	26.3	9.10	9.14	26.7	8.79	
10:00 PM	9.22	26.0	8.78	9.13	26.2	7.15	
11:00 PM	9.26	25.0	<b>10.00</b>	9.26	26.00	6.84	

\* Número rojo, valor mínimo encontrado

\*\* Número azul, valor máximo encontrado

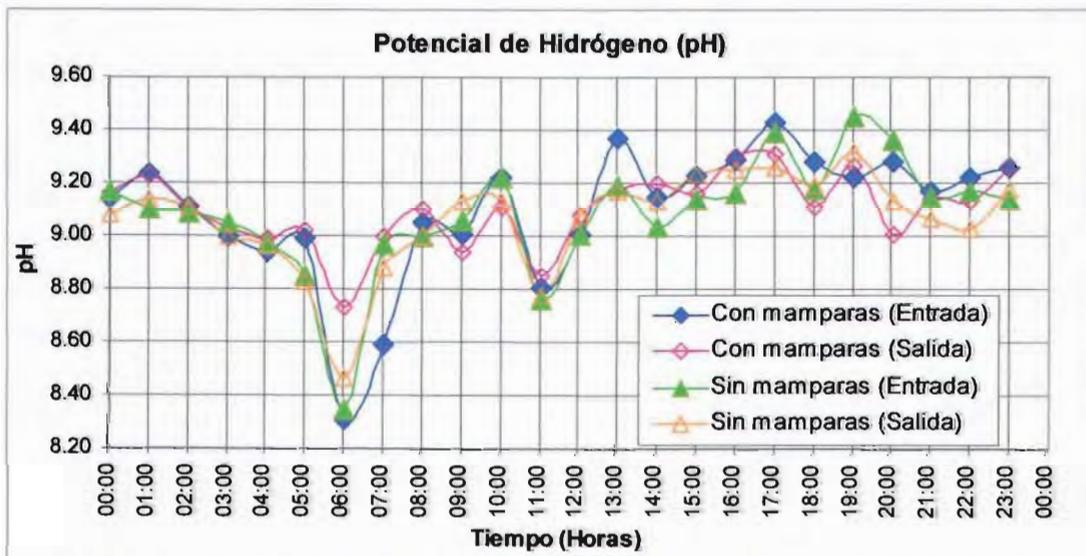
**Tabla 5.14** pH, temperatura y OD medidos en la laguna con mamparas, durante el monitoreo de 24 horas

HORA	Sin mamparas						Observaciones
	Entrada			Salida			
	pH	Temp. (°C)	OD (mg/L)	pH	Temp. (°C)	OD (mg/L)	
12:00 AM	9.17	25.4	7.38	9.08	25.7	6.27	
01:00 AM	9.10	25.5	7.73	9.14	25.6	7.12	
02:00 AM	9.09	25.2	7.16	9.11	24.9	6.99	
03:00 AM	9.05	24.7	7.48	9.00	25.0	5.95	
04:00 AM	8.98	24.6	6.25	8.96	24.6	6.49	 Distribución de 0.30 m a 1.50 m
05:00 AM	8.85	24.2	5.63	8.83	24.0	5.88	Distr. de 0.30 m a 1.50 m
06:00 AM	<b>8.35</b>	23.8	6.13	<b>8.47</b>	23.7	5.31	
07:00 AM	8.97	23.3	5.85	8.88	22.8	6.00	
08:00 AM	9.00	23.0	5.01	9.00	23.1	5.70	Distr. de 0.30 m a 1.50 m
09:00 AM	9.06	<b>22.3</b>	<b>4.92</b>	9.13	<b>21.6</b>	<b>4.45</b>	 Distr. horiz. a lo largo de la laguna
10:00 AM	9.22	22.5	5.64	9.13	22.5	4.71	Distr. horiz. a lo largo de la laguna
11:00 AM	8.76	24.0	5.59	8.78	23.3	5.55	 Distr. a todo lo largo, comenzando a los 10 cm de la E
12:00 PM	9.01	24.0	6.10	9.08	24.0	6.11	 Distr. homogénea a partir de los 15 cm de la E y un hueco a los 1.65 m (de 10 cm aprox.)
01:00 PM	9.19	25.0	6.71	9.17	24.8	6.74	 Mayor distr. del 0.45 m al 1.50 m; aunque en el resto aún existe
02:00 PM	9.04	25.8	7.99	9.13	27.6	8.60	 Distr. homogénea de la E a 1.50 m
03:00 PM	9.14	27.6	7.79	9.24	28.4	8.41	 Distr. homogénea en toda la laguna
04:00 PM	9.16	<b>28.4</b>	8.50	9.25	<b>29.1</b>	8.93	Distr. homogénea en toda la laguna
05:00 PM	9.39	27.9	8.10	9.26	28.2	<b>9.22</b>	 Distr. homogénea en toda la laguna
06:00 PM	9.18	27.8	8.55	9.19	26.8	<b>8.72</b>	 Distr. hasta 1.50 m

07:00 PM	9.45	27.3	9.00	9.32	27.0	7.22	
08:00 PM	9.36	26.8	8.76	9.13	26.9	8.58	
09:00 PM	9.15	26.4	8.59	9.07	26.5	8.62	
10:00 PM	9.17	25.8	8.70	9.03	26.1	7.46	
11:00 PM	9.14	25.7	9.25	9.18	25.8	7.90	

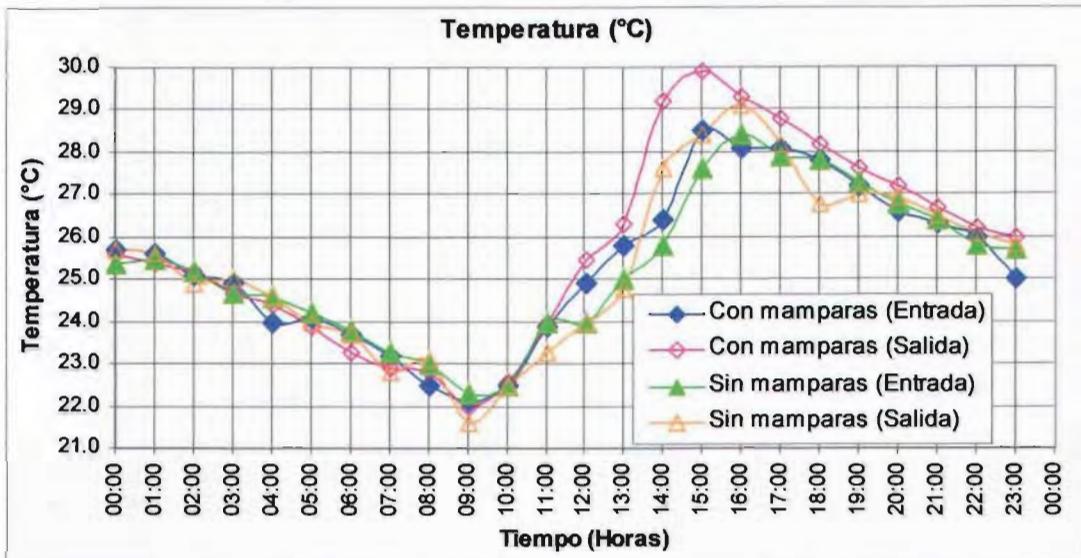
**Tabla 5.15** pH, temperatura y OD medidos en la laguna control, durante el monitoreo de 24 horas

Como puede observarse en las tablas 5.14 y 5.15, los valores mínimos de pH se presentaron a las 6:00 a.m. para todos los casos; mientras que los valores máximos se encontraron a las 5:00 p.m. para la laguna con mamparas y a las 7:00 p.m. para la laguna control (Figura 5.24). Los rangos recomendados para el crecimiento de las algas varían de 8.00 a 9.50 unidades de pH.



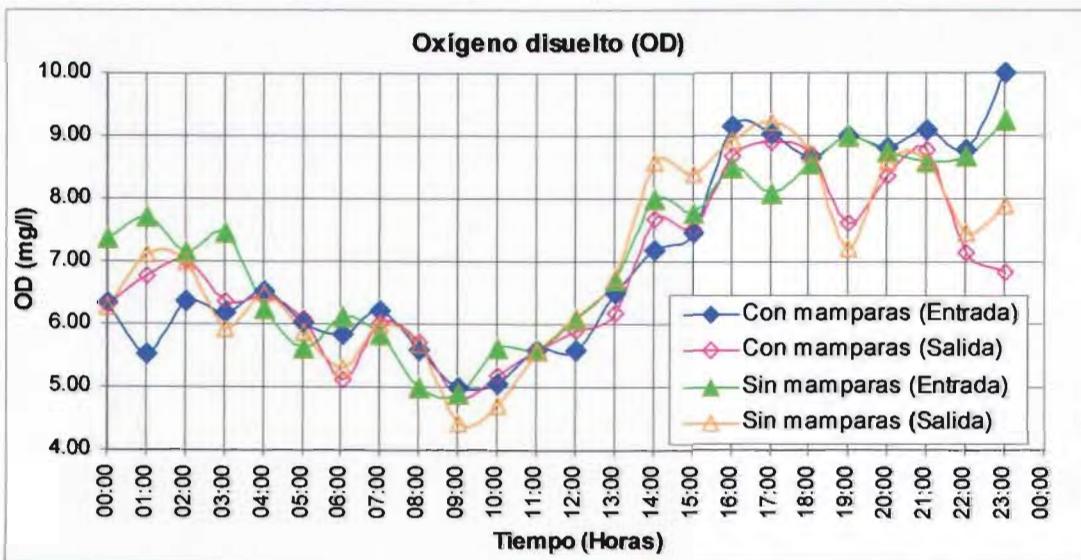
**Figura 5.24** Comportamiento del pH a la entrada y salida de ambas lagunas

Para el caso de la temperatura, el valor mínimo se presentó a las 9:00 a.m.; mientras que el valor máximo a las 3:00 p.m. para la laguna con mamparas y a las 4:00 p.m. para la laguna control (Figura 5.25). Los rangos de temperatura varían de los 22 a los 30°C; favoreciéndose el crecimiento algal en el rango de los 25 a los 30°C.



**Figura 5.25** Comportamiento de la temperatura a la entrada y salida de ambas lagunas

En cuanto al parámetro de oxígeno disuelto se observó que los valores mínimos se presentaron a las 9:00 a.m. y los valores máximos a las 11:00 p.m. para ambas entradas, y a las 5:00 p.m. para ambas salidas (Figura 5.26). Se tuvieron variaciones en un rango de 4 a 10 mg/l de OD. En este caso, el rango normal va de los 6 a los 35 mg/l.



**Figura 5.26** Comportamiento del oxígeno disuelto a la entrada y salida de ambas lagunas

Con base en lo anterior se puede establecer que el sistema se encontró trabajando en condiciones favorables para su funcionamiento.

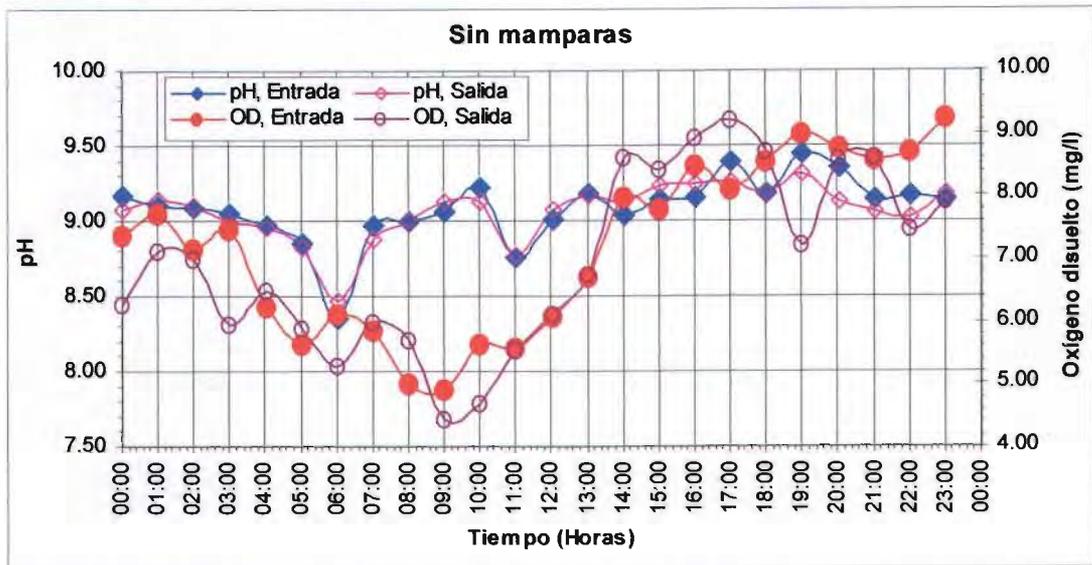
Durante el transcurso del día, las algas superficiales tuvieron un movimiento en conjunto y a medida que la temperatura llegaba a su punto máximo, se distribuían más uniformemente a lo largo de la laguna con mamparas, en el sentido del flujo, hasta poco antes de llegar a la primera mampara; mientras que, a las horas en las cuales la temperatura era más baja, se notó que las algas tuvieron un desplazamiento hacia la entrada de la laguna, en sentido contrario al movimiento del flujo.

En la laguna control el movimiento en conjunto de las algas no fue tan evidente, puesto que en ambos periodos (tanto cercano a la temperatura máxima, como cercano a la temperatura mínima) se encontraron distribuidas a todo lo largo de la laguna. Las dos lagunas se encontraban colocadas en paralelo, de manera que la influencia del viento puede considerarse igual en ambos casos.



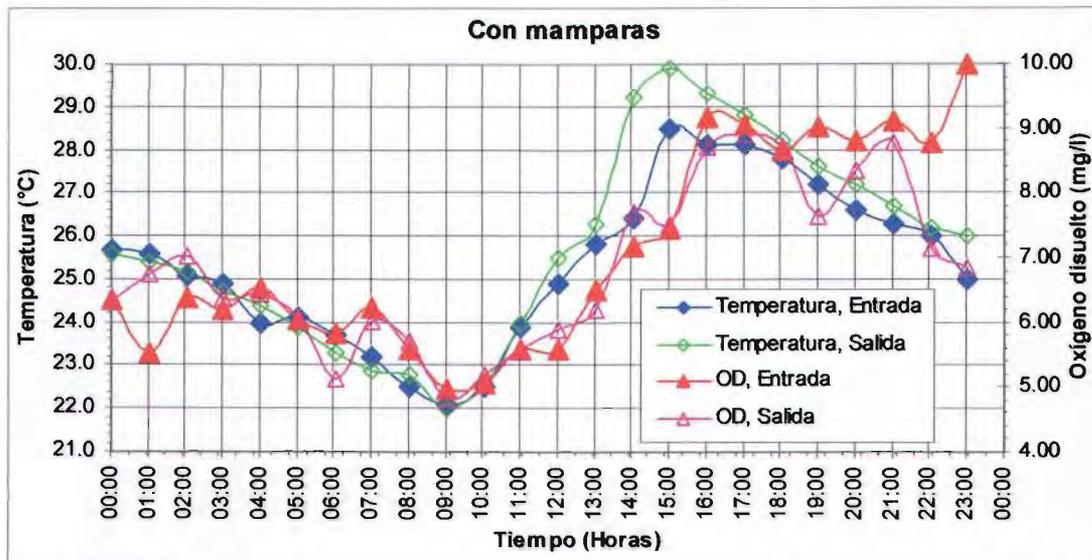
**Figura 5.27** Comparación entre el pH y el oxígeno disuelto en la laguna con mamparas

El comportamiento del pH fue muy homogéneo, tanto a la entrada como a la salida de la laguna con mamparas; lo mismo ocurrió con el oxígeno disuelto en ambos puntos de muestreo. Al incrementarse los valores de pH se nota una disminución en los valores de oxígeno disuelto en la laguna (Figura 5.27).



