

**Comisión Nacional del Agua**

**MANUAL DE AGUA POTABLE,  
ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO**

**DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN**

**Diciembre de 2007**

**[www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx)**

## ADVERTENCIA

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

Esta publicación forma parte de los productos generados por la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, cuyo cuidado editorial estuvo a cargo de la Gerencia de Cuencas Transfronterizas de la Comisión Nacional del Agua.

## **Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.**

Edición 2007

ISBN: 978-968-817-880-5

Autor: Comisión Nacional del Agua  
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo  
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.  
Tel. (55) 5174-4000  
[www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx)

Editor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines de la Montaña,  
C.P 14210, Tlalpan, México, D.F.

Impreso en México  
Distribución gratuita. Prohibida su venta.

# Comisión Nacional del Agua

**Ing. José Luis Luege Tamargo**

Director General

**Ing. Marco Antonio Velázquez Holguín**

Coordinador de Asesores de la Dirección General

**Ing. Raúl Alberto Navarro Garza**

Subdirector General de Administración

**Lic. Roberto Anaya Moreno**

Subdirector General de Administración del Agua

**Ing. José Ramón Ardavín Ituarte**

Subdirector General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

**Ing. Sergio Soto Priante**

Subdirector General de Infraestructura Hidroagrícola

**Lic. Jesús Becerra Pedrote**

Subdirector General Jurídico

**Ing. José Antonio Rodríguez Tirado**

Subdirector General de Programación

**Dr. Felipe Ignacio Arreguín Cortés**

Subdirector General Técnico

**Lic. René Francisco Bolio Halloran**

Coordinador General de Atención de Emergencias y Consejos de Cuenca

**M.C.C. Heidi Storsberg Montes**

Coordinadora General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua

**Lic. Mario Alberto Rodríguez Pérez**

Coordinador General de Revisión y Liquidación Fiscal

**Dr. Michel Rosengaus Moshinsky**

Coordinador General del Servicio Meteorológico Nacional

**C. Rafael Reyes Guerra**

Titular del Órgano Interno de Control

**Responsable de la publicación:**

**Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento**

**Coordinador a cargo del proyecto:**

**Ing. Eduardo Martínez Oliver**

Subgerente de Normalización

La Comisión Nacional del Agua contrató la Edición 2007 de los Manuales con el

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA según convenio  
CNA-IMTA-SGT-GINT-001-2007 (Proyecto HC0758.3) del 2 de julio de 2007  
Participaron:

**Dr. Velitchko G. Tzatchkov**

**M. I. Ignacio A. Caldiño Villagómez**

## CONTENIDO

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. DEFINICIÓN .....	2
1.2. CLASIFICACIÓN .....	2
1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....	4
1.4. LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN MÉXICO .....	5
<b>2. FUNDAMENTOS</b> .....	<b>6</b>
2.1. DEFINICIONES .....	6
2.2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL METABOLISMO DE LOS MICROORGANISMOS .....	6
2.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN .....	7
2.3.1. Lagunas de estabilización aerobias .....	7
2.3.2. Lagunas de estabilización anaerobias .....	10
2.3.3. Lagunas de estabilización facultativas .....	11
2.4. FACTORES QUE MODIFICAN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN .....	12
2.4.1. Calidad del agua a tratar .....	13
2.4.2. Aspectos físicos .....	13
2.4.3. Aspectos químicos .....	17
2.5. PATRONES DE FLUJO HIDRÁULICO .....	20
2.5.1. Flujo completamente mezclado .....	20
2.5.2. Flujo pistón .....	21
2.5.3. Desviaciones de la idealidad hidráulica .....	21
2.5.4. Estudios de trazado .....	22
2.5.5. Modelos de flujo aplicados a lagunas de estabilización .....	24
<b>3. DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN</b> .....	<b>27</b>
3.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO .....	27
3.2. LAGUNAS AEROBIAS .....	28
3.2.1. Lagunas aerobias con oxigenación natural .....	28
3.2.2. Lagunas aeradas en forma mecánica .....	29
3.2.3. Lagunas de pulimento .....	39
3.3. LAGUNAS ANAEROBIAS .....	44
3.3.1. Métodos de diseño .....	48
3.4. LAGUNAS FACULTATIVAS .....	52
3.4.1. Métodos de diseño .....	54
3.5. EFECTO DE LA TEMPERATURA-ECUACIÓN DE ARRHENIUS .....	65
3.6. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS .....	68
3.7. SISTEMAS COMBINADOS .....	70
3.8. SISTEMAS CON RECIRCULACIÓN .....	71
<b>4. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN</b> .....	<b>75</b>
4.1. TRATAMIENTO PRELIMINAR .....	75
4.1.1. Rejillas .....	75
4.1.2. Desarenadores .....	78
4.1.3. Medidores de flujo .....	81
4.2. FACTORES CONSTRUCTIVOS DE LAS LAGUNAS .....	83
4.2.1. Identificación del sitio .....	83

4.2.2. Impermeabilización .....	84
4.2.3. Forma y número de las lagunas .....	99
4.2.4. Diseño de bordos .....	100
4.3. OBRAS DE DETALLE .....	106
4.3.1. Estructura de entrada .....	106
4.3.2. Cárcamo de bombeo .....	107
4.3.3. Estructuras de salida .....	107
4.3.4. Obra de purga .....	107
4.3.5. Interconexiones .....	108
4.3.6. Mamparas .....	108
<b>5. EJEMPLO DE DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN .....</b>	<b>109</b>
5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	109
5.2. INFORMACIÓN REQUERIDA.....	109
5.2.1. Datos de diseño .....	109
5.2.2. Restricciones al diseño.....	113
5.3. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA .....	117
5.3.1. Dimensionamiento del sistema común de pretratamiento .....	118
5.3.2. Datos físicos para el diseño de lagunas .....	119
5.4. DIMENSIONAMIENTO DE LAS OPCIONES DE TRATAMIENTO EMPLEANDO EL MÉTODO DE YÁNEZ .....	120
5.4.1. Opción 1 con el método de Yánez .....	120
5.4.2. Opción 2 con el método de Yánez .....	125
5.4.3. Opción 3 con el método de Yánez .....	128
5.4.4. Conclusión del dimensionamiento con el método de Yánez para remoción de coliformes fecales.....	132
5.5. DIMENSIONAMIENTO DE LAS OPCIONES DE TRATAMIENTO EMPLEANDO EL METODO DE MARAIS.....	134
5.5.1. Opción 1 con el método de Marais .....	134
5.5.2. Opción 2 con el método de Marais .....	137
5.5.3. Opción 3 con el método de Marais .....	140
5.5.4. Conclusiones del dimensionamiento con el Método de Marais para la remoción de coliformes fecales.....	144
5.6. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODO DE YÁNEZ Y DE MARAIS PARA EL DISEÑO DE LAGUNAS .....	145
5.7. ELABORACIÓN DE PLANOS BASE .....	146
<b>6. OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....</b>	<b>147</b>
6.1. ARRANQUE DEL SISTEMA .....	147
6.1.1. Lagunas aeradas.....	147
6.1.2. Lagunas facultativas.....	148
6.1.3. Lagunas anaerobias.....	150
6.1.4. Lagunas de pulimento .....	150
6.2. INDICADORES DE OPERACIÓN .....	150
6.2.1. Cualitativos .....	150
6.2.2. Cuatitativo .....	155
6.3. OPERACIÓN.....	160
6.3.1. Frecuencia de monitoreo .....	160
6.3.2. Factores del proceso.....	161

6.4. MANTENIMIENTO .....	162
6.5. PROBLEMAS OPERATIVOS.....	166
<b>7. TRATAMIENTOS COMPLEMENTARIOS Y SISTEMAS CON LAGUNAS .....</b>	<b>179</b>
7.1. TRATAMIENTOS COMPLEMENTARIOS .....	179
7.1.1. Filtración.....	180
7.1.2. Acuicultura .....	181
7.1.3. Humedales .....	182
7.1.4. Tratamiento en suelo.....	182
7.2. SISTEMAS QUE EMPLEAN LAGUNAS .....	182
7.2.1. Proceso Sutton.....	183
7.2.2. Proceso New Hamburg .....	184
7.2.3. Plantas de tratamiento avanzado de lagunas combinadas con reactores biológicos .....	185
7.3. DESINFECCIÓN .....	187
<b>8. COSTOS .....</b>	<b>189</b>
8.1. COSTOS IMPLICITOS EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	189
8.1.1. Costos de inversión.....	189
8.1.2. Operación y Mantenimiento.....	192
8.2. CURVAS DE COSTOS PARA LAGUNAS EN MÉXICO.....	193
8.2.1. Curvas teóricas .....	193
8.2.2. Costos de lagunas construidas .....	200
<b>9. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>202</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>210</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>221</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>229</b>

## NOTACION

$\alpha$	coeficiente de transferencia de oxígeno en el agua tratada (0.65 - 0.95)
$\beta$	factor de corrección por salinidad y tensión superficial (0.9 - 1.0)
$\tau$	tiempo promedio de retención hidráulica, d
$\tau_c$	tiempo de retención hidráulica corregido.
$\theta_L$	período de desazolve, años
$\theta$	coeficiente de corrección por temperatura (1.085)
$f$	factor de proporcionalidad = 0.5'
$f'$	factor de demanda de sulfuro de oxígeno (1 cuando la concentración de iones equivalentes de sulfato en el influente es < 500 mg/l)
$\lambda$	energía solar, cal/cm'.d
$\sum S(j)$	suma de todos los mecanismos cinéticos que afectan a dicho componente.
$(Se)_{max}$	concentración máxima de la DBO, en el efluente, mg/l
$f_T$	factor de toxicidad de algas (1 para agua residual municipal e industrial)
$V_T$	viscosidad cinemática a la temperatura T tiempo promedio real de retención hidráulica, obtenido a partir de un estudio de trazado, d
$[C_i]$	concentración del componente i en el efluente, mg/l
$[C_i]_1$	concentración del componente i en el influente, mg/l
$a$	$(1 + 4kZd)^{1/2}$
$a'$	coeficiente del oxígeno consumido por unidad de DBO removida, kg O <sub>2</sub> /kg DBOrem
A	Área superficial, m <sup>2</sup>
AS	Área del canal, m <sup>2</sup>
AU	Área entre barras, m <sup>2</sup>
$b'$	coeficiente de respiración endógena de las bacterias, kg O <sub>2</sub> /kg SW.d
B	coeficiente del efecto de la capa superficial (0.0 a 0.3)
CF <sub>e</sub>	número de coliformes fecales en el efluente/100 ml
CF <sub>i</sub>	número de coliformes fecales en el influente/100 ml
$C_{osat}$	concentración del oxígeno saturado en agua pura a 20°C y 1 atm, mg/l
$C_L$	concentración del oxígeno disuelto en el agua durante la aeración, mg/l
$C_O$	carga orgánica
$C_S$	carga orgánica superficial
$C_V$	carga orgánica volumétrica
$C_W$	concentración del oxígeno saturado en el agua residual, mg/l
D	coeficiente de dispersión axial (m <sup>2</sup> /h),
e	espesor de la barra, m
E	constante que depende de la configuración de la laguna (1.264 a 4.044)
F	coeficiente para contabilizar la solubilización del sustrato
F'	coeficiente de sobre utilización del oxígeno
h	profundidad de la laguna, m
H <sub>a</sub>	tirante aguas arriba, mm
I	intensidad de la luz a la profundidad h
I <sub>o</sub>	intensidad de la luz en el agua superficial de la laguna
j	número de celdas en la serie

$k$	coeficiente de remoción de DBO a la temperatura del liquido.
$k_{an}$	constante de actividad anaerobia
$k_b$	coeficiente de decaimiento endógeno, d'
$k_c$	constante de reacción de primer orden para un reactor completamente mezclado, d'
$k_{CF}$	tasa de primer orden para la remoción de coliformes fecales, d'
$kD_{BO5}$	tasa de decaimiento en función de la Si
$k_l$	coeficiente de la extinción de la luz
$k_{obs}$	tasa de decaimiento en la obscuridad
$k_p$	rapidez de reacción de primer orden para un reactor de flujo pistón, d-1
$k_{pH}$	tasa de decaimiento en función del pH
$k_T$	tasa de decaimiento en función de la temperatura $k_{turb}$ , $k_h$ , $k_{CA}$ , coeficientes de la tasas de decaimiento en función de la turbiedad (Turb), profundidad (h) y concentración de algas (CA)
$L$	longitud de la laguna o celda, m
$L_{ux}$	radiación solar, langleys
$m$	exponente determinado por experimentación
$N$	rendimiento del equipo de aeración
$N_o$	rendimiento del equipo de aeración a condiciones estándar (20°C y 760 mmHg)
$O_i$	cantidad de oxígeno liberada, kg/ha.d
$O_r$	cantidad de oxígeno requerida, kg/d
$p$	fracción de horas de irradiación comparada con el número total de horas posibles.
$P$	población, habitantes
$q$	exponente = 0.489
$Q$	gasto de agua, m <sup>3</sup> /d
$R_{HH}$	remoción de huevos de helmintos, %
$R_T$	remoción orgánica
$s$	factor de inclinación
$S_e$	concentración de la DBO del efluente, mg/l
$S_j$	concentración de la DBO en el efluente por celda, mg/l
$S_r$	concentración de DBO removida
$S_u$	DBO o DQO filtrada del influente, mg/l
$T$	temperatura del agua, °C
$T_a$	temperatura del aire, °C
$T_{ac}$	tasa de acumulación de lodos, m <sup>3</sup> /hab.año
$T_i$	temperatura del agua residual influente, °C
$U$	velocidad del fluido (m/h),
$V$	volumen total del líquido contenido dentro de la laguna, m <sup>3</sup>
$V_E$	volumen efectivo de la laguna, m <sup>3</sup>
$W$	ancho de la laguna o celda, m
$W_P$	ancho de la garganta, m
$X_i$	sólidos suspendidos volátiles en el influente no degradados en la laguna, mg/l
$X_v$	sólidos suspendidos volátiles totales, kg SSV/m <sup>3</sup>
$Y$	coeficiente de producción de biomasa, mg SSV/mg DBO

## PRESENTACIÓN

Uno de los factores indispensables para tener una adecuada protección de las fuentes de abastecimiento es contar con tecnologías que provean un tratamiento efectivo y adecuado del agua residual. Para generalizar esta práctica es necesario contar con los recursos económicos y humanos necesarios lo que, para la realidad de nuestro país, se traduce en implantar sistemas baratos y poco mecanizados. En este contexto, las lagunas de estabilización, por su bajo costo y escasa necesidad de mantenimiento, son una opción muy popular de tratamiento. Debido a ello gran número de investigadores e ingenieros se han abocado a su estudio con diversas finalidades.

**Obtener criterios de diseño.** En este contexto se han desarrollado modelos basados en el tiempo de retención hidráulica y la carga orgánica (empíricos) en la cinética (reactores bioquímicos) y en la comprensión de los fenómenos que ocurren y su interrelación (modelos teóricos).

**Comprender la Biología y el Funcionamiento.** De donde, a partir de los fundamentos físicos del proceso de lagunas, se definen condiciones para maximizar la eficiencia.

Estos enfoques han resultado en un gran número de ecuaciones y de teorías, que han contribuido a confundir a los diseñadores. Este manual presenta las principales ecuaciones de diseño (32 en total) y se concluye que desde un punto de vista práctico, son los modelos basados en el tiempo de retención hidráulica o los de carga orgánica aplicada los que más se usan en la práctica para el diseño. Los otros dos grupos (Modelos de reactores bioquímicos y los teóricos) requieren en general, una gran cantidad de parámetros que dada la magnitud de las lagunas y la complejidad de las reacciones que intervienen no es posible para determinarlos a priori todos en el laboratorio. No obstante, en este texto se reconoce la importancia de conocer y comprender los fenómenos que intervienen para que los ingenieros se apoyen en las recomendaciones prácticas de diseño y operación que de ello se interfieren.

El manual está dirigido a ingenieros con conocimiento de sanitaria y ambiental y busca en forma práctica ilustrar la metodología de cálculo de las diversas lagunas de estabilización, que son un método de tratamiento aplicable tanto en agua residual doméstica como industrial, siempre y cuando sea biodegradable. En especial, las lagunas son útiles en comunidades rurales con disponibilidad de terreno con bajo costo de construcción.

Cabe mencionar que, este manual forma parte de una serie de 5 libros editados por la Comisión Nacional del Agua sobre Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, que son:

## **LIBRO I PLANEACIÓN**

## **LIBRO II PROYECTO**

Sección 1	Agua potable
Sección 2	Alcantarillado
Sección 3	Potabilización y, tratamiento

## **LIBRO III OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**

## **LIBRO IV ADMINISTRACIÓN**

## **LIBRO V INGENIERIA BASICA**

Sección 1	Estudios básicos
Sección 2	Estructuras
Sección 3	Geotecnia
Sección 4	Electromecánica

## 1.INTRODUCCIÓN

Uno de los factores indispensables para tener una adecuada protección de las fuentes de suministro de agua es contar con tecnologías que provean un tratamiento efectivo y adecuado al agua residual. Para generalizar esta practica es necesario contar con los recursos económicos y humanos necesarios que, para la realidad de nuestro país, se traduce en implantar sistemas eficientes, poco mecanizados y de bajo costo de inversión y operación.

En este contexto, las pequeñas comunidades e industrias aisladas que generan residuos líquidos biodegradables pueden considerar a las lagunas de estabilización como una opinión de tratamiento. De igual forma, ciudades importantes localizadas en climas calidos con disponibilidad de terreno barato y con las características compatibles para este tipo de sistemas pueden encontrar en ellas una opción viable. Sin embargo, el uso de otros métodos de tratamiento de aguas residuales resulta mejor y más económico cuando las comunidades o industrias de cualquier tamaño se encuentran ubicadas en zonas donde el terreno es escaso, de costo elevado, con poca estabilidad y resistencia, de alta permeabilidad o con costos elevados de excavación.

Las lagunas se han empleado para tratar aguas residuales desde hace 3,000 años. El primer tanque de estabilización artificial que se construyó fue en Sail Antonio, Texas, en 1901. Para 1975 se encontraban operando 7,000 lagunas en los Estados Unidos y 868 en Canadá durante 1981 (Thirumurti, 1991). En México, actualmente se tienen instaladas 357 plantas de este tipo.

En general, las lagunas son depósitos construidos mediante la excavación y compactación de la tierra que almacenan agua de cualquier calidad por un periodo determinado. Las lagunas constituyen un tratamiento alterno interesante ya que permiten un manejo sencillo del agua residual, la recirculación de nutrientes y la producción primaria de alimento en la cadena alimenticia (Oswald, 1995). Su popularidad se debe a su simplicidad de operación, bajo costo y eficiencia energética.