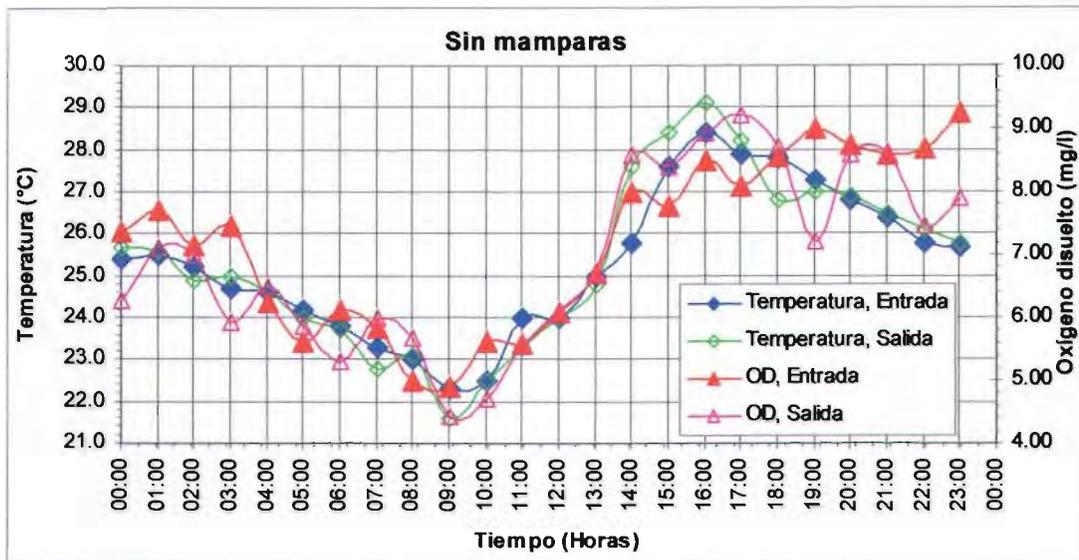
**Figura 5.28** Comparación entre el pH y el oxígeno disuelto en la laguna control

Algo similar se presenta en la laguna control, puesto que al incrementarse los valores de oxígeno disuelto disminuyen los de pH. Además, también en esta laguna los comportamientos entre los parámetros de pH a la entrada y a la salida, así como los de oxígeno disuelto son muy similares (Figura 5.28).



**Figura 5.29** Comparación entre la temperatura y el oxígeno disuelto, en la laguna con 2 mamparas

En la laguna con mamparas se observa que la temperatura del sistema y el oxígeno disuelto tienen una tendencia similar. A mayor temperatura, mayor cantidad de oxígeno disuelto (Figura 5.29).



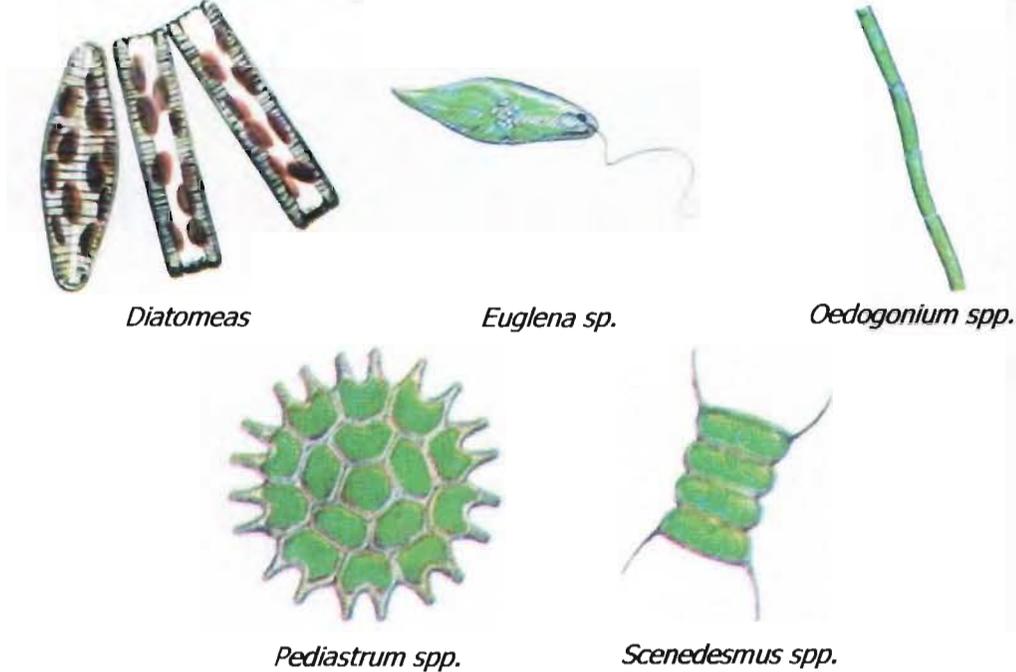
**Figura 5.30** Comparación entre la temperatura y el oxígeno disuelto, en la laguna control

De igual forma, en la laguna control se presenta la misma tendencia entre las curvas de temperatura del sistema y de oxígeno disuelto, tanto a la entrada como a la salida de la laguna (Figura 5.30).

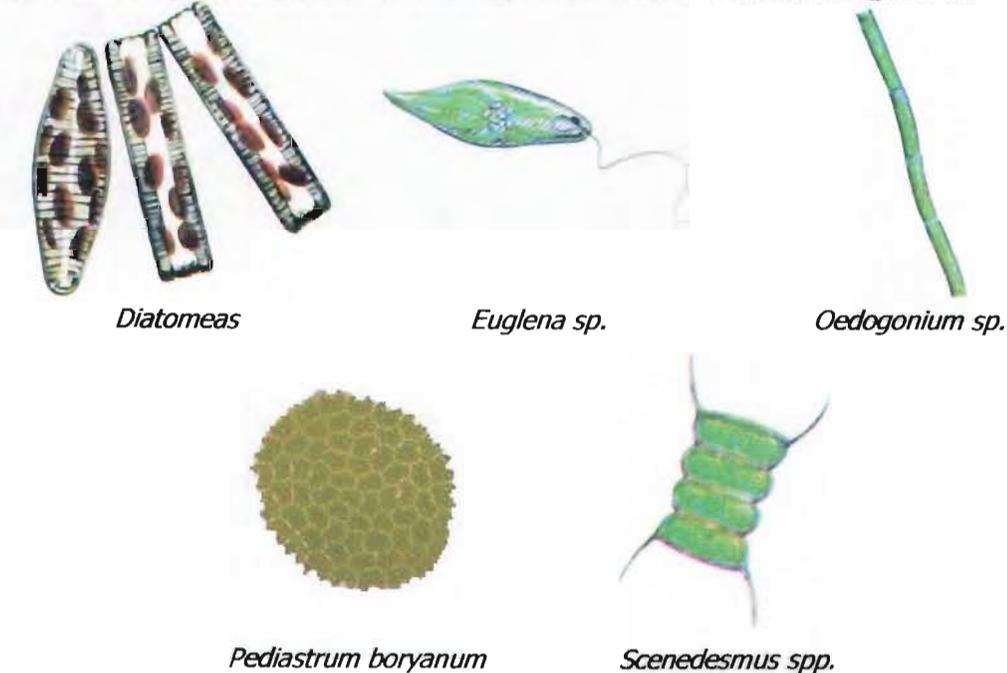
## V.4 OBSERVACIÓN AL MICROSCOPIO

Es importante determinar el tipo de algas predominantes en el agua, tanto a la entrada como a la salida de las lagunas con y sin mamparas; así como en la capa superficial de las algas. Se tomaron muestras para su observación, de acuerdo con lo recomendado por la técnica 10010 del Standard Methods<sup>2</sup>. Utilizándose un microscopio óptico compuesto, marca ZEISS, Stemi SV6, cuya lectura se realizó a 10 y 40X. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

a) A la entrada de ambas lagunas, existió mayor presencia de los siguientes Géneros:



b) Mientras que a la salida de las mismas, se encontraron los Géneros siguientes:



c) En la capa superficial de las algas, se observaron Géneros de:



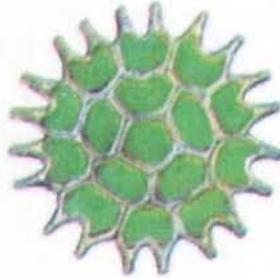
*Diatomeas*



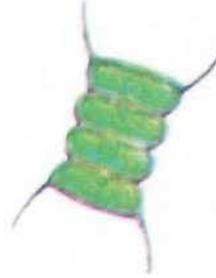
*Euglena sp.*



*Oedogonium spp.*



*Pediastrum spp.*



*Scenedesmus spp.*

Fuente de figuras: Standard Methods (1992)

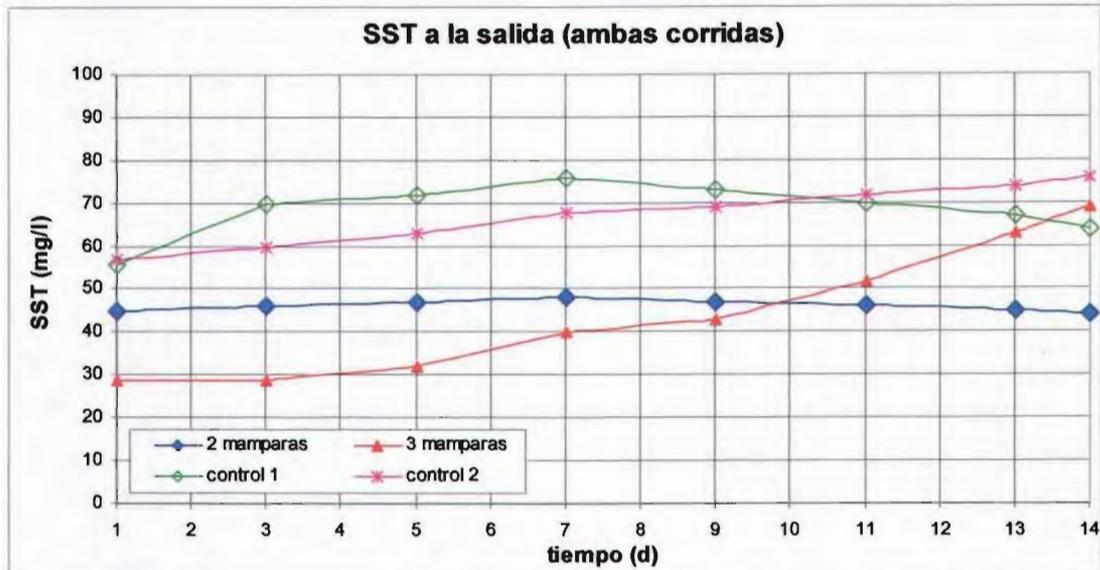
Con base en lo anterior, se establece que durante el desarrollo de la fase experimental se contó con la presencia de distintas divisiones de algas, encontrándose entre las algas clorofíceas (verdes) la *Oedogonium spp.*, *Pediastrum spp.*, *Pediastrum boryanum*, *Scenedesmus spp.* e *Hydrodictyon*. Entre las euglenofíceas se encontró la *Euglena sp.* y entre las bacillariofíceas la *Diatomea*.

Todas ellas son géneros comúnmente encontrados dentro de las lagunas de estabilización.

Clasificando las algas de acuerdo a los 3 tipos esperados, por los cuales se colocaron las distintas mamparas para su remoción, se tiene que dentro de las filamentosas se presentaron las algas *Oedogonium spp.* e *Hydrodictyon*; entre las flageladas, la *Euglena sp.* y entre las no móviles, el *Pediastrum spp.*, *Pediastrum boryanum* y *Scenedesmus spp.*

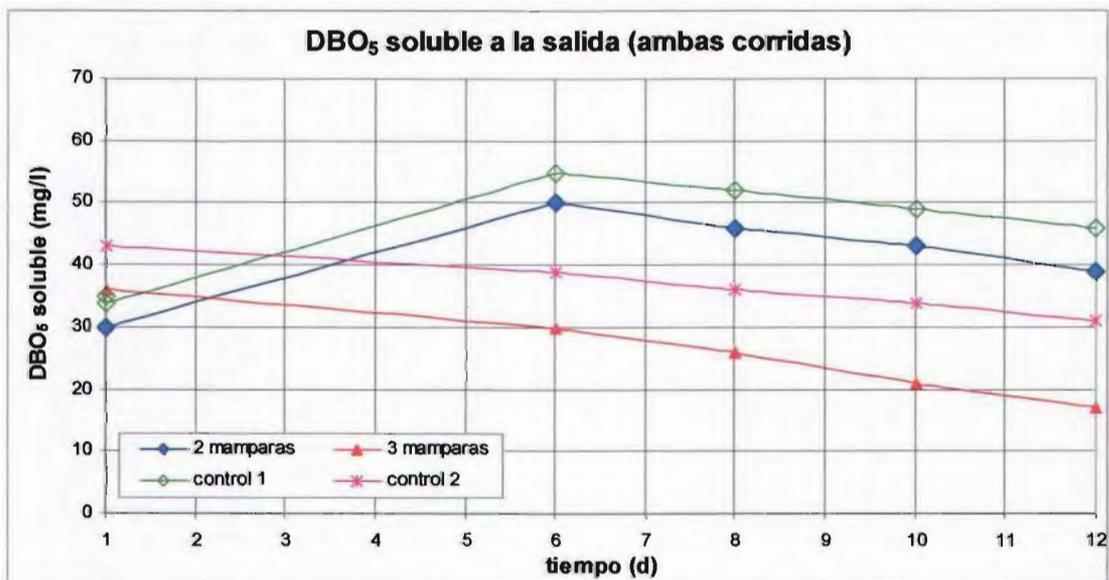
## V.5 COMPARACIÓN ENTRE LAS SALIDAS DE AMBAS CORRIDAS

A continuación se realiza una comparación gráfica entre los distintos parámetros medidos, cuyas salidas, transcurrido el TRH, se tomaron en consideración para evaluar visualmente la remoción obtenida en ambas corridas.