Sin embargo, y como lo señaló Arceivala et al., 1970 (en Thirumurthi, 1991), "a pesar de su aparente simplicidad, las lagunas de estabilización son reactores bioquímicos complejos que requieren un adecuado diseño " y más que el tipo de modelo matemático que se emplee para su diseño, es necesario tomar en cuenta las condiciones ambientales que determinan su forma de operación.

En este capitulo se establecen las definiciones y conceptos básicos que se utilizaran en el resto del manual. Al final, se hace mención de la situación que actualmente ocupan las lagunas de estabilización como sistema de tratamiento de aguas residuales en México.

## 1.1.DEFINICIÓN

Una laguna de estabilización es, básicamente, una excavación en el suelo donde el agua residual se almacena para su tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos.

Cuando el agua residual es descargada en una laguna de estabilización se realiza en forma espontánea un proceso de autopurificación o estabilización natural, en el que tienen lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico. En esta simple descripción se establecen los aspectos fundamentales del proceso de tratamiento del agua que se lleva a cabo en las lagunas de estabilización:

- Es un proceso natural de autodepuración
- La estabilización de materia orgánica se realiza mediante la acción simbiótica de bacterias, algas, y otros organismos superiores.
- Se presentan, procesos físicos de remoción de materia suspendida.
- Se efectúan cambios químicos en la calidad del agua que, entre otros aspectos, mantienen las condiciones adecuadas para que los organismos puedan realizar la estabilización, transformación, y remoción de contaminantes orgánicos biodegradables y, en algunos casos, nutrientes.
- Se establecen cadenas tróficas y redes de competencia que permiten la eliminación de gran cantidad de microorganismos patógenos que se encuentran presentes en las aguas, residuales. Por lo tanto, las lagunas de estabilización se consideran y se pueden proyectarse como un método de tratamiento de la materia orgánica y de remoción de los patógenos presentes en el agua residual.

Dependiendo, de las condiciones del problema por resolver las lagunas de estabilización pueden utilizarse solas, combinadas con otros procesos de tratamiento biológico, o bien, entre ellas mismas (sistemas lagunares de tratamiento). Racault, et al, (1993) indican que el 60% de los sistemas que utilizan este método están compuestas por tres lagunas operando en serie y el 35%, de dos. Es frecuente el uso de lagunas para complementar ("pulir") el tratamiento biológico de sistemas de lodos activados y filtros percoladores, por ejemplo.

## 1.2.CLASIFICACIÓN

Los términos "laguna" y "estanque" son generalmente empleados indistintamente. Por laguna debe entenderse un depósito natural de agua. En cambio, un tanque construido para remansar o recoger el agua debe ser considerado como: un estanque. Cuando se habla de lagunas o estanques para tratar el agua residual se les agrega el término de estabilización.

Con el fin de evitar confusiones, en este manual se entenderá por lagunas de estabilización las construidas mediante excavación y compactación del terreno para el tratamiento de las aguas residuales. Asimismo, los estanques de estabilización

serán aquellos en los que la laguna construida se recubra con concreto o algún, otro material impermeable. Cabe indicar que con el objeto de hacer más ágil la lectura se empleara en forma genérica los términos de "lagunas" y "estanques" cuando se haga referencia a los sistemas de tratamiento de agua residual.

Las lagunas y estanques de estabilización pueden clasificarse de diversas formas, ya sea por:

- El tipo de la reacción biológica predominante,
- La duración y frecuencia de la descarga,
- La extensión de la laguna,
- La presencia o ausencia de equipo de aeración, y
- El tipo de células presentes.

La forma más adecuada de clasificar a las lagunas es en función de la reacción biológica dominante. La estabilización de la materia orgánica se realiza ya sea mediante microorganismos que la metabolizan en presencia de oxígeno (aerobios), o bien, por microorganismos fermentativos que lo hacen en ausencia de oxígeno (anaerobios). En este sentido se distinguen los siguientes tres tipos de lagunas:

1. Aerobias. Donde la estabilización de la materia orgánica soluble y la conversión de los nutrientes se realiza en presencia de oxígeno disuelto, el cual se suministra en forma natural o artificial.
2. Anaerobias. La depuración se realiza en ausencia de oxígeno libre (condiciones anóxicas) y/o combinado (anaerobia).
3. Facultativas. La estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo tanto en condiciones aerobias como anaerobias. Las primeras se mantienen en el estrato superior de la laguna, mientras que en el inferior, se realiza la degradación anaerobia en ausencia de oxígeno. En algunos casos pueden haber aeración artificial en parte de ellas.

En general, cualquier tipo de laguna se puede utilizar para tratar aguas residuales domésticas. Las lagunas aeradas se utilizan normalmente para tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas de alta carga, mientras que las no aeradas se emplean casi en su totalidad para tratar residuos municipales. Las anaerobias se utilizan para tratamiento de residuos líquidos de origen industrial con elevado contenido de materia orgánica, casi siempre se emplean como el primer paso de un sistema lagunar con alta carga.

El término lagunas de maduración o de pulimento se aplica a aquellas lagunas aerobias ubicadas como el último paso de los sistemas lagunares en serie o a las unidades que mejoran el efluente de otros sistemas de tratamiento biológico. Este tipo de laguna se diseña primordialmente para remover microorganismos patógenos sin necesidad de adicionar agentes químicos desinfectantes. También, se utilizan para nitrificar efluentes.

### 1.3.VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las ventajas asociadas con el uso de las lagunas de estabilización como sistema de tratamiento son las siguientes (Shelef y Kanarek, 1995):

Algunos autores utilizan el término de lagunas de oxidación para indicar lagunas del tipo facultativo, para evitar confusiones esto no se haré en el presente manual.

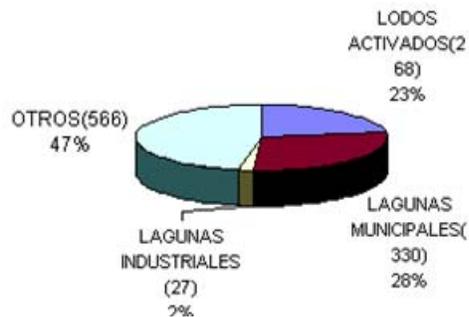
- ☺ Bajo consumo de energía y costo de operación.
- ☺ Bajo capital de inversión, especialmente en los costos de construcción.
- ☺ Esquemas sencillos de flujo.
- ☺ Equipo y accesorios simples y de uso común (número mínimo de tuberías, bombas y aeradores).
- ☺ Operación y mantenimiento, simple. No requieren equipos de alta tecnología y, por tanto, no es necesario personal calificado para estas labores.
- ☺ Remoción eficiente de bacterias patógenas, protozoarios y huevos de helmintos.
- ☺ Amortiguamiento de picos hidráulicos, de cargas orgánicas y de compuestos tóxicos.
- ☺ Disposición del efluente por evaporación, infiltración en suelo o riego.
- ☺ En algunos casos, remoción de nutrientes.
- ☺ Posibilidad de establecer un sistema de cultivo de algas proteicas para la producción de animales (empleando lagunas de alta tasa). ,
- ☺ Empleo como tanque de regulación de agua de lluvia o de almacenamiento del efluente para reúso.

Las principales desventajas son:

- ☹ Altos requerimientos de Área.
- ☹ Efluente con elevado contenido de algas que al ser descargado en los cuerpos de agua es objetado, generando grandes controversias por su calidad proteica y su potencial de taponamiento del suelo, si se usa en riego.
- ☹ Su funcionamiento depende de las condiciones ambientales tales como la temperatura, la irradiación solar, la velocidad del viento, etc., que son propiedades aleatorias.
- ☹ Generación de, olores desagradables y deterioro de la calidad del efluente por sobrecargas de contaminantes, bajo ciertas condiciones climáticas
- ☹ Contaminación de acuíferos por infiltración, particularmente en lagunas construidas sobre suelos arenosos.
- ☹ Pérdidas de agua debido a la evaporación e infiltración, que en zonas de escasez pueden ser importantes.

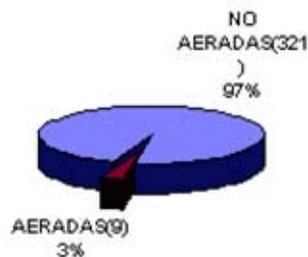
#### 1.4.LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN MÉXICO

De acuerdo con los datos del inventario nacional de plantas, de tratamiento municipales (CNA, 1995) existe un total de 1,191 plantas, de las cuales 357 (28 %) son lagunas (330 municipales y 27 industriales). Así, éste es el proceso de tratamiento más utilizado en el país, seguido del de lodos activados, donde se tienen registradas 268 plantas (23 %) Figura 1.1



**Figura 1.1 Inventario nacional de plantas de tratamiento municipal**

Es interesante notar que de las 330 lagunas de tratamiento, de aguas residuales domésticas solamente 9 son del tipo aeradas (Figura 1.2). En cuanto al gasto tratado con lagunas, éste es 13.06 m/s (diseño) aunque, por diversas razones, sólo es tratado el 69% (8.97 m/s) de la capacidad instalada.



**Figura 1.2 Tipo de lagunas de estabilización en México**

En los estados de Durango, Baja California Sur, Sinaloa, Sonora, Aguascalientes, Colima, México y Tlaxcala se encuentran localizadas la mayor cantidad de lagunas, aunque en los estados de Coahuila, Durango, Baja California, Tabasco, Tamaulipas, Guanajuato, Jalisco, se encuentran las lagunas de mayor capacidad de tratamiento. La laguna de mayor caudal, trabajando con 80% de eficiencia en la República Mexicana, es la laguna facultativa localizada en Mexicali, Baja California con un caudal de 1,100 Us. El efluente de este sistema se utiliza para el riego de 96 hectáreas dedicadas a la agricultura.

En el ANEXO 1 se presenta con mayor detalle la información relativa a las lagunas instaladas, en construcción y en proyecto, que se tienen en México. El objeto de ello es promover la visita a alguna de estas plantas antes de realizar un diseño.

## 2.FUNDAMENTOS

En este capítulo se describirá brevemente el proceso de tratamiento biológico que se efectúa en las lagunas y se mencionarán los aspectos ambientales e hidráulicos que determinan su operación y eficiencia.

### 2.1.DEFINICIONES

Con el objeto de entender los conceptos básicos relacionados con el tratamiento biológico, es conveniente definir los siguientes términos:

**Desnitrificación.**- Es el proceso biológico en que el nitrato y el nitrito se convierten a nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) que, es liberado, del medio acuático.

**Nitrificación.**- Es el proceso biológico en el que el nitrógeno amoniacal es convertido primero en nitrito y luego a nitrato, compuestos que intervienen en la eutrofización acelerada.

**Remoción biológica de nutrientes.** - Es el término aplicado para describir que las concentraciones totales de nitrógeno y fósforo son disminuidas del agua mediante procesos biológicos.

**Remoción de la demanda Bioquímica de Oxígeno carbonada (DBO).**- Es la conversión biológica de la materia orgánica carbonada del agua residual en tejido celular y varios productos finales en estado gaseoso. En esta conversión se considera que el nitrógeno presente (nitrógeno amoniacal) no es oxidado.

**Sustrato.**- Es el término que se aplica a la materia orgánica o los nutrientes que constituyen la principal fuente de alimento durante los procesos biológicos. Por este motivo son el factor limitante principal de la cinética de tratamiento.

### 2.2.CONCEPTOS BÁSICOS DEL METABOLISMO DE LOS MICROORGANISMOS

El objetivo del tratamiento biológico de las aguas residuales es estabilizar la materia orgánica principalmente soluble y coloidal. En algunos casos se aplica también a la remoción de nutrientes. Los procesos biológicos se realizan principalmente por bacterias que utilizan las aguas residuales para convertir la materia orgánica coloidal o disuelta contenida en ellas en energía, nuevas Mulas y productos de desecho que pueden incluir gases y lodos.

Es importante notar que a menos que el tejido celular producido sea separado del agua, no se alcanzará el tratamiento completo ya que éste es también materia orgánica y es medido como DB. Así, si los lodos: no son removidos, el único tratamiento que se habrá logrado es el asociado con la conversión bacteriana de la materia orgánica en energía y subproductos gaseosos.

Los microorganismos para reproducirse y funcionar adecuadamente requieren fuentes de energía, de carbono, y de elementos orgánicos (nutrientes). El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y la materia orgánica son la fuente de carbono rads con fin para formar nuevas células. Los organismos que utilizan la materia orgánica para generar materia celular se denominan heterótrofos, mientras que los que utilizan el CO<sub>2</sub> se llaman autótrofos. La energía necesaria para la síntesis celular de los organismos auffitrofos y heterótrofos puede obtenerse de la luz o de reacciones de oxidación química. Aquellos organismos que, son capaces de utilizar la luz como fuente de energía se denominan fototróficos. En contraste, los que requieren energía producida por las reacciones químicas se llaman quimiotróficos.

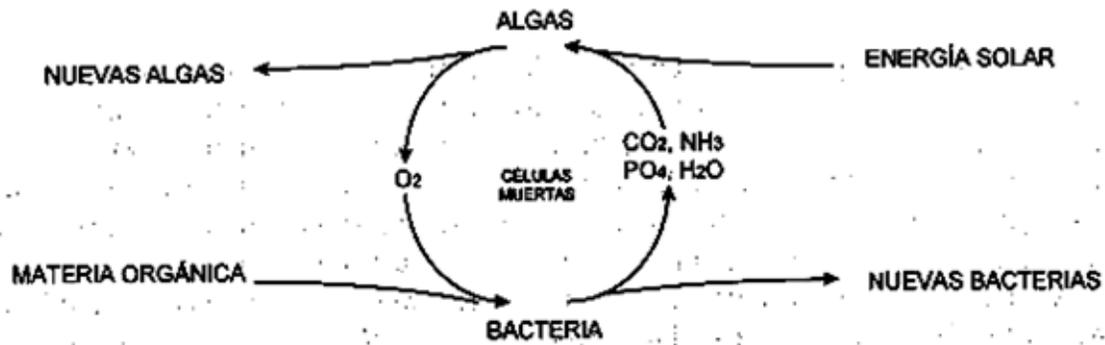
### 2.3.DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Con las definiciones y conceptos básicos del metabolismo de los microorganismos presentados en las dos secciones anteriores es posible describir el funcionamiento de cada tipo de laguna, retomando la clasificación con base en el mecanismo respiratorio que predomina: aerobio, anaerobio y facultativo.

#### 2.3.1.Lagunas de estabilización aerobias

Son grandes depósitos de poca profundidad donde los microorganismos se encuentran en suspensión y prevalecen condiciones aerobias. El oxigenó es suministrado en forma natural por la aeración de la superficie artificial o por la fotosíntesis de las algas. La población biológica comprende bacterias y algas principalmente protozoarios y rotíferos, en menor medida. Las bacterias que realizan la conversión de, la materia orgánica en las lagunas pertenecen a los géneros Pseudomonas, Zoogloea, Achromobacter, Flavobacteria, Nocardia, Mycobacteria, Nitrosomonas y Nitrobacter. Lm algas constituyen la mejor fuente de oxigeno, para mantener las condiciones aerobias y los protozoarios y rotíferos ayudan a mejorar la calidad del efluente al alimentarse de las bacterias.

El oxigeno liberado por las algas es utilizado por las bacterias en la degradación de la materia orgánica. El dióxido de carbono y los nutrientes liberados por las bacterias es a su vez, utilizado por las algas para la fotosíntesis (Figura 2.1). Esta relación simbiótica constituye el componente, fundamental del proceso. El ANEXO 2 describe esto con mayor detalle.



**Figura 2.1 Representación esquemática de la relación simbiótica entre algas y bacterias.**

Las lagunas aerobias se dividen en dos grupos lagunas de baja tasa y de alta tasa.

### 2.3.1.1 Lagunas aerobias de baja tasa

Las lagunas aerobias de baja tasa se diseñan para mantener las condiciones aerobias en toda la profundidad de la laguna maximizando la cantidad de oxígeno producido por un incremento masivo de algas. En general, se emplean para tratar residuos orgánicos solubles y efluentes secundarios.

Estos sistemas requieren grandes Áreas por unidad de DBO estabilizada (4 ha por laguna) comparadas con los sistemas facultativos o anaerobios (Ouan, 1981) y no son recomendadas en climas fríos donde haya problemas de congelamiento. Por sus requerimientos de espacio y lo impráctico de mantener el oxígeno disuelto en todos los puntos durante todo el año, su empleo es poco común (Thirlumurthi, 1991).

La eficiencia de conversión de materia orgánica en las lagunas aerobias es alta (80 al 95% DBO<sub>5</sub>), sin embargo debe recordarse que aunque la DBO soluble haya sido removida del agua residual el efluente tendrá una cantidad importante de algas y bacterias que pueden ejercer una demanda bioquímica de oxígeno, igual o mayor a la del agua residual sin tratar. Este aspecto se controla mediante la remoción de algas (cosecha) o la filtración del efluente.

### 2.3.1.2 Lagunas de alta tasa

Las lagunas aerobias de alta tasa (HRAP, high rate algal ponds), se diseñan para optimizar la producción de algas y alcanzar altas producciones de material proteico. Su aplicación se centra en la remoción de nutrientes y el tratamiento de material soluble. Este tipo de lagunas requieren un mezclado continuo para favorecer la acción fotosintética de las algas, un mayor nivel de mantenimiento y personal altamente capacitado. La profundidad varía entre 30 y 45 cm y por lo común sólo se operan en serie.

La laguna de alta tasa tiene más ventajas con respecto a una facultativa ya que emplea tiempos cortos de retención y generan un efluente con elevado contenido de oxígeno disuelto. Un diseño con mezclado adecuado puede generar diariamente de 11.3 a 338 kg de algas/ha (34 a 90 kg de biomasa, como ceniza en peso seco). Las algas en el efluente de esta laguna sedimentan fácilmente. Se estima que del 70 al 80% de las algas pueden removerse, en una, o dos días, por clarificación. Las algas provenientes de este sistema tienen una baja tasa de respiración y pueden permanecer en los lodos por meses o años, sin liberar cantidades significativas de nutrientes. Por otro lado, las algas pueden también considerarse como agentes para remover nutrientes (consumen nitrógeno, fósforo y potasio); como sustrato para la producción de biogás; como, un medio selectivo para la remoción de metales pesados (como el: oro, la plata y el cromo); o como alimento para peces e invertebrados acuáticos. Cabe mencionar que 1 kg de algas fermentadas puede, producir, metano suficiente para generar un kW-h de electricidad que comparado con los requerimientos energéticos para producir 1 kg de algas (0.1 kW-h) resulta interesante. Durante su crecimiento, este, kilogramo, de algas puede producir cerca de 1.5 kg de O<sub>2</sub> por tanto, se puede decir, que la eficiencia de oxigenación de la laguna es del orden de 15 kg O<sub>2</sub>/kWA. Considerando que la aeración mecánica transfiere cerca de 1 kg O<sub>2</sub> / kW-h, las algas generan 15 veces más rápido oxígeno, sin costo alguno. Debido, a que generalmente se produce un excedente, de oxígeno disuelto, algunos efluentes, son usados como recirculación a lagunas primarias para absorber olores, reducir el área de fermentación y asegurar la presencia de algas productoras de oxígeno en la capa superficial de la laguna primaria.