**Figura 5.31** Comparación entre los SST a la salida, en ambas corridas

Respecto al parámetro de los SST, visualmente se puede apreciar que las lagunas que obtuvieron mejores remociones son aquellas acondicionadas con mamparas (Figura 5.31), alcanzando una mejor remoción aquella con mayor número de mamparas.



**Figura 5.32** Comparación entre la DBO<sub>5</sub> soluble a la salida, en ambas corridas

En cuanto a la  $DBO_5$  soluble, visualmente se considera que las lagunas utilizadas durante la corrida 2 son las que obtienen mejores remociones (Figura 5.32). Siendo nuevamente la laguna con tres mamparas la que alcanza la mejor remoción.

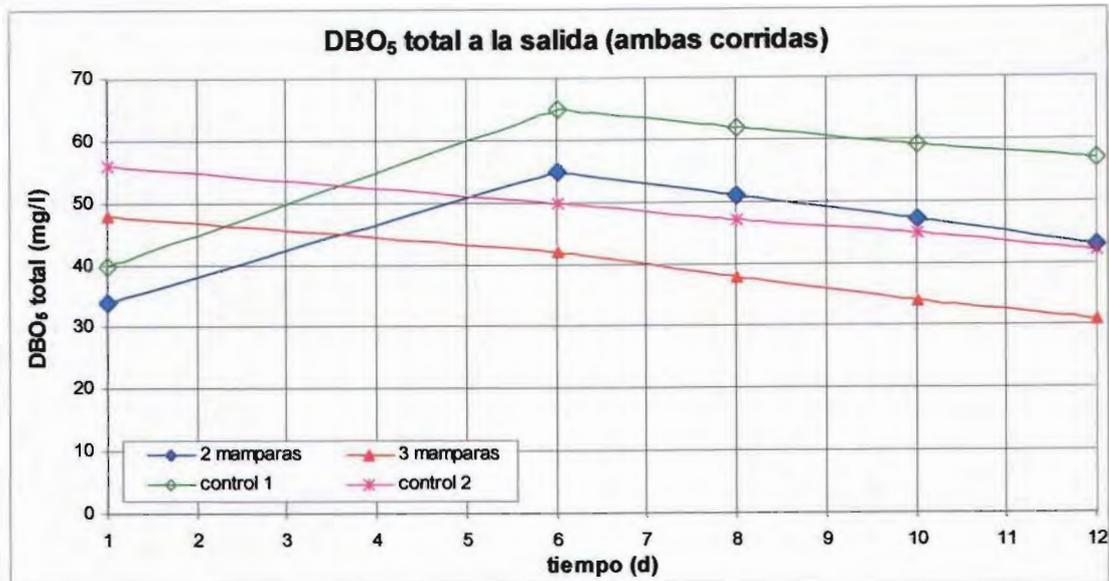


Figura 5.33 Comparación entre la  $DBO_5$  total a la salida, en ambas corridas

Lo mismo ocurre con la  $DBO_5$  total, ya que las lagunas utilizadas durante la segunda corrida son las que obtienen mejores remociones (Figura 5.33), siendo la laguna con tres mamparas la que obtiene la más alta remoción.

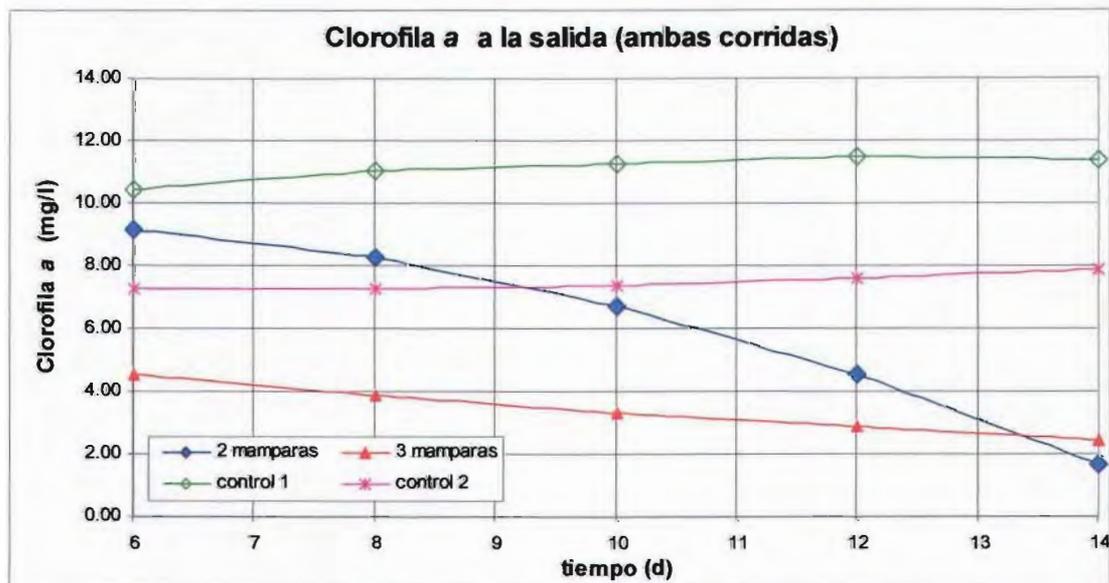
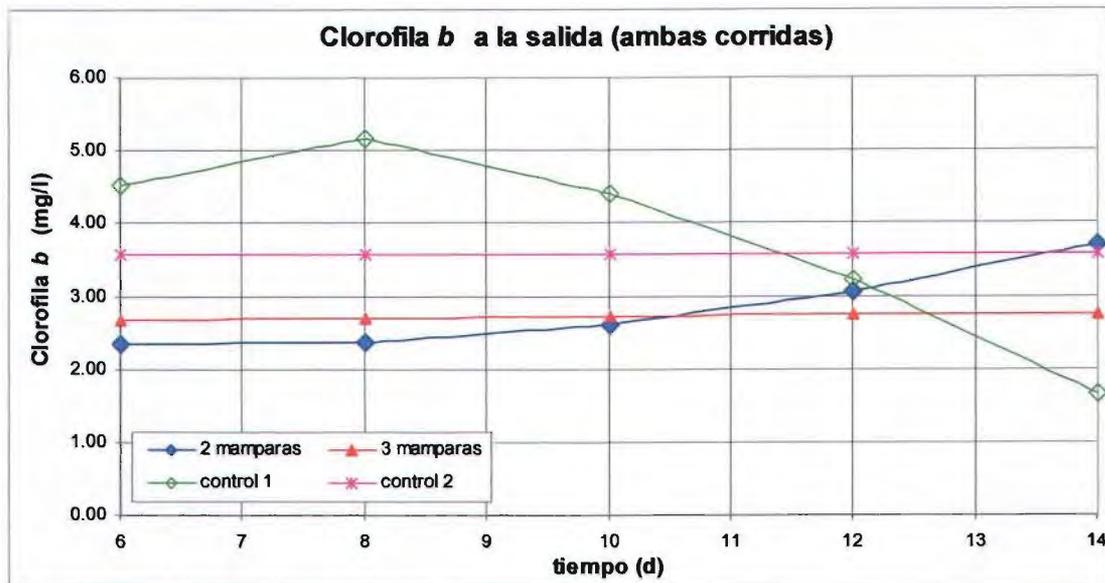
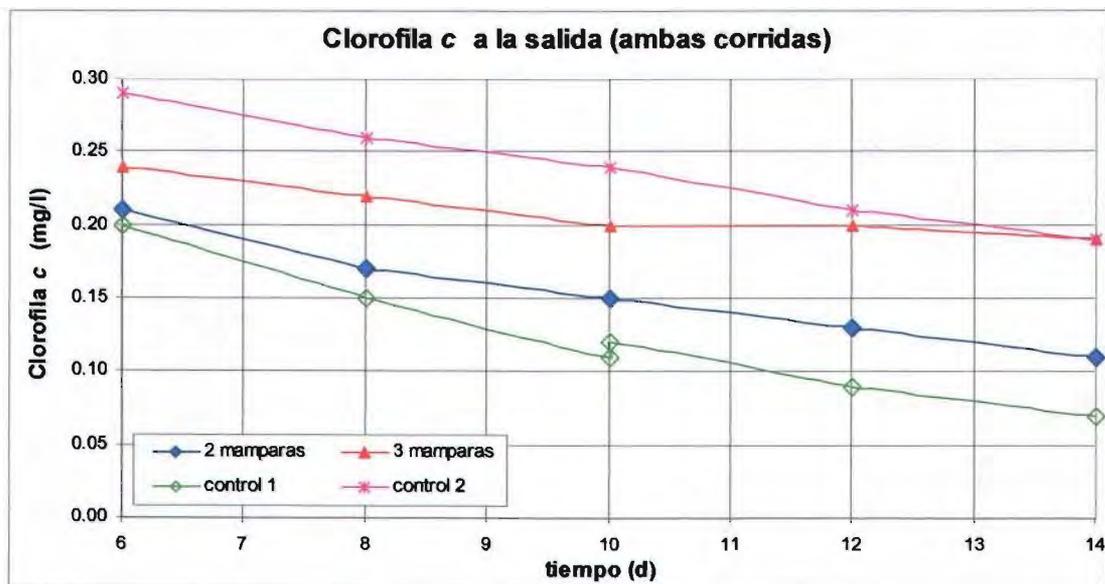


Figura 5.34 Comparación entre la clorofila  $a$  a la salida, en ambas corridas



**Figura 5.35** Comparación entre la clorofila *b* a la salida, en ambas corridas

Considerando los tres tipos de clorofilas, se aprecia visualmente que las lagunas acondicionadas con mamparas son las que alcanzan mejores remociones (Figuras 5.34, 5.35 y 5.36).



**Figura 5.36** Comparación entre la clorofila *c* a la salida, en ambas corridas

De acuerdo a las observaciones anteriores las lagunas acondicionadas con mamparas son las más adecuadas para alcanzar las mejores remociones.

Sin embargo, no basta con hacer una simple comparación gráfica a la salida para concluir cual laguna es la más apropiada, ya que debido a que ambas corridas no se realizaron en el mismo tiempo, sino en meses distintos y a que el agua residual cambia a cada instante, es necesario hacer un análisis estadístico a los datos que nos permita establecer cual laguna es la más adecuada para las remociones.

Debido a lo anterior, el experimento fue diseñado mediante bloques completamente aleatorizados, con el fin de controlar de manera adecuada la variabilidad de los datos.

Utilizando el software estadístico JMP, versión 3.2.1, edición estudiantil, se realizaron pruebas de homogeneidad entre ambos controles, ya que debido a la falta de material de laboratorio, necesario para realizar los análisis, ambas corridas no se llevaron a cabo de manera simultánea (Anexo D).

Similarmente a lo anterior, se realizaron pruebas a ambas corridas, (2 mamparas vs. control 1 y 3 mamparas vs. control 2) respectivamente, en las cuales se obtuvo que las lagunas que tenían mamparas alcanzaban mejores eficiencias que aquellas que carecían de las mismas.

Sin embargo, al realizar una comparación entre los valores a la entrada de la laguna con 2 y con 3 mamparas se obtuvo que dichos valores no son estadísticamente iguales. Por lo que no es posible determinar cual de las lagunas es más apropiada para la remoción algal, en términos de la DBO, los SST y la clorofila.

## V.6 CORRELACIONES ENCONTRADAS

Debido a que se obtuvo una mejor eficiencia mediante el uso de las mamparas y que no se conoce cual de las dos lagunas es la que obtiene mayor remoción, se decide trabajar con los datos que corresponden a las mediciones del tratamiento de dos mamparas, por ser más viable económicamente hablando por tener un número menor de mamparas por colocar.

Para confirmar si existen relaciones lineales entre las variables se obtienen las correlaciones utilizando métodos paramétricos y no paramétricos, debido a que las variables no presentan una distribución normal. Además, el número de observaciones es muy reducido para ciertas variables, por lo que se debe tener precaución al interpretar algunos de los resultados relacionados con la correlación.

Se toman en cuenta únicamente los pares de observaciones que tienen datos; así como los que tienen más de 5 pares de observaciones.

Se obtuvieron correlaciones altas ( $> 0.80$ ) para:

DBO <sub>5</sub> total	y	DBO <sub>5</sub> soluble
Clorofila <i>a</i>	y	SST
Clorofila <i>b</i>	y	Clorofila <i>a</i>

Así como correlaciones moderadas para:

Clorofila <i>a</i>	y	DBO <sub>5</sub> soluble
Clorofila <i>b</i>	y	DBO <sub>5</sub> soluble
Clorofila <i>b</i>	y	SST

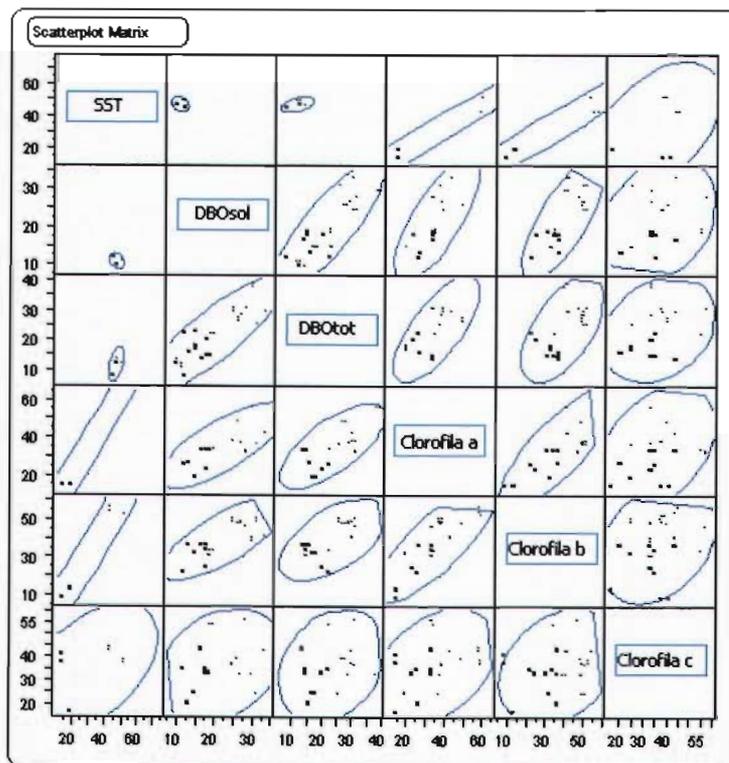


Figura 5.37 Correlaciones no multivariadas entre el conjunto de variables.