Otro de los beneficios de las algas en las lagunas de alta tasa es su, tendencia a aumentar el pH del agua. Un pH de 9.2 por 24 horas puede eliminar el 100% de la E coli y gran cantidad de bacterias patógenas. No es muy común que este tipo de laguna alcance un pH de 9.5 a 10 durante el día, pero si tienen una alta tasa de desinfección.

Si el agua tratada se va a utilizar para riego, no es necesario remover las algas pero el tanque de sedimentación o almacenamiento debe ser capaz de alcanzar un valor de coliformes fecales a 10<sup>3</sup> de NMP, que es suficiente para cumplir con la normatividad mexicana.

### 2.3.1.3 Lagunas de estabilización aeradas en forma artificial

Las lagunas aeradas son una mejora del proceso de lagunas de estabilización que emplea paradores para resolver los problemas de malos olores producidos por sobrecargas de materia orgánica y disminuir los requerimientos de drea. Los sólidos, se mantiene en suspensión en todo el cuerpo de la laguna, siendo más parecido el proceso al sistema de lodos activados sin recirculación que a una, laguna aerobia con suministro natural de oxígeno.

Este tipo de lagunas se emplean en el tratamiento de residuos domésticos de pequeñas y medianas cantidades así como de efluentes Industriales (papelera, procesamiento de alimentos y petroquímica). En estos sistemas no se encuentran

algas, y la mayor cantidad de organismos presentes son bacterias, protozoarios y rotíferos. Las lagunas de aeración se pueden clasificar a su vez en dos tipos de lagunas:

- ↗ Aerada con mezcla completa
- ↗ Aerada con mezcla parcial

#### 2.3.1.4 Lagunas de pulimento

Estas lagunas se utilizan después de otros procesos con dos fines: mejorar la calidad del agua tratada, o bien, reducir la cantidad de microorganismos patógenos. En algunas ocasiones se emplean para nitrificar.

Los procesos biológicos que se realizan en las lagunas de maduración son similares a los de las lagunas aerobias, aunque la fuente de carbono proviene principalmente de las bacterias formadas en las etapas previas del tratamiento. El nitrógeno amoniacal es convertido a nitratos mediante el oxígeno presente en la laguna por fotosíntesis de las algas y por reaeración natural.

La muerte de las bacterias en las lagunas de pulimento depende de varios factores, ambientales y climatológicos. Los principales son: pH alto, producción por algas de compuestos tóxicos extracelulares, agotamiento de nutrientes y exposición al sol (en especial a la luz ultravioleta). En consecuencia, una mayor exposición a la luz solar y el incremento en la concentración de algas implica un aumento en la tasa de remoción de las bacterias fecales y de patógenos.

#### 2.3.2. Lagunas de estabilización anaerobias

Las lagunas anaerobias son profundas y mantienen condiciones anóxicas y anaerobias en todo el espesor de la misma. Esto es parcialmente cierto ya que en un pequeño estrato superficial se encuentra oxígeno disuelto (menos de 50 cm) dependiendo de la acción del viento, la temperatura y la carga orgánica. En general, la zona superior tiene una influencia insignificante en la dinámica microbiana del medio acuático. Con el tiempo se forman natas por arriba del agua residual lo cual evita la presencia de las algas debido a la ausencia de luz solar e impide la difusión de oxígeno del aire.

Normalmente, el efluente de estas lagunas es descargado a otra unidad para complementar el proceso de tratamiento y oxigenar el efluente. La estabilización de la materia orgánica se realiza mediante un proceso combinado de sedimentación y de conversión biológica de los desechos orgánicos en gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ), kilos orgánicos y nuevas células.

En las lagunas anaerobias, la degradación se realiza a través de las bacterias formadoras de ácidos orgánicos y de bacterias metanogénicas. Las primeras, convierten los compuestos orgánicos complejos en moléculas sencillas. Estos productos de degradación ácida son sustrato para las bacterias metanogénicas, que

convierten el material a metano y dióxido de carbono. En las lagunas anaerobias, por su dimensión no es común recuperar el metano o como fuente energética.

El desazolve es más frecuente en este tipo de lagunas (comparado con las facultativas), por ello, se diseñan para limpiarlas cada 2 a 4 años de operación.

### 2.3.3. Lagunas de estabilización facultativas

Una laguna facultativa se caracteriza por presentar tres zonas bien definidas. La zona superficial, donde las bacterias y algas coexisten simbióticamente como en las lagunas aerobias. La zona del fondo, de carácter anaerobio, donde los sólidos se acumulan y son descompuestos, fermentativamente. Y por último una zona intermedia, parcialmente aerobia y parcialmente anaerobia, donde la descomposición de la materia orgánica se realiza mediante bacterias aerobias, anaerobias y facultativas (Figura 2.2).

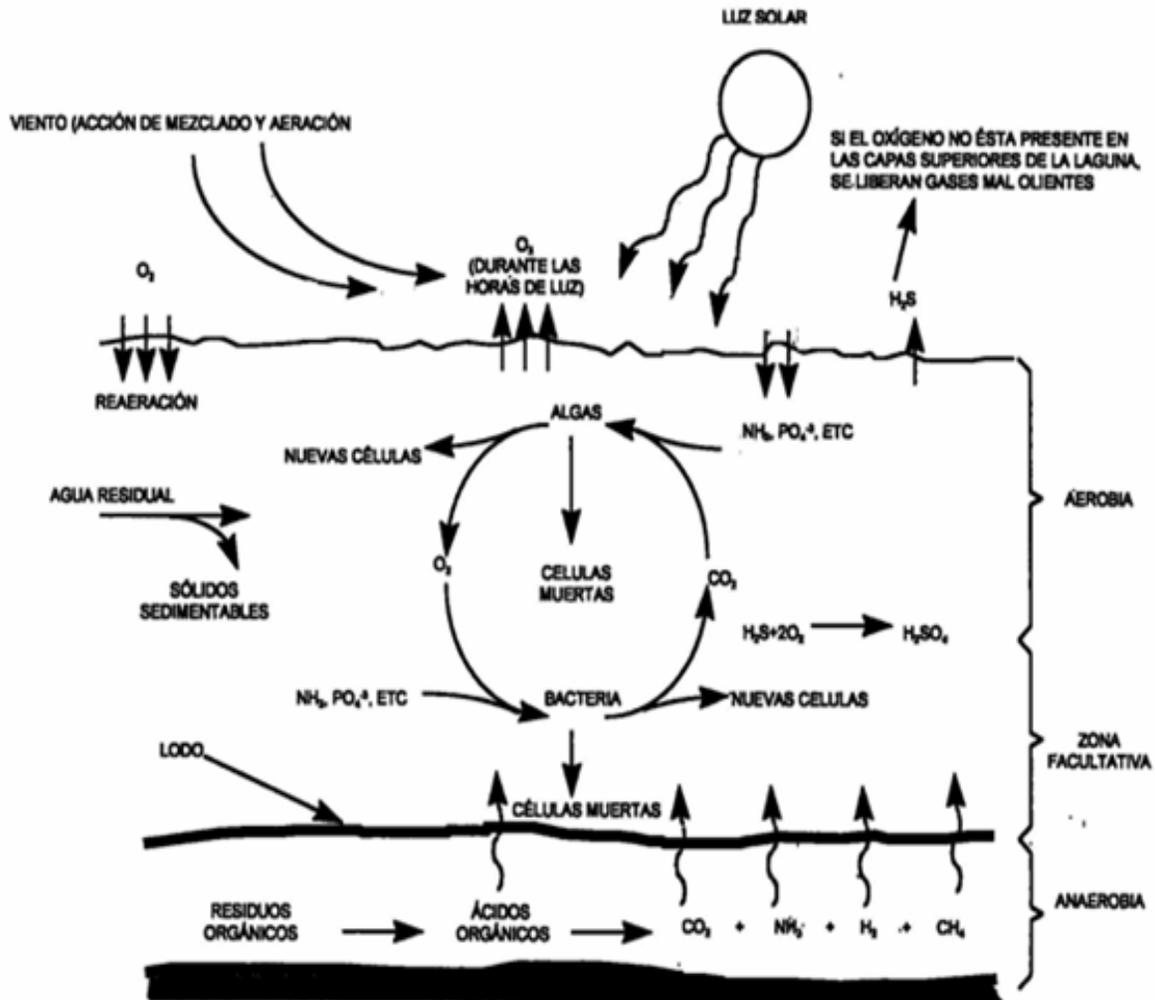


Figura 2.2 Representación esquemática de las lagunas de estabilización facultativas

La materia orgánica soluble y coloidal es oxidada por organismos aerobios y facultativos utilizando el oxígeno producido por las algas que crecen abundantemente en la parte superior de la laguna. El dióxido de carbono producido sirve de fuente de carbono para las algas. Los sólidos presentes en el agua residual tienden a sedimentarse y acumularse en el fondo de la laguna donde se forma un estrato de lodo anaerobio. La descomposición anaerobia de la materia orgánica que se realiza en el fondo de la laguna resulta en una producción de compuestos orgánicos disueltos y gases tales como el dióxido de carbono, (CO<sub>2</sub>), el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y el metano (CH<sub>4</sub>), que son oxidados por las bacterias aerobias, o bien, liberados a la atmósfera.

La comunidad biológica del estrato superior de las lagunas facultativas, es similar a, la descrita para las aerobias e incluyen algas.

Las lagunas facultativas se dividen a, su vez en lagunas totalmente cerradas y de descarga controlada. Las primeras se aplican en climas en los cuales las pérdidas por evaporación son mayores que la precipitación pluvial. Mientras que, las de descarga controlada tienen largos tiempos de retención y el efluente se descarga una o dos veces al año cuando la calidad es satisfactoria. Las descargas se controlan con hidrogramas, así es posible combinar la salida con los picos de gasto del influente, en otras palabras actúan tanto como un mecanismo controlador de la contaminación como un vaso regulador (Middlebrooks y Crites, 1988).

#### 2.4.FACTORES QUE MODIFICAN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

El tipo de comunidad biológica que se desarrolla en las, lagunas y, por lo mismo, la eficiencia del tratamiento depende de múltiples factores, como:

- Calidad del agua a tratar
- Aspectos físicos
- Intensidad de la luz solar
- Viento
- Nubosidad
- Precipitación pluvial
- Infiltración y evaporación
- Temperatura
- Aspectos químicos
- Material disuelto y suspendido
- Oxígeno, disuelto
- Dióxido de Carbono y pH
- Fósforo
- Nitrógeno
- Oligoelementos

En esta sección se describe la influencia de algunos de estos, factores en el comportamiento, de las lagunas de estabilización.

#### **2.4.1. Calidad del agua a tratar**

Las lagunas se utilizan principalmente para dar tratamiento a aguas residuales domésticas. En este sentido los contaminantes que se desea remover son la materia orgánica biodegradable, los sólidos suspendidos y los microorganismos patógenos. Una laguna bien diseñada no tiene problemas para removerlos, Pero, en la práctica se debe considerar la presencia de efluentes industriales sobre todo cuando éstos se encuentran en una proporción mayor al 20% del flujo total, del agua que entra. Se distinguen tres tipos de efluentes industriales que pueden causar problemas en este proceso:

- Aquellos con altas concentraciones de fenoles, que inhiben la fotosíntesis. En este caso se debe efectuar un pretratamiento anaerobio o la segregación de la descarga tóxica.
- Los de balance de nutrientes diferente al requerido (DQO: N: P de 100: 5: 1) que llegan a reducir la eficiencia del tratamiento o inhibir el crecimiento de microorganismos, especialmente de las algas y aumentan el riesgo de anaerobiosis en las lagunas facultativas. Esta situación se puede remediar alimentando descargas con elevado contenido de nutrientes, ó bien, adicionando fertilizantes o estiércol.
- Efluentes con altos contenidos de materia orgánica que requiere un pretratamiento

#### **2.4.2. Aspectos físicos**

La producción de algas y microorganismos de una laguna a otra varia considerablemente en la literatura técnica, reflejando la influencia de las condiciones ambientales (Delaunoy, 1982).

Entre ellos destacan el clima, la intensidad de la luz solar, la latitud, la nubosidad, la precipitación pluvial y la temperatura (Figura 2.3).

##### **Intensidad de la luz solar**

La luz solar constituye una fuente de energía para algunos de los procesos biológicos de la laguna y determina su estructura térmica. La cantidad de luz se mide como la cantidad de energía que incide en el área donde se lleva a cabo la fotosíntesis. La iluminación que se requiere para la actividad biológica de las algas varia de 5 000 a 7 500 luxes. La luz que llega a la laguna es función de la latitud, estación del año, hora del día, condiciones ambientales y tipo de cuerpo de agua.

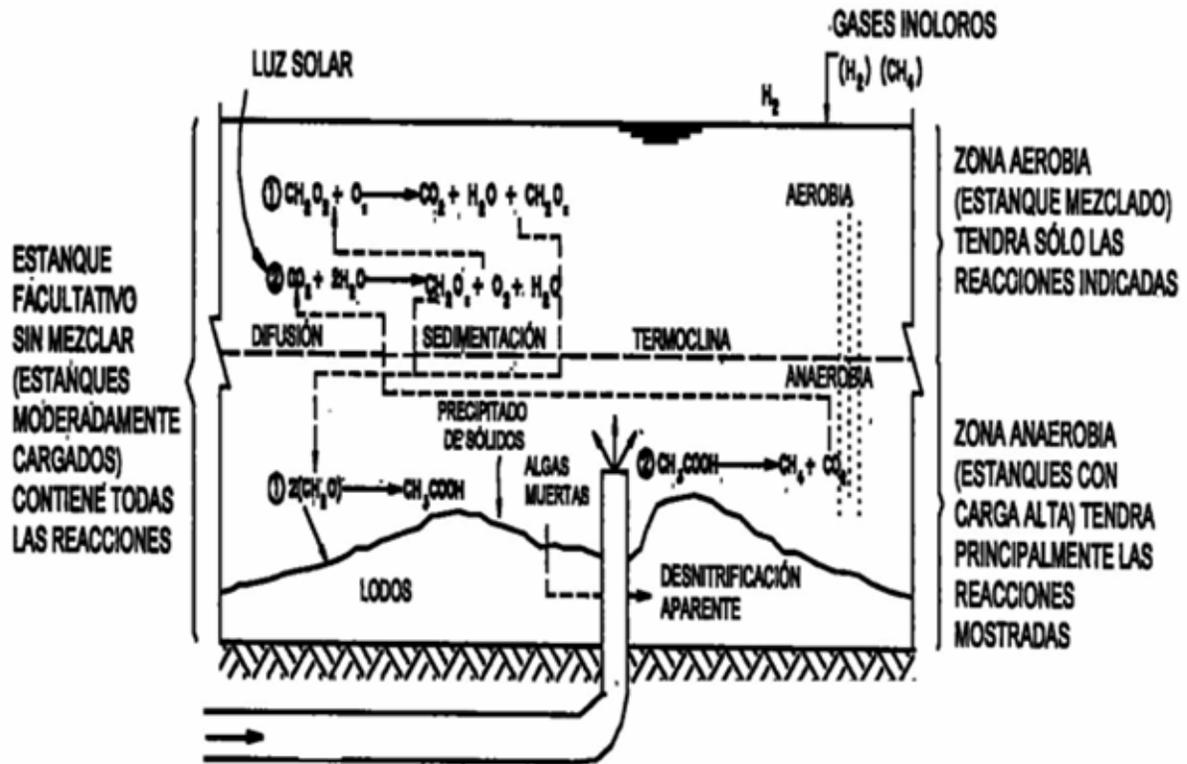


Figura 2.3 Diagrama simplificado del proceso, de degradación de la materia orgánica en una laguna.

Aunque toda la luz incide en la superficie sólo una parte de ella penetra y otra es reflejada a la atmósfera. La parte que no es reflejada se dispersa en el agua y puede salir nuevamente fuera del agua o ser absorbida, por algún material. Las longitudes de onda grandes (rojo y naranja) son absorbidas después de pasar a través de una pequeña distancia, calentando el agua superficial, mientras que las ondas cortas (verde y azul) penetran hasta las zonas profundas. La penetración de la luz depende de la composición del agua y la cantidad de material suspendido o disuelto en ella. La luz se reduce al 1% de la cantidad total que incide sobre la superficie y alcanzan una profundidad menor a 1 m en cuerpos productivos o turbios (Figura 2.4).

En general, se distinguen tres estratos en las lagunas: el superior que se caracteriza, por un exceso de luz y que tiene un espesor, de 110 cm; el central, donde ocurre la iluminación óptima para la fotosíntesis y es de sólo unos cuantos centímetros; y el inferior escasamente iluminado.

Un cuerpo de agua no debe estar completamente estratificado ya que una alta eficiencia fotosintética sólo ocurre con movimiento del agua y alternando las condiciones de luz y oscuridad. De hecho, se ha comprobado que intervalos cortos de radiación solar son mejores que una exposición prolongada a la misma. En cambio, la luminosidad excesiva conduce a un crecimiento y envejecimiento rápido de las algas, disminuyendo la depuración esperada del agua residual.

La fotosíntesis y por tanto, la luz solar son relevantes para las lagunas aerobias y facultativas ya que, como se mencionó, la oxigenación suministrada por las algas es mayor que la aeración natural. De aquí, la importancia de conservar libre de sombras la laguna y de no hacerlas muy profundas. Incluso, algunos investigadores como Golman (en Delaunoy, 1982) consideran que la mayoría de las veces, la actividad biológica ocurre a 25 o 30 cm abajo de la superficie. La temperatura, no es un factor tan importante como la radiación solar para controlar la productividad de algas.