Variable 1	Variable 2	Rho Spearman	Prob >  Rho
DBO <sub>5</sub> soluble	SST	- 0.3333	0.4198
DBO <sub>5</sub> total	SST	0.4003	0.3257
DBO <sub>5</sub> total	DBO <sub>5</sub> soluble	0.8214	< 0.0001
Clorofila <i>a</i>	SST	0.9487	0.0003
Clorofila <i>a</i>	DBO <sub>5</sub> soluble	0.7761	< 0.0001
Clorofila <i>a</i>	DBO <sub>5</sub> total	0.6257	0.0002
Clorofila <i>b</i>	SST	0.7902	0.0196
Clorofila <i>b</i>	DBO <sub>5</sub> soluble	0.7141	< 0.0001
Clorofila <i>b</i>	DBO <sub>5</sub> total	0.6088	0.0004
Clorofila <i>b</i>	Clorofila <i>a</i>	0.8571	< 0.0001
Clorofila <i>c</i>	SST	0.2209	0.5991
Clorofila <i>c</i>	DBO <sub>5</sub> soluble	0.2243	0.2335
Clorofila <i>c</i>	DBO <sub>5</sub> total	0.2403	0.2008
Clorofila <i>c</i>	Clorofila <i>a</i>	0.3633	0.0250
Clorofila <i>c</i>	Clorofila <i>b</i>	0.2713	0.0994

**Tabla 5.16** Muestra las correlaciones de Spearman entre el conjunto de variables. Los pares de variables sombreados muestran una fuerte relación lineal entre ellas.

Para determinar la variabilidad de la clorofila *a* en función de la DBO<sub>5</sub> total se realizaron los pasos siguientes:

- Cálculo de las correlaciones (de Pearson) entre ambas variables (Anexo B),
- Obtención de los diagramas de dispersión correspondientes (Anexo C), y
- Cálculo de las regresiones lineales (Anexo B) sin ordenada al origen<sup>(\*)</sup>.

(\*) El ajuste se realizó sin ordenada al origen debido a las condiciones del problema considerado. Es natural observar que cuando no hay DBO<sub>5</sub> total no existe clorofila.

Para considerar que el ajuste de la recta (Clorofila *a* = coeficiente \* DBO<sub>5</sub> total) sea adecuado, se procede a observar el diagrama de dispersión junto con el coeficiente de correlación de Pearson, *r*.

Si este es cercano a 1 o a -1 y el valor *p* correspondiente sea pequeño, se puede considerar que los datos están correlacionados y que el ajuste obtenido se considera adecuado.

En el caso de que *r* no se encuentre cerca de 1 o de -1 y el valor *p* sea grande, entonces, aún y cuando el coeficiente de determinación  $R^2$  de la regresión sea cercano a 1, se sugiere tomar el ajuste con mucho cuidado pues los datos no están correlacionados y lo que la recta obtenida está mostrando es únicamente la tendencia que "pudieran" seguir los datos. La sugerencia de precaución está reforzada por el pequeño número de datos con el que se cuenta.

### V.6.1 Obtención de las rectas ajustadas

Las rectas ajustadas se forman para:

\* Entradas (2 mamparas)

**Clorofila *a* = 0.1582 DBO<sub>5</sub> total**

$$R^2 = 0.8764$$

$$r (\text{clorofila } a) = - 0.890$$

$$p = 0.003$$

\* Entradas (control 1)

**Clorofila *a* = 0.1543 DBO<sub>5</sub> total**

$$R^2 = 0.8804$$

$$r (\text{clorofila } a) = - 0.948$$

$$p = 0.0$$

\* Entradas (3 mamparas)

**Clorofila *a* = 0.1398 DBO<sub>5</sub> total**

$$R^2 = 0.9918$$

$$r (\text{clorofila } a) = 0.806$$

$$p = 0.016$$

\* Entradas (control 2)

**Clorofila *a* = 0.1407 DBO<sub>5</sub> total**

$$R^2 = 0.9920$$

$$r (\text{clorofila } a) = 0.824$$

$$p = 0.012$$

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados para este trabajo, se implementaron cambios en el flujo hidráulico dentro de las lagunas mediante la colocación de mamparas verticales sumergidas. Los resultados demuestran que en las lagunas acondicionadas con mamparas se obtienen mejores remociones de algas en el efluente (medidas como SST, DBO y clorofila), que en aquellas lagunas carentes de las mismas.

Así, se concluye que al realizar este cambio estructural es posible obtener una mejor remoción de las algas presentes en el efluente de la laguna.

Al evaluar estadísticamente los resultados se determinó igualdad en las entradas de las 2 lagunas utilizadas durante la corrida 1 (2 mamparas y control 1); así como en las 2 lagunas utilizadas durante la corrida 2 (3 mamparas y control 2).

Para comparar los resultados obtenidos a la salida de ambas corridas es necesario que exista igualdad entre ambos controles; así como entre las lagunas con 2 y con 3 mamparas. Los resultados indican que existe igualdad entre los controles, no así en las lagunas acondicionadas con mamparas, las cuales tienen entradas estadísticamente diferentes.

Por tanto, no es posible determinar cual de las dos lagunas acondicionadas con mamparas (2 ó 3 mamparas) es la más apropiada. Sin embargo, al compararlas con las lagunas control, se concluye que se alcanzaron mejores remociones en las lagunas con mamparas.

Para determinar si existe diferencia significativa en la remoción de algas del efluente de las lagunas es importante que se lleven a cabo corridas simultáneas entre las lagunas acondicionadas con 2 y con 3 mamparas, ya que la colocación de una mampara más conlleva un costo adicional.

La técnica utilizada para determinar clorofila *a* es muy susceptible a las condiciones en que se manipule la muestra. La cantidad de clorofila varía en función de la hora de muestreo y el grado de luminosidad con el cual se trabaje durante la determinación de la misma, entre otros factores. La clorofila se degrada muy rápidamente en presencia de la luz y su extracción debe llevarse al cabo con sumo cuidado para no afectar la concentración real de la muestra. Esta es una de las razones principales por la cual se intentó establecer la correlación entre la clorofila *a* y la DBO<sub>5</sub> total.

Con los datos de entrada de las dos corridas se obtuvo estadísticamente que:

$$\text{Clorofila } a = 0.14 \text{ DBO}_5 \text{ total}$$

En todos los casos se obtuvo  $R^2 > 0.88$ . Sin embargo, estos valores deben ser tomados con precaución debido a que el número de datos analizados es estadísticamente pequeño.

Conforme con las observaciones de pH, temperatura y oxígeno disuelto registradas durante el monitoreo de 24 horas, se determinó que el sistema operó en condiciones favorables. Las cuales se situaron en los siguientes intervalos de operación:

pH	8.0 – 9.5
temperatura (°C)	22 – 30
OD (mg/l)	4 – 10

En el reactor experimental no se observaron condiciones anóxicas. Durante el transcurso del día las algas filamentosas en la interfase agua-aire tuvieron un movimiento de conjunto. A medida que la temperatura alcanzaba su punto máximo (29.9°C, 15:00 h) se observó una distribución más uniforme a todo lo largo de la laguna con mamparas, en el mismo sentido del flujo, hasta poco antes de llegar a la primera mampara. En las horas en que la temperatura era más baja (22°C, 9:00 h), el desplazamiento observado fue en sentido contrario al movimiento del flujo.

En la laguna control no se apreció un movimiento tan evidente de las algas, ya que en ambos periodos se distribuyeron a todo lo largo de la laguna.

El movimiento de la masa algal puede explicarse parcialmente con el calentamiento gradual, durante el transcurso del día, del agua de los reactores, ya que cuando la temperatura alcanza su punto más alto existe un movimiento propio del mismo sistema, debido a que tiende a buscar un equilibrio térmico. Al ser este reactor de poca profundidad, el gradiente de temperatura es de 8°C, variación muy importante que habría que monitorear en un experimento subsecuente a nivel piloto para determinar si se presenta este intervalo. En general, la profundidad de las lagunas de estabilización oscila entre 1.5 – 2.5 m y el calentamiento de la masa total de agua se presentará de manera más estratificada.

De las observaciones en el microscopio óptico (objetivo 40X) se determinaron las tres formas de algas esperadas: filamentosas, flageladas e inmóviles. Entre las filamentosas se observaron *Oedogonium spp.* e *Hydrodictyon*; entre las flageladas se apreció *Euglena sp.* y entre las inmóviles, *Pediastrum spp.*, *Pediastrum boryanum* y *Scenedesmus spp.*; así como diatomeas.

Se concluye que se obtienen mejores remociones, determinadas con los parámetros elegidos, en las lagunas acondicionadas con mamparas que en aquellas carentes de las mismas.

## RECOMENDACIONES

Es necesario realizar corridas simultáneas para determinar si es más conveniente la colocación de una o varias mamparas más, ya que eso significaría un costo adicional y en una obra lo que se desea es la mejor opción al menor costo posible.

Con la finalidad de continuar las investigaciones en el tema, se recomienda que se acondicione con mamparas sumergidas una laguna a nivel piloto, escalada de una laguna real y posteriormente, se apliquen los resultados obtenidos en una laguna a escala real, con el objeto de que los resultados sean lo más apegados a la realidad.

Si se lleva a cabo lo anterior, se sugiere se tomen solo como una guía los datos considerados en el presente trabajo, ya que debe recordarse que se trataron de reactores, es decir, no son modelos a escala.

También se recomienda el llevar a cabo muestreos en diferentes épocas del año, para determinar la termodinámica del sistema a lo largo del día y del año; la variación estacional del crecimiento algal, dar seguimiento a parámetros que determinen eficiencias de remoción, como el nitrógeno y el fósforo, así como alguna correlación de la clorofila *a*; la variación de las características del influente; y la variación de las condiciones climatológicas.

**Alga.** Extenso grupo de plantas simples que se encuentran especialmente en hábitats marinos o en agua dulce, aún cuando también existen algas terrestres. El término alga no tiene significado taxonómico y se utiliza comúnmente para referirse a aquellas plantas que muestran poca diferenciación celular, y poca o ninguna diferenciación entre hojas, tallo y raíces. Todas las algas contienen clorofila que, sin embargo, puede estar ocultada por diversos pigmentos accesorios. Ver *también* clorofitos, cianofitos, feofitos, rodofitos.

**Área (A).** Superficie comprendida dentro de un perímetro; medida en unidades de longitud al cuadrado.

**Autótrofos.** Organismos con capacidad para utilizar el bióxido de carbono, como única fuente de carbón.

**Biomasa.** Masa total de los componentes biológicos de un ecosistema.

**Calibración.** Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento o sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud, realizados por los patrones, efectuando una corrección del instrumento de medición para llevarlo a las condiciones iniciales de funcionamiento.

**Carga de diseño.** Combinación entre caudal y concentración de un parámetro específico, que se usa para dimensionar un proceso de tratamiento, bajo condiciones aceptables de operación.

**Carga superficial.** Caudal o masa de un parámetro por unidad de área, que se usa para dimensionar un proceso de tratamiento. Se mide en  $m^3/m^2 d$  o  $kg DBO/ha d$ .

**Carga orgánica.** Cantidad total de materia orgánica que contiene un agua residual.

**Cianofíceas.** Clase de algas (*Cyanophyceae*) de la división de los *Esquizófitos*, llamadas también *Cianófitos*, *Mixofíceas*, *Esquizofíceas* o *Algas azules*; unicelulares, viven aisladas o en colonias en el agua (incluso en las fuentes termales) y en los lugares húmedos; membrana a menudo gelificada que forma un invólucro mucilaginoso; citoplasma diferenciado en dos partes, una *periférica*, que contiene los pigmentos (clorofila y ficocianina) que confieren al alga un característico color verde azulado, y una *interna*, incolora. Generalmente autótrofas, pueden vivir en simbiosis con hongos formando líquenes. Se multiplican agámicamente por división celular y por propágulos pluricelulares. Superan condiciones desfavorables transformándose en esporas perdurantes.

**Descarga.** Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público o de la Nación.

**Diatomeas.** División del reino vegetal (*Diatomeae*), llamada también *Baciliarófitos* (*Bacillariophyta*) o *Bacilariofíceas* (*Bacillariophyceae*); algas microscópicas, unicelulares, de agua dulce, de mar o de tierra. El plancton se compone principalmente de *diatomeas* y por eso son importantes en las cadenas alimenticias. Tienen paredes celulares de sílice (frústulas) compuestas por dos válvulas ornamentadas con perforaciones dispuestas en forma diferente en cada especie. Tienen forma de cajita de píldoras (céntrica) o de cajón (pinada). Los cloroplastos contienen clorofilas *a* y *c*, carotenos y xantofila.

**Euglena.** Género de *Fitoflagelados* (división *Euglenófitos*, clase *Euglenofíceas*), que comprende organismos unicelulares, verdes por la presencia de clorofila, a la que muy a menudo se añade un pigmento rojo (hematocromo). Las *Euglenas* viven en las aguas dulces y algunas especies en la nieve.

**Eutroficación.** Proceso de envejecimiento de un cuerpo de agua. Se caracteriza por una alta productividad biológica que puede manifestarse como un incremento de malezas acuáticas. A la larga lleva a la desaparición del cuerpo de agua.

**Estado del tiempo según la temperatura.**

ESTADO	TEMPERATURA
Helado	< 2.5°C
Frío	2.5 a 10°C
Fresco	10 a 20°C
Templado	20 a 30°C
Caluroso	30 a 40°C
Bochornoso	> 40°C

Fuente: <http://smn.cna.gob.mx>

**Flagelados.** Clase de protozoos de forma alargada, con uno o varios flagelos como órganos locomotores. Son animales muy primitivos algunos de los cuales comparten características vegetales y animales. Viven en medios diversos, casi siempre en agua.

**Flagelo.** Cada una de las prolongaciones finas y móviles que tienen algunos microorganismos y les sirve para cambiar de posición y de lugar.

**Gasto o caudal (Q).** Volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de una corriente en un periodo de tiempo; se expresa en unidades de longitud al cubo por tiempo.

**Grados Celcius (°C).** Es la unidad de la escala de temperatura definida por el punto de hielo fundente al que se le atribuye el valor de cero grados (0°C) y el de ebullición del agua que se atribuye el valor de cien grados (100°C). Ambos puntos determinados a la presión de 101,325 kPa.