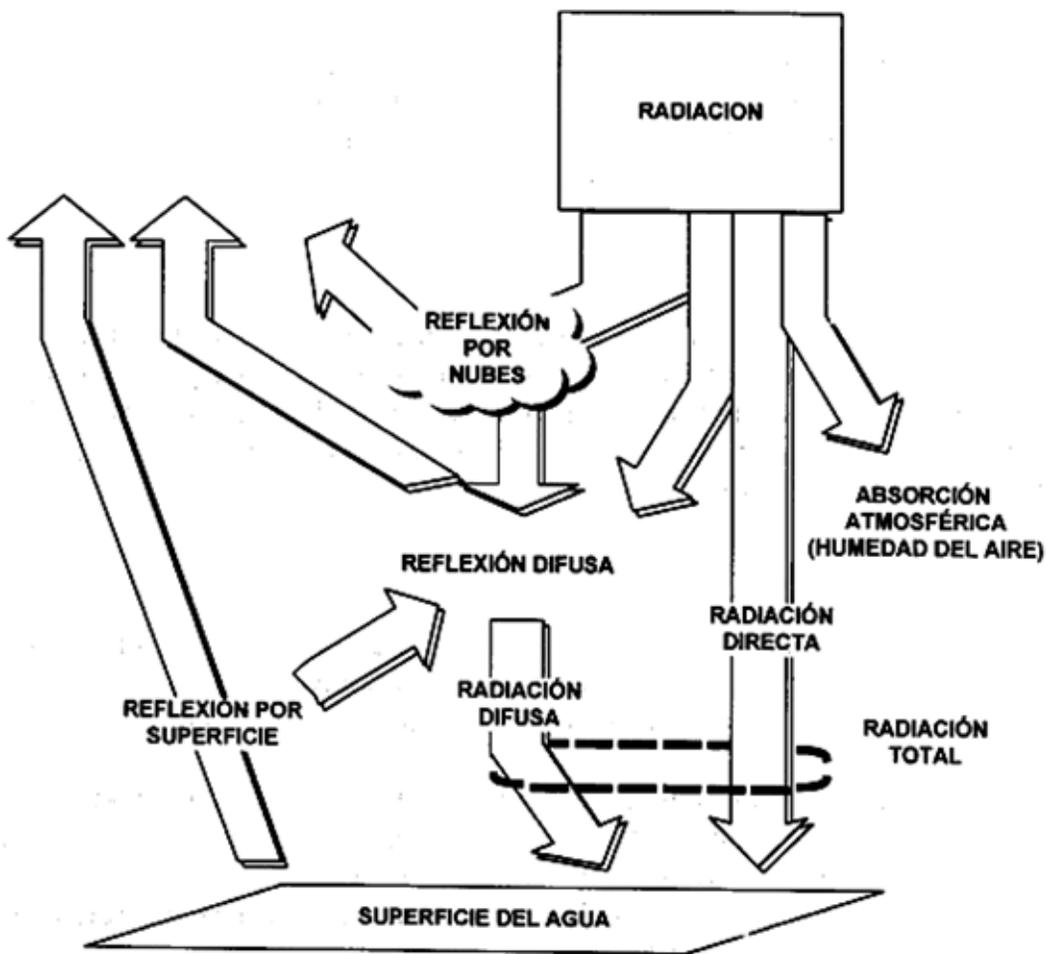


Figura 2.4 Dispersión de luz en un cuerpo de agua

## Viento

El viento interviene en el proceso de autodepuración en las lagunas al provocar una mezcla y generar corrientes verticales del agua. Así, el oxígeno disuelto presente en la superficie es llevado a las capas más profundas. También, la dispersión del agua residual y de los microorganismos en toda la laguna ocurre, por el mismo efecto. El viento ayuda al movimiento de las algas, principalmente de aquellas que son consideradas como grandes productoras de oxígeno como son algas verdes del género *Chlorella*.

Por otra parte, cuando se tiene la presencia de vientos dominantes que pueden transportar los olores generados por un mal funcionamiento en la laguna, la dirección del mismo es un factor determinante. Otro problema, relacionado con vientos fuertes es la formación de olas que pueden provocar la erosión de los terraplenes internos. Por lo general, esto ocurre en lagunas con superficies superiores a 10 hectáreas.

### **Nubosidad**

Las nubes son un agente importante para la dispersión y reflexión de la energía solar, capaces de reducir la radiación directa en un 80 a 90%. Esta reducción varía en función de la distribución, tipos de nubes, la cantidad de absorción, la dispersión atmosférica y de la distancia efectiva (espesor y contenido atmosférico).

### **Precipitación pluvial**

Las precipitaciones pluviales tienen una influencia importante en el funcionamiento del proceso. Lluvias aisladas o escasas no provocan efectos significativos en las lagunas (INITA, CNA y TACSA, 1994). Con lluvia continua el tiempo de retención hidráulica se reduce mientras que lluvias intensas diluyen el contenido de materia orgánica a la laguna y acarrear material orgánico y mineral por medio del escurrimiento.

### **Infiltración y evaporación**

La infiltración y evaporación disminuyen el volumen de agua contenida en una laguna. Ambos factores están íntimamente ligados con las condiciones climáticas y geológicas locales, en especial con la temperatura, el viento, la humedad del aire y el tipo de suelo.

Uno de los factores por cuidar durante la operación es el mantener un nivel constante del líquido y que el espesor del agua sea casi el mismo en cualquier sitio de la laguna. La pérdida de agua provocada por la evaporación, trae como consecuencia la concentración de sustancias contaminantes y aumenta, la salinidad del medio. Ambos efectos resultan perjudiciales para algunos microorganismos y, en consecuencia, para el equilibrio biológico de la laguna.

### **Temperatura**

La temperatura del líquido en la laguna es probablemente uno de los parámetros importantes en la operación de ésta y, por lo general, se encuentra dos o tres grados arriba, de la temperatura ambiente.

Como es sabido, la mayoría de las bacterias trabajan en el intervalo de temperatura mesófilo por lo que las altas, temperaturas no son problema. El incremento por arriba de 25 °C acelera los procesos de biodegradación. Las temperaturas altas permiten el desarrollo de algas azules pero su presencia se relaciona con la muerte de otro

género de algas. Por, el contrario las bajas temperaturas abaten la eficiencia de tratamiento. Cuando la temperatura disminuye se presenta una reducción de la población de algas y del metabolismo bacteriano implicando una disminución de la eliminación de la contaminación orgánica y bacteriológica.

La, Producción óptima de oxígeno se obtiene a los 20 °C, los valores límites son 4 °C y 35 °C. En efecto a partir de 3 °C la actividad fotosintética de las algas decrece y las lagunas se toman más sensibles a choques hidráulicos o a rápidos aumentos en la carga orgánica, lo cual trae como consecuencia una menor eficiencia de la remoción de la DBO. En cuanto a la fermentación anaerobia, ésta se origina, después de los 22 °C y decrece a casi nada por debajo de los 15 °C.

Finalmente la actividad microbiana más intensa a mayores temperaturas ocasiona un incremento en los requerimientos de oxígeno disuelto y, si no se abastece la cantidad requerida, se pueden propiciar condiciones anaerobias que se caracterizan por la presencia de malos olores y un efluente turbio.

### **2.4.3. Aspectos químicos**

#### **Material disuelto y suspendido**

Los compuestos se pueden encontrar en forma disueltos o suspendidos. Las bacterias incorporan las sustancias orgánicas disueltas en sus cuerpos que posteriormente liberan al morir. El material suspendido tiende a sedimentar generando una acumulación en el fondo, el cual con los movimientos del agua pueden resuspenderse y descomponerse biológicamente al mezclarse.

#### **Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto, fundamental para la realización del proceso aerobio, varía en función del día y la profundidad. La evolución diaria de una laguna muestra que el contenido de oxígeno es más elevado en el centro y en la superficie. Durante la noche, las corrientes térmicas mezclan las capas estratificadas lo que garantiza una producción constante de oxígeno durante las mañanas.

Para que se lleve a cabo una adecuada estabilización se requiere valores de oxígeno disuelto comprendidos entre el valor de saturación y un mínimo de 2 mg/l. En algunos casos se tienen valores muy por arriba de la saturación en la capa superior de la laguna debido a la gran actividad fotosintética de las algas. La saturación por oxígeno se obtiene alrededor de 4 horas antes de la aparición del Sol y se mantiene durante todo el periodo de insolación. En condiciones normales, se presenta un gradiente de la concentración de oxígeno disuelto en función del año como se muestra en la Figura 2.5.

## Dióxido de carbono y pH

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es altamente soluble y forma ácido carbónico el cual se disocia y libera iones hidronio. En sistemas donde los carbonatos son abundantes, el pH es relativamente constante. Cuando las sales disueltas en el agua son pobres en carbonatos, la actividad biológica ocasiona grandes cambios de pH.

Durante las primeras horas del día, los valores de pH son bajos (menores de 7) debido al exceso de  $\text{CO}_2$  producido por la respiración bacteriana aerobia durante la noche. De las 14:00 a 16:00 horas, el pH se eleva ya que las algas se encuentran en plena actividad fotosintética. Durante la noche el pH vuelve a declinar por que las algas dejan de consumir  $\text{CO}_2$  y porque continúa la producción de  $\text{CO}_2$  por la respiración de las bacterias.