**Heterótrofo.** Organismo que obtiene energía y carbón a partir de compuestos orgánicos.

**Inocuo.** Que no hace daño.

**Intensidad de precipitación.** Es la razón de incremento de la altura que alcanza la lluvia respecto al tiempo. Se clasifica en ligera, moderada y fuerte, según se observa en la tabla siguiente:

INTENSIDAD	mm/h	CRITERIOS
Ligera	2.5 ó menos	Las gotas son fácilmente identificables unas de otras. Las superficies expuestas secas, tardan más de 2 minutos en mojarse completamente
Moderada	2.5 – 7.5	No se pueden identificar gotas individuales. Los charcos se forman rápidamente. Las salpicaduras de la precipitación se observan hasta cierta altura del suelo o de otras superficies planas
Fuerte	> 7.5	La visibilidad es bastante restringida y las salpicaduras que se producen sobre la superficie se levantan varias pulgadas

Fuente: <http://smn.cna.gob.mx>

**Límite máximo permisible (LMP).** Valor o ámbito asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales.

**Lodo activado.** Masa biológica formada durante el tratamiento de agua residual, por el crecimiento de bacterias y de otros microorganismos en presencia de oxígeno disuelto.

**Materia orgánica.** Compuesto orgánico que contiene carbón e hidrógeno, a veces combinado con oxígeno, nitrógeno y azufre.

**Microorganismo.** Ser vivo que sólo se puede observar utilizando microscopios.

**Muestra compuesta.** La que resulta de mezclar un número de muestras simples de aguas residuales. Para conformar la muestra compuesta el volumen de cada una de las muestras simples debe ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

**Muestra simple.** La que se toma en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación, que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento del muestreo.

**Muestreo.** Acción que consiste en tomar un volumen considerado como representativo de algo, agua, suelo, plantas, animales, etcétera; con la finalidad de examinar diversas características definidas.

**Oxidación.** La adición de oxígeno, la pérdida de hidrógeno o el aumento en la valencia de un elemento.

**Piretro = Pelitre.** Planta herbácea anual de la familia de las compuestas, con tallos inclinados, de 3 a 4 decímetros de longitud. La raíz, reducida a polvo, se usa como insecticida.

**Piretrina I (C<sub>21</sub>H<sub>28</sub>O<sub>3</sub>).** Ingrediente insecticida de las flores del pelitre. Líquido viscoso, insoluble en agua y soluble en otros disolventes comunes. Tóxico.

**Piretrina II (C<sub>22</sub>H<sub>28</sub>O<sub>5</sub>).** Ingrediente insecticida de las flores del pelitre. Menos tóxico que la piretrina I.

**Preservación de las muestras.** Proceso por el cual, por medio de adición de productos químicos o la modificación de las condiciones físicas, o ambas, se reducen al mínimo los cambios de las características de la muestra a terminar durante el tiempo que transcurre entre el muestreo y el análisis.

**Scenedesmus.** Género de algas *Clorofíceas* que viven en las aguas dulces, en colonias de cuatro o más individuos dispuestos linealmente; no poseen zoósporas y se reproducen por esporas inmóviles.

**Sólidos suspendidos fijos (SSF).** Representan el contenido en materia inorgánica de las aguas residuales y debido a que no están sujetos a degradación (con excepción de los sulfatos que son degradados a sulfuros), se dice que los procesos de tratamiento de aguas residuales no los afectan, y por lo general son compuestos minerales que producen dureza y contaminación mineral.

**Sólidos suspendidos volátiles (SSV):** Representa el contenido orgánico de las aguas residuales, constituyen los elementos que más fácilmente pueden entrar en putrefacción y en algunos de los casos los más difíciles de eliminar. Se dice que el grado de contaminación del agua residual, depende de la cantidad de sólidos orgánicos que contiene. Generalmente son carbohidratos, grasas y proteínas.

**Sólidos suspendidos totales (SST).** Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos y materia orgánica en suspensión y/o coloidal, que son retenidas en el elemento filtrante.

**Sólidos suspendidos (SS).** Son pequeñas partículas de contaminantes en el agua, que contribuyen a su turbidez y que son perceptibles a simple vista, siendo factible su separación por procesos de sedimentación y/o filtración. Se dividen en sólidos suspendidos fijos y sólidos suspendidos volátiles.

**Tirante (profundidad).** Distancia de la superficie libre del agua al fondo del cauce.

**Turbulencia.** Movimientos desordenados de los hilillos en la corriente turbulenta de un fluido en el cual las moléculas en vez de seguir trayectorias paralelas, describen trayectorias sinuosas y forman torbellinos.

**Velocidad (v).** Distancia que recorre una partícula de agua en la unidad de tiempo; expresada en longitud por tiempo.

**Volumen (Vol).** Espacio ocupado por un cuerpo de agua; se mide en unidades de longitud al cubo. Cuando el volumen se relaciona con el espacio que ocupa un prisma de área (A) y su altura conocida como lámina (L), el volumen se obtiene con la ecuación  $Vol=AL$ ; cuando el volumen se relaciona con el gasto entregado en un intervalo de tiempo, el volumen se obtiene con la ecuación  $Vol=Qt$ .

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aldana, Carlos, y José García, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, *Flujo en canales abiertos y su aplicación*, Universidad Autónoma de Zacatecas, Escuela de Ingeniería, Zacatecas, Zac., 1987, pp. 2 – 16
2. American Public Health Association, APHA, American Water Works Association, AWWA, and Water Environment Federation, WEF, *Standard Methods for the examination of water and waste water*, 18<sup>th</sup> ed., 1992, pp. 2-53 – 2-58, 5-1 – 5-6, 10-1 – 10-47
3. B. Simons, Daryl, y Suat Sentürk, *Sediment transport technology*, Water and sediment dynamics, Water Resources Publications, USA, 1992, p. 155
4. Berezowsky, Moisés, y Reynaldo Vilchis, *Protección y control de cauces*, CNA-IMTA, México, 2000, pp. 60, 61
5. Bold, Harold, y Michael Wynne, *Introduction to the algae*, Structure and reproduction, Prentice-Hall, 1978, pp. 125, 126, 258
6. Cigana, John, Giscard Lefebvre, Claude Marche, and Martin Couture, "Design criteria of underflow baffles for control of floatables", *Water Science and Technology*, vol. 38, 10, 1998, pp. 57 – 63
7. Cisterna, Pedro, y Paulina Medina, *VI – 075 - Incidencia de biomasa algal en la DBO<sub>5</sub>, DQO y SST en efluente de la laguna de estabilización de la comuna de Florida- Concepción*, XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, Brasil, 3 al 8 de diciembre, 2000, pp. 1 – 10
8. Collí, José, y Violeta Escalante, *Lagunas de estabilización en México, Manual para la evaluación de su funcionamiento*, CNA-IMTA, México, diciembre, 1991, p. 3
9. Comisión Nacional del Agua, *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, Unidad de Agua Potable y Saneamiento, Gerencia de Potabilización y Tratamiento, diciembre, 2003, pp. 51 – 57
10. -----, *Situación del Subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento a diciembre de 2003*, Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana, 2004, pp. 31 – 34
11. Craggs, Rupert, Valerie Smith, and Paul McAuley, "Wastewater nutrient removal by marine microalgae cultured under ambient conditions in mini-ponds", *Water Science and Technology*, vol. 31, 12, 1995, pp. 151 – 160
12. Crites, Ron, y George Tchobanoglous, *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*, McGraw-Hill, Colombia, 2000, pp. 476, 482 – 484

13. Cruz, Arturo, *Muestreo y técnicas de análisis en lagunas de estabilización*, Parte I: Método manual, Curso-taller Internacional Avanzado, Diseño y operación de lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales industriales y municipales, IMTA, Jiutepec, Morelos, 15 al 19 de abril, 1996
14. *Enciclopedia Microsoft Encarta en línea 2001*, Microsoft Corporation, 1997 – 2000  
<http://encarta.msn.es>
15. Fritz, Jack, Andrew Middleton, and Dale Meredith, "Dynamic process modeling of wastewater stabilization ponds", *Journal WPCF*, vol. 51, 11, november, 1979, pp. 2724 – 2743
16. Henry, Glynn, y Gary Heinke, *Ingeniería Ambiental*, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., México, 1999, pp. 147 – 150, 256, 266 - 274, 453
17. Huerto, Rubén, y Pilar Saldaña, "Control de malezas acuáticas en México", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, vol. IX, 3, septiembre-diciembre, 1994, pp. 15 –34
18. Informe Final (Convenio SGP CNA- IMTA) TC – 9716, *Tecnología de punta para el reuso de agua residual en México*, México, 1997, pp. 27 - 29, 106
19. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Laboratorio de calidad del agua, Área: Química Analítica. Físicoquímicos, Temas: *DBO<sub>5</sub> total y DBO<sub>5</sub> soluble*, Claves: CAQAF6-14 y CAQAF6-42, fechas de edición: agosto 18, 1998 y noviembre 25, 1998, pp. 1 – 9 y 1 – 10
20. Jiménez, Blanca, *La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada*, Limusa, S.A. de C.V., México, 2001, pp. 71 – 73, 127, 133 - 135
21. Jonguitud, Vicente, *Consideraciones para selección de sistemas de tratamiento para aguas residuales*, Curso Internacional. Las lagunas de estabilización como alternativa de tratamiento para reuso agrícola, IMTA, Jiutepec, Morelos, septiembre, 1995
22. Killani, J.S., y J. A. Ogunrombi, "Effect of baffles on the performance of model waste stabilization ponds", *Water Research*, vol 18 (8), 1984
23. *Lagunas de estabilización*  
[http://cidta.usal.es/Unidad\\_H/Edar/Unidades/LIBROS/logo/IndiDoc.htm](http://cidta.usal.es/Unidad_H/Edar/Unidades/LIBROS/logo/IndiDoc.htm)
24. León, Guillermo, *Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización*, Seminario Internacional. Lagunas de Estabilización, Santiago de Cali, Colombia, 12 al 14 de julio, 1995
25. Martínez, Carlos, y Carlos Quintal, *Condiciones de carga orgánica, temperatura, precipitación, radiación solar, sulfuros y sulfatos en la estratificación de la biomasa algal en lagunas de estabilización*, XII Congreso Nacional 2000, FEMISCA, A.C., Morelia, Mich., 21 al 24 de marzo, 2000, pp. 665 – 679

26. Merritt, Frederick, *Manual del Ingeniero Civil*, 1ra. ed. en español, McGraw-Hill, México, 1983, pp. 22-29 – 22-31
27. Metcalf y Eddy, *Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*, 3ra. ed., McGraw-Hill, México, 1996, pp. 104, 105, 496 – 500
28. Middlebrooks, Joe, Donald Porcella, Robert Gearheart, Gary Marshall, James Reynolds, y William Grenney, "Techniques for algae removal from wastewater stabilization ponds", *Journal of Water Pollution Control Federation*, vol. 46, 12, december, 1974, pp. 2676 - 2695
29. Middlebrooks, Joe, Charlotte Middlebrooks, James Reynolds, Gary Watters, Sherwood Reed, and Dennis George, *Wastewater stabilization lagoons design, performance and upgrading*, Collier Mackmillan Publishers, 1982
30. Mijaylova, Petia, *Concepto del tratamiento de aguas residuales en lagunas de estabilización, comparación económica y del proceso con otros sistemas de tratamiento*, Curso-taller Internacional Avanzado, Diseño y operación de lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales industriales y municipales, IMTA, Jiutepec, Morelos, 15 al 19 de abril, 1996
31. Moeller, Gabriela, y Violeta Escalante, *I-157 – Las lagunas de estabilización: Tecnología apropiada o Tecnología de punta para el tratamiento de aguas residuales? La experiencia mexicana*, XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, Brasil, 3 al 8 de diciembre, 2000, pp. 1 – 6
32. Morgan, Juan, Blanca Jiménez, y Adalberto Noyola, *Un nuevo índice para la interpretación de las curvas de distribución de tiempos de residencia en tanques para el tratamiento de agua*, XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y ciencias ambientales, FEMISCA, A.C., Zacatecas, Zac., 4 al 7 de noviembre, 1997, pp. 98 – 112
33. Muttamara, Sarmon, and Udomphon Puetpaiboon, "Roles of baffles in waste stabilization ponds", *Water Science and Technology*, vol. 35, 8, 1997, pp. 275 – 284
34. New York State Department of Health, *Manual of Instruction for Water Treatment Plant Operators*, Limusa, pp. 111 – 115
35. Pearson, Howard, José Collí, Mauricio Rico, Jesús García, Violeta Escalante, Armando Rivas, y Mintcho Iliev, *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, Libro II. Proyecto, 3ª. Sección: Potabilización y tratamiento, Tema: Tratamiento, Subtema: Lagunas de estabilización, CNA-IMTA, marzo, 1994, pp. 21, 36 – 43, 63 – 65, 125
36. Pedahzur, Rami, Abidelfatah Nasser, Inka Dor, Badri Fattal, and Hillel Shuval, "The effect of baffle installation on the performance of a single-cell stabilization pond", *Water Science and Technology*, vol. 27, 7-8, 1993, pp. 45 – 52

37. Rico, Mauricio, y Violeta Escalante, *Manual de diseño de sistemas lagunares y reactores anaerobios*, CNA-IMTA, México, 1991, pp. 9, 10, 19, 22, 24, 25, 44 – 47, 49 – 54
38. Rivas, Armando, *Lagunas de Estabilización*, XXII Sistemas lagunares de tratamiento, Curso teórico práctico de tratamiento de agua residual, municipal e industrial, IMTA, Jiutepec, Morelos, abril, 1998, p. 1
39. Rolim, Sérgio, *Sistemas de lagunas de estabilización. Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadíos*, McGraw-Hill, Colombia, 2000, pp. 1, 6 - 10, 19, 30 – 32, 44 – 58, 199 – 201, 216, 218, 219, 228, 229
40. Romero, Jairo, *Acuitratamiento por lagunas de estabilización*, Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, Colombia, agosto, 1998, pp. 23, 33, 121, 162, 173, 179, 196 - 201, 206, 258, 260 – 262
41. -----, *Calidad del Agua*, Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, Colombia, junio, 1999, pp. 176, 195, 253
42. Ruiz, Alejandro, *Determinación de clorofila a*, Documento interno, IMTA, Subcoordinación de Hidrobiología y Evaluación Ambiental, pp. 1 – 19
43. Sáenz, Rodolfo, *HDT 33: Consideraciones en relación con el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales*, CEPIS – OPS, Perú, junio, 2000  
<http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt33/hdt33.html>
44. Scott, John, and Paul Smith, *Dictionary of Waste and Water Treatment*, British Library, London, England, 1981, pp. 4, 13, 34, 187
45. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Jefatura de agua potable y alcantarillado, *Estudio de lagunas de estabilización en México. Recomendaciones preliminares para su diseño*, México, diciembre, 1970, pp. III-14 – III-15, IV-4 – IV-14
46. Unda, Francisco, *Ingeniería Sanitaria Aplicada a Saneamiento y Salud Pública*, Limusa Noriega Editores, México, 1993, pp. 80, 81, 188 – 191
47. Villarreal, A., y Francisca Soler, *Diseños Experimentales. Conceptos y Aplicaciones*, Apuntes de clase, DEPFI-UNAM, México, D.F., 1996
48. Watters, Gary, Kenneth Mangelson, and Robert George, *The hydraulics of waste stabilization ponds*, Part I. The effect of hydraulic flow characteristics on treatment efficiency, Final Report to the Office of Water Resources Research, on project A-008-Utah, Utah State University, february, 1973, p. 3

- Cochran, William, y Gertrude Cox, *Diseños experimentales*, Trillas, S.A. de C.V., México, enero, 1990, pp. 33, 34, 75 - 80
- Environmental Protection Agency, Office of Water Programs, *Plankton analysis*, Training Program, october, 1972
- Maza, José, y Manuel García, *Manual de Ingeniería de ríos*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1996
- Mijaylova, Petia, *Objetivos del tratamiento de las aguas residuales según el destino del efluente*, Curso taller internacional: Lagunas de Estabilización, Diseño, operación, mantenimiento y rehabilitación, septiembre, 1996
- Montgomery, Douglas, *Diseño y análisis de experimentos*, Grupo Editorial Iberoamérica, S.A. de C.V., México, 1991, pp. 1, 3, 7, 8, 119 - 139,
- Mott, Robert, *Applied Fluid Mechanics*, 4<sup>th</sup> ed., Prentice Hall, Inc., New Jersey, USA, 1994
- Pearson, Howard, *Estimation of chlorophyll a as a measure of Algal Biomass in Waste Stabilization Ponds*, In Proceedings of the Regional Seminar on Waste Stabilization Ponds Research, PanAmerican Center for Sanitary Engineering Environmental Sciences, Lima, Perú
- Polprasert, Chongrak, y Kiran Bhattarai, "Modelo de Dispersión para Estanques de Estabilización de Aguas Residuales", *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, vol. III, 1, febrero, 1985
- Winkler, Michael, *Tratamiento biológico de aguas de desecho*, Limusa Noriega Editores, 2da. reimpresión, México, 1993

## ANEXO A

Para realizar los análisis de comparación entre las diferentes combinaciones de los factores: 2 mamparas, 3 mamparas, control 1 y control 2 con las variables respuesta: entradas, reducción y salidas, se verifica primero el supuesto de normalidad y posteriormente el de homogeneidad de varianzas.

Al detectarse que las variables no siguen una distribución normal, se procede a verificar la igualdad de varianzas mediante la prueba de Levene. Así mismo, para comparar los dos factores en sus diferentes combinaciones se utiliza el análisis de varianza y la prueba de Kruskal Wallis, en el caso en el que las variables no tienen varianzas iguales.

El paquete estadístico utilizado es el MINITAB, versión 13.1 para windows, el cual posee ciertas propiedades técnicas que lo hacen ser especialmente útil en la estadística aplicada. Entre ellas, cabe destacar un entorno agradable y de uso fácil, integración en un único paquete del análisis descriptivo, contrastes de hipótesis, regresión lineal y no lineal, análisis factorial, ANOVA, etc., una excelente capacidad gráfica, total compatibilidad con las herramientas de office, entre otras.

Los resultados para cada una de las comparaciones de los factores y para cada una de las variables se presentan a continuación. Se muestran los p-valores obtenidos de la comparación de los factores. Los valores sombreados indican que en esa variable los dos factores proporcionan respuestas iguales. Valores con negritas indican que se encuentran en un intervalo de incertidumbre y debe tenerse precaución en su interpretación. Los demás valores indican que en esa variable los dos factores proporcionan respuestas diferentes.

### A.1 PRUEBAS PARA 2 MAMPARAS Y EL CONTROL 1

#### Entradas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.637	0.730	0.643	0.920	0.717	0.344
Medias	0.209	0.892	0.806	0.973	0.886	0.826

#### % de remoción

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.260	0.020 <sup>(*)</sup>	0.065 <sup>(*)</sup>	0.597	0.181	0.950
Medias	0.000	0.056	0.056	0.000	0.001	0.012

<sup>(\*)</sup> Debido a la diferencia de las varianzas, se usa la prueba de Kruskal Wallis.

#### Salidas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.141	0.493	0.385	0.344	0.660	0.267
Medias	0.000	0.661	0.465	0.004	0.007	0.593

## A.2 PRUEBAS PARA 3 MAMPARAS Y EL CONTROL 2

### Entradas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	1.000	1.000	1.000	0.939	0.906	0.490
Medias	1.000	1.000	1.000	0.933	0.784	0.920

### % de remoción

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.595	0.152	0.427	0.309	0.002	0.753
Medias	0.000	0.024	0.009	0.003	0.001 <sup>(*)</sup>	<b>0.167</b>

### Salidas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.561	0.588	0.623	0.014	0.866	0.580
Medias	0.000	0.342	0.090	0.035 <sup>(*)</sup>	0.001	0.682

## A.3 PRUEBAS PARA EL CONTROL 1 Y CONTROL 2

### Entradas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	1.000	0.093	0.183	0.608	0.098	0.582
Medias	0.077	0.298	0.298	0.002	0.014	0.893

### % de remoción

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.392	0.786	0.782	<b>0.121</b>	0.679	0.964
Medias	0.799	0.006	0.233	0.197	0.639	0.695

### Salidas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.417	<b>0.095</b>	<b>0.125</b>	0.630	<b>0.082</b>	<b>0.077</b>
Medias	0.132	0.177	0.481	0.000	0.002	0.875

#### A.4 PRUEBAS PARA 2 Y 3 MAMPARAS

### Entradas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.733	0.024	0.016	0.679	0.347	0.293
Medias	0.358	0.245 <sup>(*)</sup>	0.399 <sup>(*)</sup>	0.002	0.010	0.855

### % de remoción

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.964	0.965	0.809	0.361	0.137	0.719
Medias	0.206	0.361	0.974	0.697	0.499	0.679

### Salidas

Pruebas	SST	DBO <sub>5</sub> soluble	DBO <sub>5</sub> total	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila c
Varianzas (Levene)	0.745	0.050	0.014	0.595	0.057	0.653
Medias	0.071	0.206 <sup>(*)</sup>	0.396 <sup>(*)</sup>	0.048	0.006 <sup>(*)</sup>	1.000

Cuando los p-valores asociados a cada una de las variables son mayores a 0.05 no se rechaza la hipótesis nula de homogeneidad de varianzas. Por lo que se procede a determinar si existen diferencias en promedio entre ambos grupos.

## ANEXO B

### B.1 Entradas sin ordenada

#### B.1.1 2 mamparas

	Coefficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila <i>a</i> )
DBO <sub>5</sub> total	0.15822130	0.00020351	0.876355433	- 0.890
	6 observaciones eliminadas			p = 0.003

Coefficientes:

DBO <sub>5</sub> total	Valor 0.15822130	Error estándar 0.02246277	t-valor 7.04371287	Pr (>   t  ) 0.00020351
	Error residual estándar R <sup>2</sup> múltiple	4.94385112 0.87635543	con 7 grados de libertad	
	Estadístico F p - valor	49.61389106 0.00020351	en 1 y 7 grados de libertad 6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores	

#### B.1.2 Control 1

	Coefficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila <i>a</i> )
DBO <sub>5</sub> total	0.15438188	0.000181	0.8803627	- 0.948
	6 observaciones eliminadas			p = 0.0

Coefficientes:

DBO <sub>5</sub> total	Valor 0.15438188	Error estándar 0.02151046	t-valor 7.17706058	Pr (>   t  ) 0.00018103
	Error residual estándar R <sup>2</sup> múltiple	4.87319952 0.88036274	con 7 grados de libertad	
	Estadístico F p - valor	51.51019850 0.00018103	en 1 y 7 grados de libertad 6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores	

#### B.1.3 3 mamparas

	Coefficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila <i>a</i> )
DBO <sub>5</sub> total	0.13976382	0.00000001	0.99179322	0.806
	6 observaciones eliminadas			p = 0.016

Coefficientes:

DBO <sub>5</sub> total	Valor 0.13976382	Error estándar 0.00480531	t-valor 29.08527976	Pr (>   t  ) 0.00000001
	Error residual estándar R <sup>2</sup> múltiple	0.96222684 0.99179322	con 7 grados de libertad	
	Estadístico F p - valor	845.95349889 1.46193246	en 1 y 7 grados de libertad 6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores	

**B.1.4 Control 2**

	Coeficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila <i>a</i> )
DBO <sub>5</sub> total	0.1406840	0.00000001	0.9919682	0.824
	6 observaciones eliminadas			p = 0.012

Coefficientes:

	Valor	Error estándar	t-valor	Pr (>   t  )
DBO <sub>5</sub> total	0.14068409	0.00478468	29.40301803	0.00000001

Error residual estándar	0.95809598	con 7 grados de libertad
R <sup>2</sup> múltiple	0.99196822	
Estadístico F	864.53746942	en 1 y 7 grados de libertad
p - valor	1.3556 x 10 <sup>-8</sup>	6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores

**B.2 Salidas sin ordenada**

**B.2.1 2 mamparas**

	Coeficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila <i>a</i> )
DBO <sub>5</sub> total	0.1144460	0.00053124	0.83814159	- 0.308
	6 observaciones eliminadas			p = 0.459

Coefficientes:

	Valor	Error estándar	t-valor	Pr (>   t  )
DBO <sub>5</sub> total	0.11444601	0.01900906	6.02060430	0.00053124

Error residual estándar	3.28554369	con 7 grados de libertad
R <sup>2</sup> múltiple	0.83814159	
Estadístico F	36.24767618	en 1 y 7 grados de libertad
p - valor	0.00053124	6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores

**B.2.2 Control 1**

	Coeficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila <i>a</i> )
DBO <sub>5</sub> total	0.142903	0.00017	0.8817	- 0.880
	6 observaciones eliminadas			p = 0.004

Coefficientes:

	Valor	Error estándar	t-valor	Pr (>   t  )
DBO <sub>5</sub> total	0.14290330	0.01978074	7.22436509	0.00017374

Error residual estándar	3.75782027	con 7 grados de libertad
R <sup>2</sup> múltiple	0.88173968	
Estadístico F	52.19145099	en 1 y 7 grados de libertad
p - valor	0.00017374	6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores

### B.2.3 3 mamparas

	Coefficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
DBO <sub>5</sub> total	0.103306	0.00001210	0.94435	0.55879
	6 observaciones eliminadas			p = 0.150

Coefficientes:

	Valor	Error estándar	t-valor	Pr (>   t  )
DBO <sub>5</sub> total	0.10330665	0.00947857	10.89897394	0.00001210

Error residual estándar	1.46034540	con 7 grados de libertad
R <sup>2</sup> múltiple	0.94435065	
Estadístico F	118.78763294	en 1 y 7 grados de libertad
p - valor	0.00001210	6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores

### B.2.4 Control 2

	Coefficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
DBO <sub>5</sub> total	1.186 x 10 <sup>-1</sup>	6.954 x 10 <sup>-8</sup>	0.987192	0.488
	6 observaciones eliminadas			p = 0.220

Coefficientes:

	Valor	Error estándar	t-valor	Pr (>   t  )
DBO <sub>5</sub> total	1.186 x 10 <sup>-1</sup>	5.1086 x 10 <sup>-3</sup>	23.22828852	6.9540 x 10 <sup>-8</sup>

Error residual estándar	0.87975781	con 7 grados de libertad
R <sup>2</sup> múltiple	0.98719247	
Estadístico F	539.55338771	en 1 y 7 grados de libertad
p - valor	6.9540 x 10 <sup>-8</sup>	6 observaciones eliminadas debido a la falta de valores

## B.3 Entradas para diferencias (DBO<sub>5</sub> total – DBO<sub>5</sub> soluble)

### B.3.1 2 mamparas

	Coefficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
Diferencia	1.073	0.00	0.883	- 0.916
				p = 0.01

### B.3.2 Control 1

	Coefficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
Diferencia	0.780	0.00	0.844	- 0.555
				p = 0.077

**B.3.3 3 mamparas**

Diferencia	Coficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
	0.694	0.00	0.960	0.006 p = 0.495

**B.3.4 Control 2**

Diferencia	Coficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
	0.698	0.00	0.959	0.0 p = 0.5

**B.4 Salidas para diferencias (DBO<sub>5</sub> total – DBO<sub>5</sub> soluble)**

**B.4.1 2 mamparas**

Diferencia	Coficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
	1.094	0.00	0.866	- 0.136 p = 0.374

**B.4.2 Control 1**

Diferencia	Coficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
	0.887	0.001	0.795	- 0.273 p = 0.256

**B.4.3 3 mamparas**

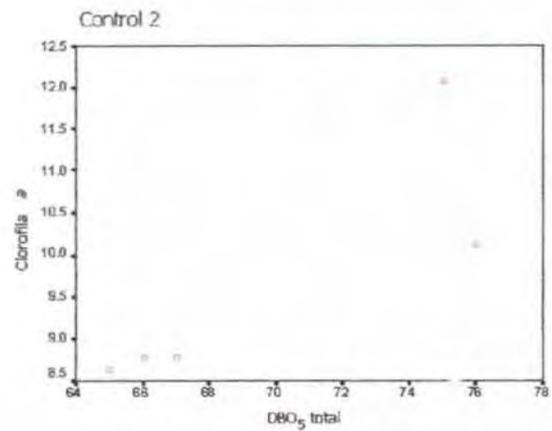
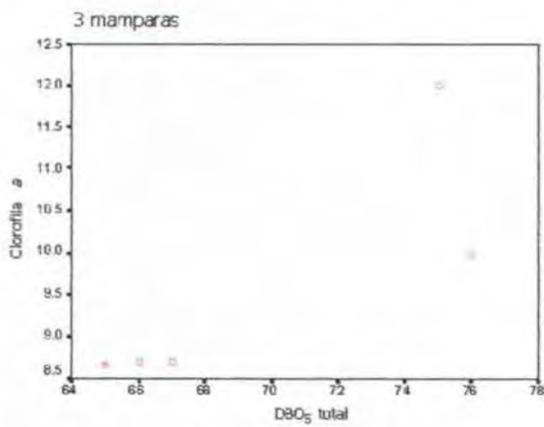
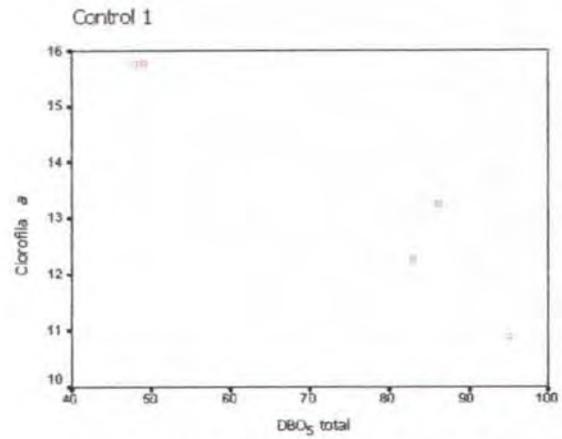
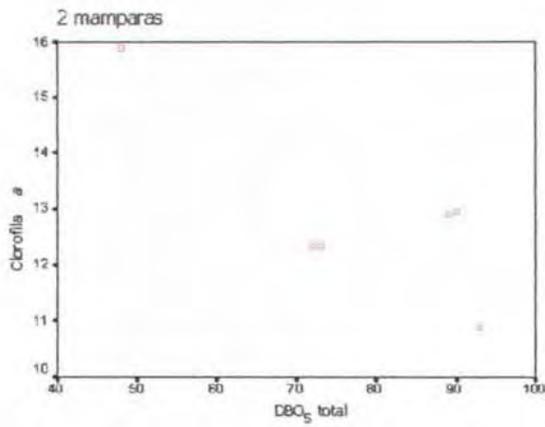
Diferencia	Coficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
	0.512	0.00	0.854	- 0.858 p = 0.01

**B.4.4 Control 2**

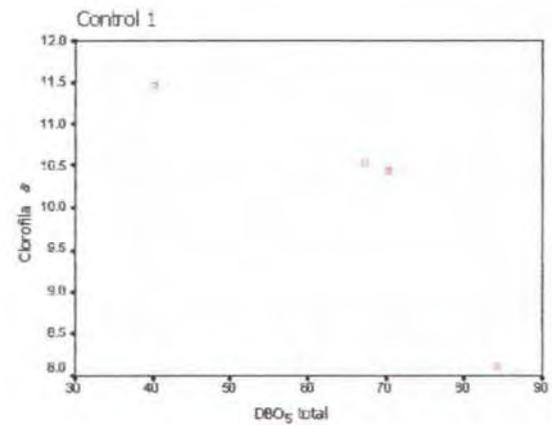
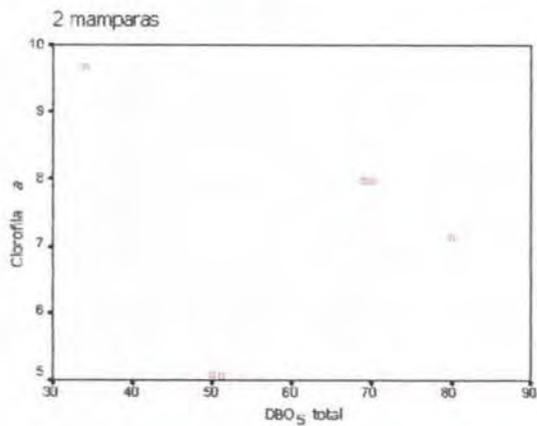
Diferencia	Coficiente	p - valor	R <sup>2</sup>	r (clorofila a)
	0.540	0.00	0.965	- 0.158 p = 0.354

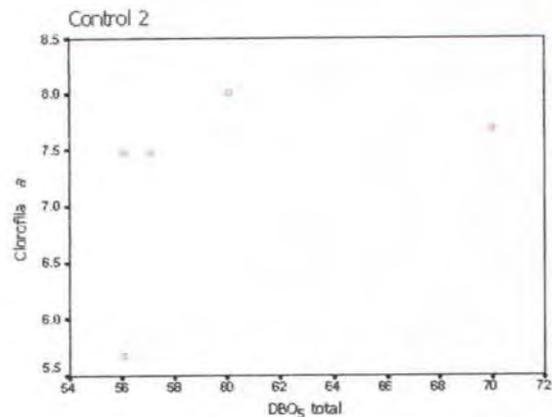
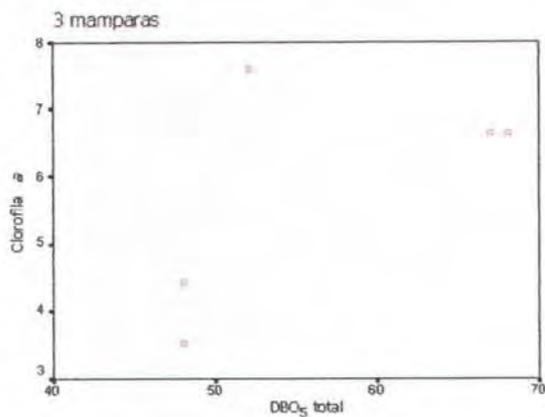
# ANEXO C

## C.1 Entradas

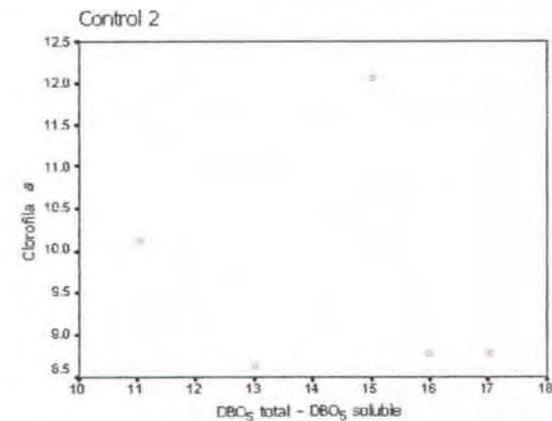
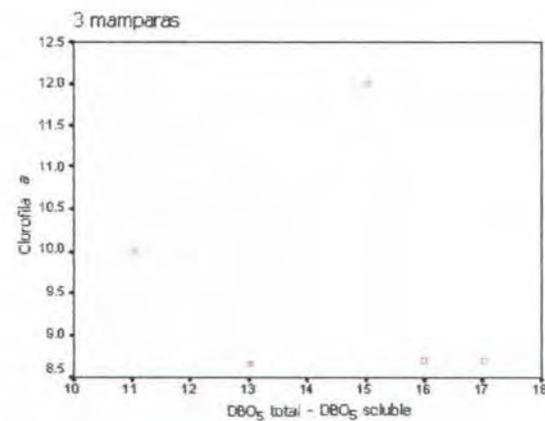
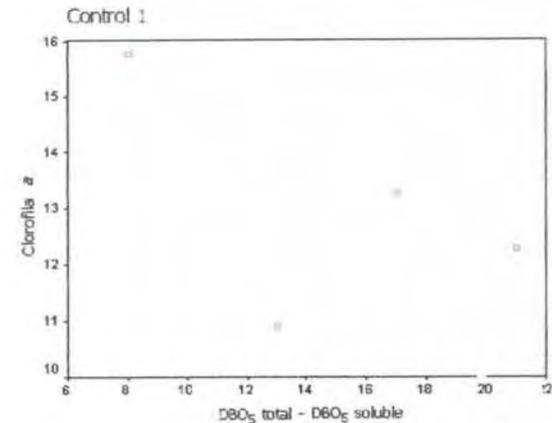
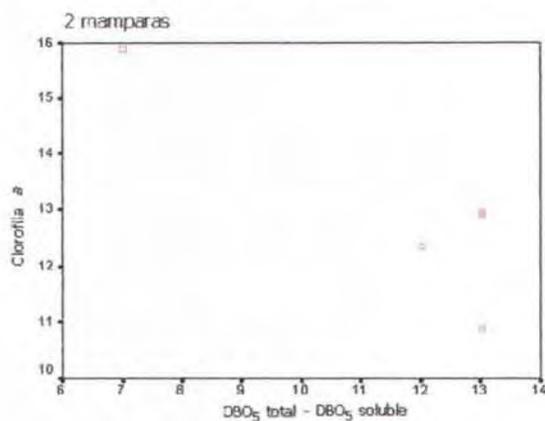


## C.2 Salidas

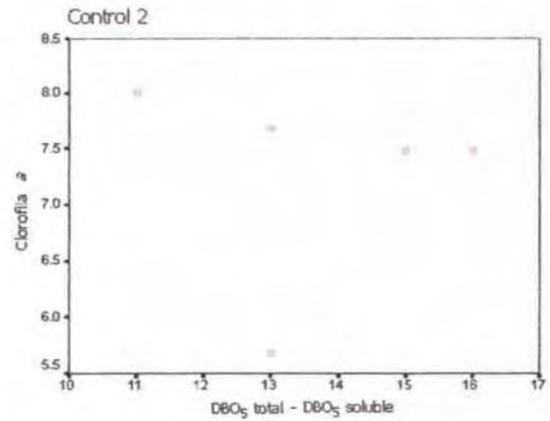
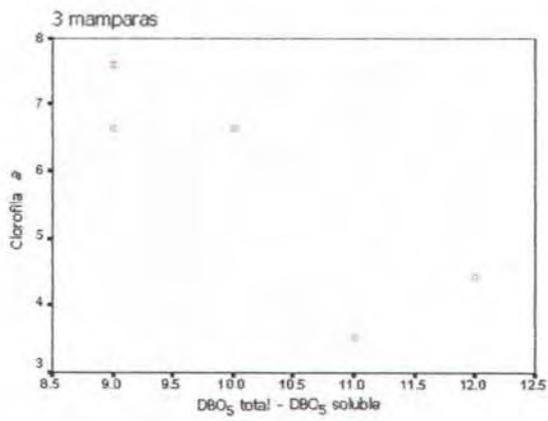
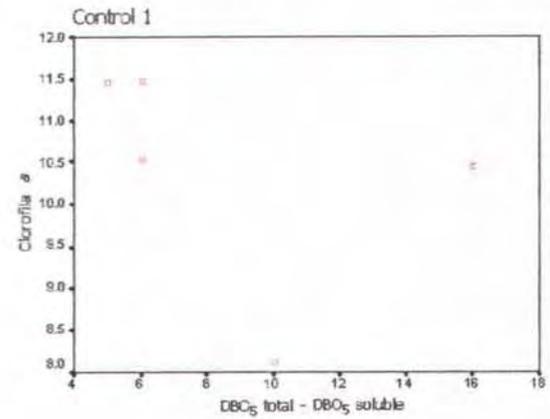
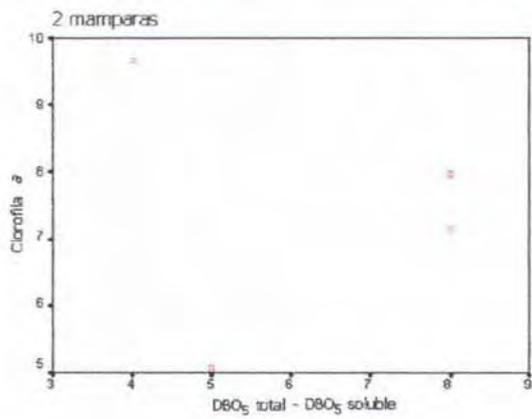




### C.3 Entradas para diferencias (DBO<sub>5</sub> total – DBO<sub>5</sub> soluble)



### C.4 Salidas para diferencias (DBO<sub>5</sub> total – DBO<sub>5</sub> soluble)

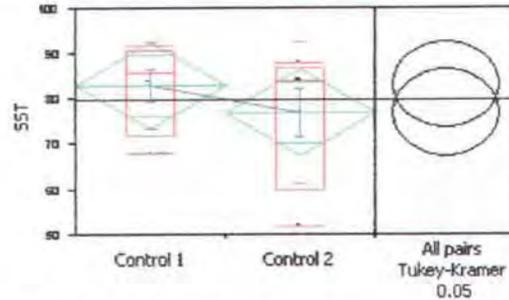


## ANEXO D

### D.1 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD PARA LOS CONTROLES 1 Y 2

Comparaciones entre todos los pares utilizando Tukey-Kramer $q^*$ 2.14478		
Abs(Dif)- LSD	0	1
0	- 13.8998	- 7.8998
1	- 7.8998	- 13.8998

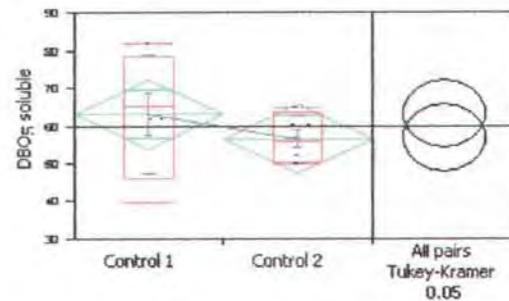
**Tabla D.1.1.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto al parámetro SST



**Figura D.1.1.** Muestra igualdad al 95% en la prueba de Tukey-Kramer entre el control 1 y las 2 mamparas para los SST

Comparaciones entre todos los pares utilizando Tukey-Kramer $q^*$ 2.14478		
Abs(Dif)- LSD	0	1
0	- 13.1383	- 6.5133
1	- 6.5133	- 13.1383

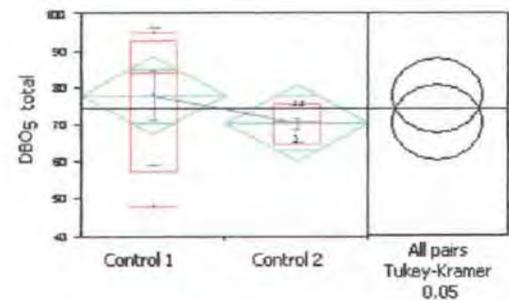
**Tabla D.1.2.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto al parámetro DBO<sub>5</sub> soluble



**Figura D.1.2.** Muestra igualdad al 95% en la prueba de Tukey-Kramer entre el control 1 y las 2 mamparas para la DBO<sub>5</sub> soluble

Comparaciones entre todos los pares utilizando Tukey-Kramer $q^*$ 2.14478		
Abs(Dif)- LSD	0	1
0	- 14.8671	- 7.3671
1	- 7.3671	- 14.8671

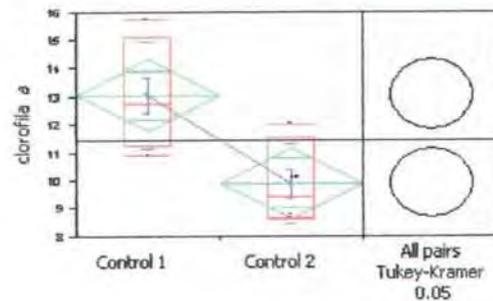
**Tabla D.1.3.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto a la DBO<sub>5</sub> total



**Figura D.1.3.** Muestra igualdad al 95% en la prueba de Tukey-Kramer entre el control 1 y las 2 mamparas para la DBO<sub>5</sub> total

Comparaciones entre todos los pares utilizando Tukey-Kramer $q^*$ 2.14478		
Abs(Dif)- LSD	0	1
0	- 1.82195	1.33180
1	1.33180	- 1.82195

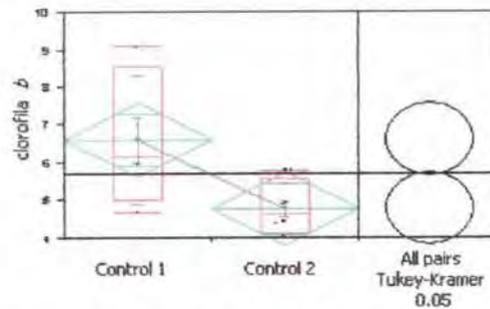
**Tabla D.1.4.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto al parámetro clorofila *a*



**Figura D.1.4.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Tukey-Kramer entre el control 1 y las 2 mamparas para la clorofila *a*

Comparaciones entre todos los pares utilizando Tukey-Kramer $q^*$ 2.14478		
Abs(Dif)- LSD	0	1
0	- 1.40980	0.43020
1	0.43020	- 1.40980

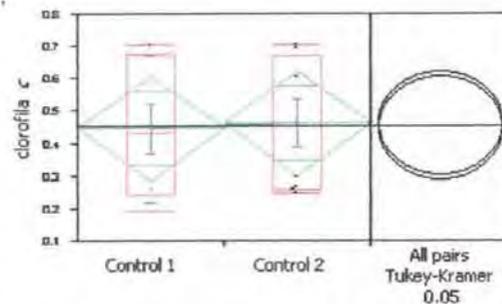
**Tabla D.1.5.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto el parámetro clorofila *b*



**Figura D.1.5.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Tukey-Kramer entre el control 1 y las 2 mamparas para la clorofila *b*

Comparaciones entre todos los pares utilizando Tukey-Kramer $q^*$ 2.14478		
Abs(Dif)- LSD	0	1
0	- 0.23391	- 0.21891
1	- 0.21891	- 0.23391

**Tabla D.1.6.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto a la clorofila *c*



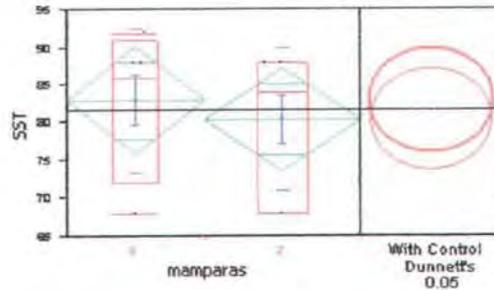
**Figura D.1.6.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Tukey-Kramer entre el control 1 y las 2 mamparas para la clorofila *c*

## D.2 PRUEBAS PARA LOS TRATAMIENTOS CONTROL 1 Y 2 MAMPARAS (Entradas)

Para comparar la media entre el control 1 y las 2 mamparas se realizó la prueba de Dunnett. Los resultados se pueden observar en las gráficas siguientes; mientras que las tablas muestran el estadístico de prueba. Los valores positivos representan los pares de medias que son significativamente diferentes al 5%.

Estadístico de prueba	
d	
2.13151	
Abs(Dif)-LSD	0
0	- 10.2306
2	- 7.3868

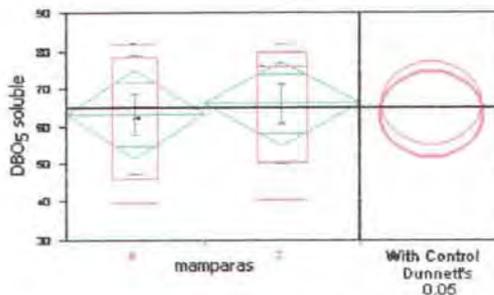
**Tabla D.2.1.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto al parámetro SST



**Figura D.2.1.** Muestra igualdad al 95% en la prueba de Dunnett entre el control 1 y las 2 mamparas para los SST

Estadístico de prueba	
d	
2.13151	
Abs(Dif)-LSD	0
2	- 13.9120
0	- 17.2451

**Tabla D.2.2.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto al parámetro DBO<sub>5</sub> soluble



**Figura D.2.2.** Muestra igualdad al 95% en la prueba de Dunnett entre el control 1 y las 2 mamparas para la DBO<sub>5</sub> soluble

Estadístico de prueba	
d	
2.13151	
Abs(Dif)-LSD	0
0	- 20.0272
2	- 19.0046

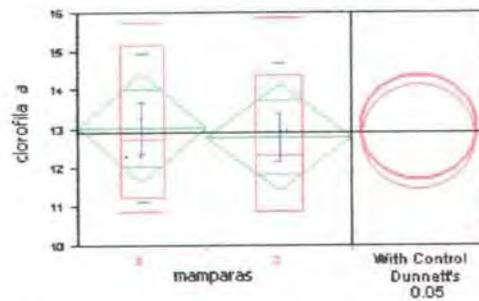
**Tabla D.2.3.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto a la DBO<sub>5</sub> total



**Figura D.2.3.** Muestra igualdad al 95% en la prueba de Dunnett entre el control 1 y las 2 mamparas para la DBO<sub>5</sub> total

Estadístico de prueba $ d $ 2.13151	
<b>Abs(Dif)-LSD</b>	<b>0</b>
0	- 2.0502
2	- 1.7248

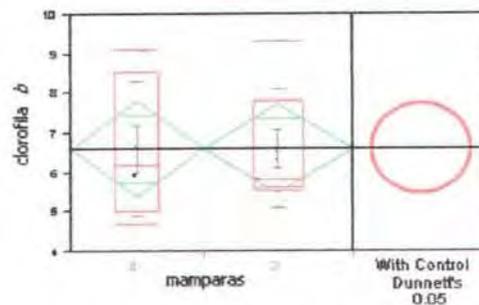
**Tabla D.2.4.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto al parámetro clorofila *a*



**Figura D.2.4.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnett entre el control 1 y las 2 mamparas para la clorofila *a*

Estadístico de prueba $ d $ 2.13151	
<b>Abs(Dif)-LSD</b>	<b>0</b>
2	- 1.66679
0	-1.71797

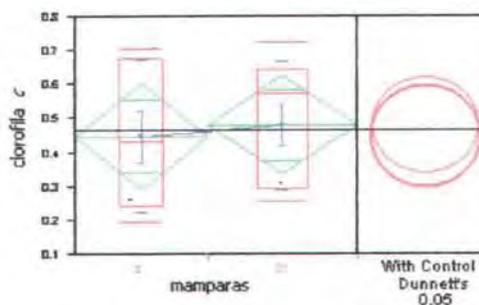
**Tabla D.2.5.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto el parámetro clorofila *b*



**Figura D.2.5.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnett entre el control 1 y las 2 mamparas para la clorofila *b*

Estadístico de prueba $ d $ 2.13151	
<b>Abs(Dif)-LSD</b>	<b>0</b>
2	- 0.17866
0	- 0.22057

**Tabla D.2.6.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 1 y las 2 mamparas en cuanto a la clorofila *c*



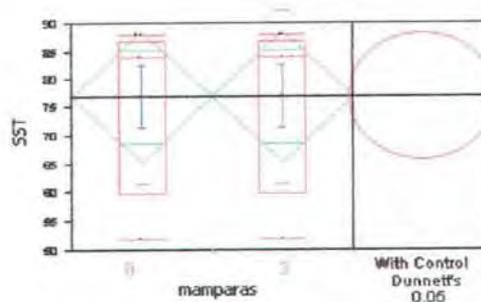
**Figura D.2.6.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnett entre el control 1 y las 2 mamparas para la clorofila *c*

### D.3 PRUEBAS PARA LOS TRATAMIENTOS CONTROL 2 Y 3 MAMPARAS (Entradas)

Al igual que en el caso anterior se realizó la prueba de Dunnett, comparando la media entre el control 2 y las 3 mamparas. Los resultados se muestran en las gráficas y el estadístico de prueba en las tablas siguientes.

Estadístico de prueba	
d	
2.14484	
Abs(Dif)-LSD	0
1	- 16.6534
3	- 16.6534

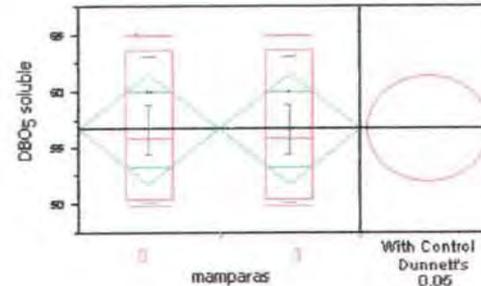
**Tabla D.3.1.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 2 y las 3 mamparas para el parámetro SST



**Figura D.3.1.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnett entre el control 2 y las 3 mamparas para los SST

Estadístico de prueba	
d	
2.14484	
Abs(Dif)-LSD	0
1	- 6.94416
3	- 6.94416

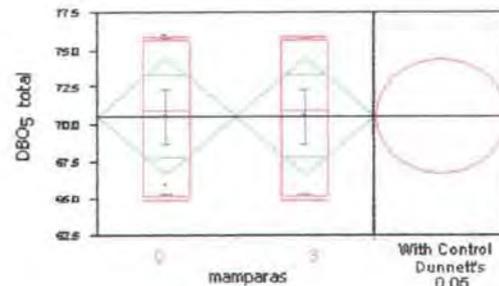
**Tabla D.3.2.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 2 y las 3 mamparas para el parámetro de la DBO<sub>5</sub> soluble



**Figura D.3.2.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnett entre el control 2 y las 3 mamparas para la DBO<sub>5</sub> soluble

Estadístico de prueba	
d	
2.14484	
Abs(Dif)-LSD	0
1	- 5.64386
3	- 5.64386

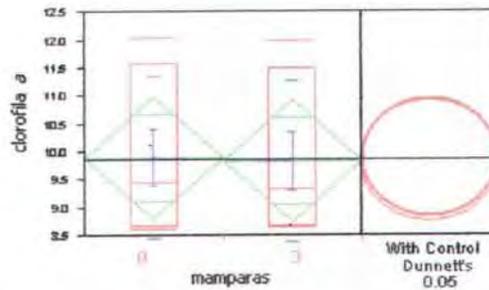
**Tabla D.3.3.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 2 y las 3 mamparas para el parámetro de la DBO<sub>5</sub> total



**Figura D.3.3.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnett entre el control 2 y las 3 mamparas para la DBO<sub>5</sub> total

Estadístico de prueba $ d $ 2.14484	
Abs(Dif)-LSD	0
1	- 1.56694
3	- 1.50444

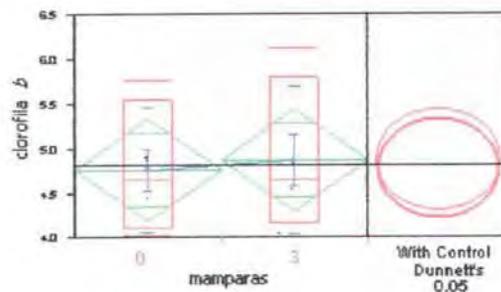
**Tabla D.3.4.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 2 y las 3 mamparas para el parámetro clorofila *a*



**Figura D.3.4.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnnett entre el control 2 y las 3 mamparas para la clorofila *a*

Estadístico de prueba $ d $ 2.14484	
Abs(Dif)-LSD	0
3	- 0.72262
1	- 0.82512

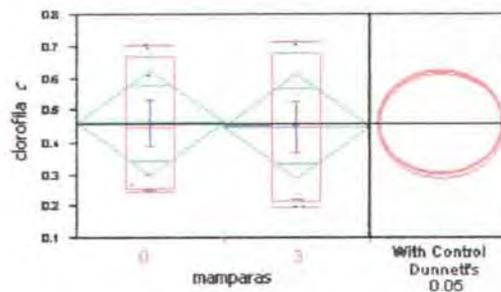
**Tabla D.3.5.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 2 y las 3 mamparas para el parámetro clorofila *b*



**Figura D.3.5.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnnett entre el control 2 y las 3 mamparas para la clorofila *b*

Estadístico de prueba $ d $ 2.14484	
Abs(Dif)-LSD	0
1	-0.23669
3	- 0.22544

**Tabla D.3.6.** Estadístico de prueba al 95% que indica igualdad entre el control 2 y las 3 mamparas para el parámetro clorofila *c*



**Figura D.3.6.** Muestra igualdad al 95% para la prueba de Dunnnett entre el control 2 y las 3 mamparas para la clorofila *c*

## CONCLUSIONES

### a) Control 1 vs control 2

En las gráficas de dispersión se puede observar que los rombos asociados a los controles 1 y 2 se encuentran a la misma altura, es decir, se interceptan, con lo cual se puede pensar que no existen diferencias entre las medias de ambos grupos.

En las tablas se muestra el estadístico de prueba  $q^*$  y las diferencias por pares (0,1), donde 0 indica el tratamiento control 1 y 1 indica el tratamiento control 2. Todas estas diferencias son negativas.

En este caso en particular se tiene que no existen diferencias significativas al 95% entre los tratamientos control 1 y control 2, para todas las variables observadas. Concluyendo que, en promedio, **no existen diferencias a la entrada para los grupos control 1 y 2.**

### b) Control 1 vs 2 mamparas

Se utilizó la prueba de Dunnett, ideal para probar diferencias entre un tratamiento control y cualquier otro tratamiento. Obtiene un estadístico de prueba  $|d|$ , así como diferencias entre las medias. Si la diferencia es positiva entonces se puede determinar que existen diferencias significativas entre el tratamiento control y el otro tratamiento. Además, se pueden observar estas diferencias mediante el gráfico de círculos. Si los círculos están separados se dice que existen diferencias.

Observando los gráficos se nota que los círculos están muy próximos, lo que significa que no existen diferencias significativas al 95% entre ambos tratamientos.

En las tablas se muestra el estadístico de prueba  $|d|$  y las diferencias por pares (0,1), donde 0 indica el tratamiento control y 1 indica el tratamiento entre las 2 mamparas. Todas estas diferencias son negativas, no existiendo diferencias significativas entre ambos tratamientos.

Para este caso en particular se tiene que no existen diferencias significativas al 95% entre el tratamiento control y el de 2 mamparas, para todas las variables observadas. Por lo que, en promedio, **las entradas son iguales.**

### c) Control 2 vs 3 mamparas

Respecto a las figuras se observa una proximidad considerable entre los círculos, significando que no existen diferencias significativas entre los tratamientos al 95%.

En las tablas se muestra el estadístico de prueba  $|d|$  y las diferencias por pares (0,1), indicando 0 el tratamiento control y 1 el tratamiento entre las 3 mamparas. Todas las diferencias son negativas, no existiendo diferencias significativas entre ambos tratamientos.

Para este caso se tiene que no existen diferencias significativas al 95% entre el tratamiento control 2 y el de 3 mamparas, para todas las variables analizadas. Por lo que, en promedio, **las entradas son iguales.**