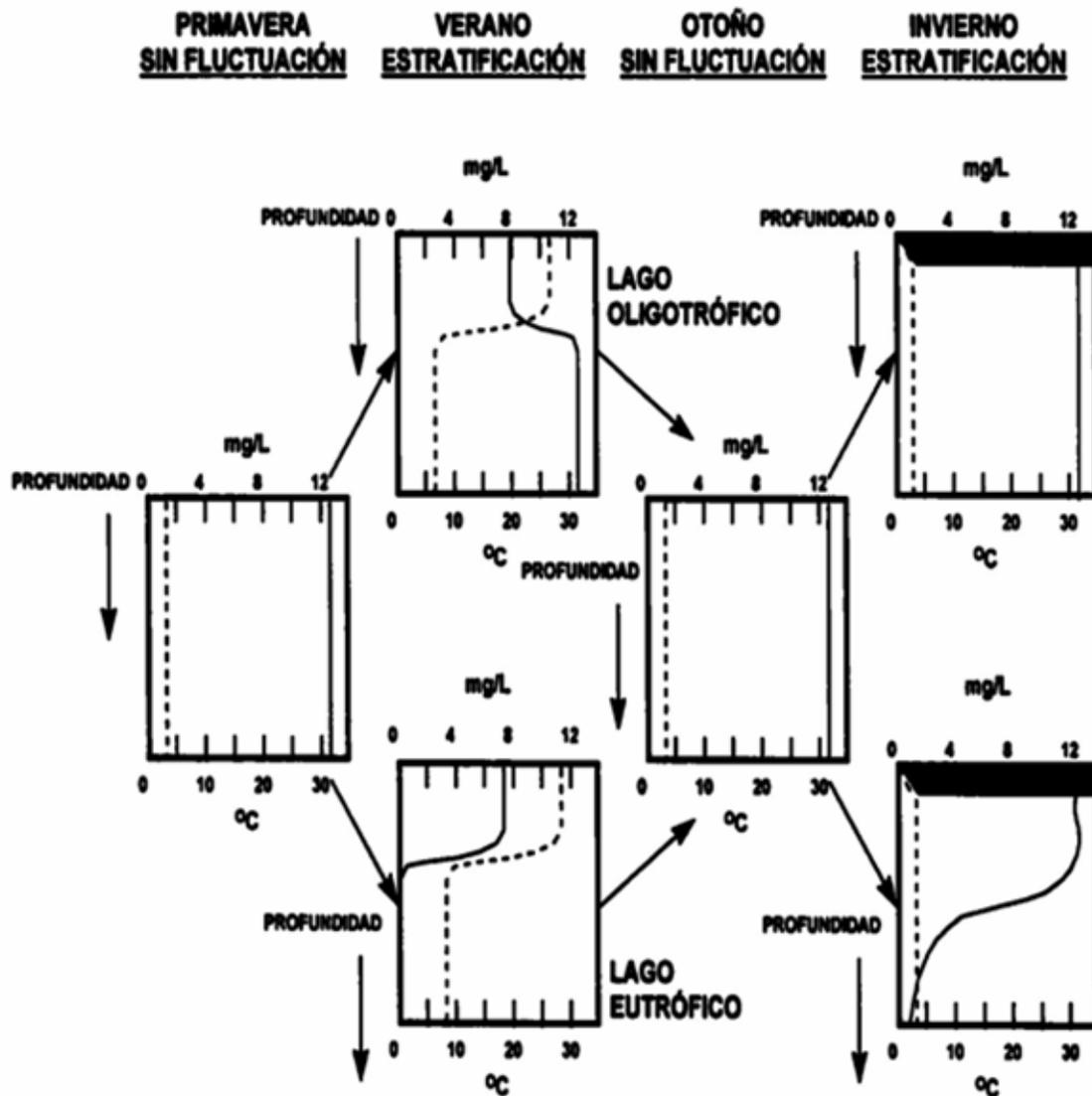


Figura 2.5 Variación del contenido de oxígeno disuelto en una laguna a lo largo del año

## Fósforo

El fósforo está presente como ión fosfato o en complejos orgánicos. Algunos fosfatos son altamente solubles en agua, en particular cuando el oxígeno está presente (Figura 2.6). El fósforo es un nutriente limitante y su adición ayuda a mejorar los problemas ocasionados por una baja biodegradación.

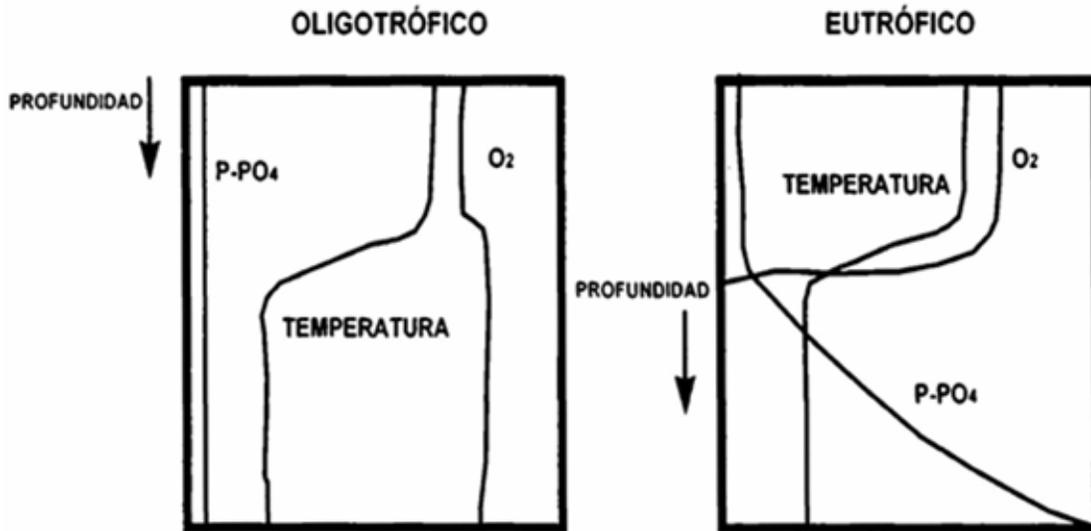


Figura 2.6 Perfil de la concentración del fósforo con respecto a la profundidad en un sistema oligotrófico y eutrófico.

## Nitrógeno

El nitrógeno está presente como  $N-N_2$ ,  $N-NO_2^-$ ,  $N-NO_3^-$ ,  $N-NH_4^+$  y en diversas formas orgánicas. Proviene de la precipitación, el suelo y el agua residual misma, pero su disponibilidad está regulada por los procesos biológicos. Varios tipos de bacterias y algas azul verdes fijan el  $N_2$  en forma orgánica, incorporándolo en el ciclo de nutrientes. El nitrógeno debe estar disponible en relación con la materia orgánica para no volverse un limitante del crecimiento (Figura 2.7).

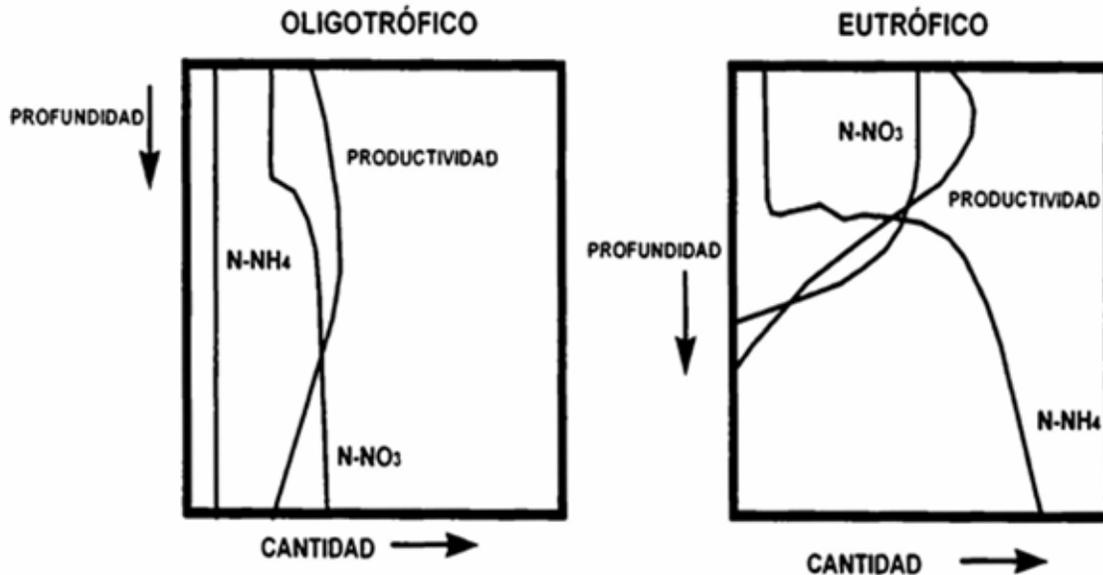


Figura 2.7 Perfil de la concentración del nitrógeno con respecto a la profundidad en un sistema oligotrófico y eutrófico.

## 2.5.PATRONES DE FLUJO HIDRÁULICO

La eficiencia de los procesos de tratamiento del agua residual depende de las características hidráulicas de las unidades de tratamiento, en especial, de la geometría (forma, tamaño y profundidad), el tiempo de retención hidráulica ( $\tau$ ) y el patrón de flujo.

Los patrones de flujo ideales son: flujo pistón y flujo completamente mezclado, de ellos el pistón es el que conduce a mejores resultados en las lagunas.

### 2.5.1.Flujo completamente mezclado

En este patrón de flujo se considera que la concentración de sustrato y de microorganismos es la misma en cualquier parte del reactor biológico. La mezcla completa ocurre cuando las partículas que entran al reactor son dispersadas inmediatamente en todo el volumen del mismo. Se obtiene en reactores cuadrados o circulares si el contenido es uniforme y continuamente redistribuido.

En un reactor completamente mezclado sin recirculación, tanque o laguna, la cinética de remoción de la DBO se expresa como

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{1}{1 + k_\tau} \quad (1)$$

donde:

$S_i$ : DBO influente  
 $S_e$ : DBO efluente

- $\tau$ : tiempo de retención hidráulica
- $k$ : coeficiente de remoción de DBO a la temperatura del líquido.

Las lagunas aeradas se diseñan normalmente considerando este patrón de flujo, garantizando el mezclado por los aeradores mecánicos o el sistema de difusión.

### 2.5.2. Flujo pistón

El reactor ideal de flujo pistón o tubular (Figura 2.8) es aquel en el que no hay mezclado en la dirección del flujo pero si existe un mezclado completo en la dirección perpendicular al mismo, esto es, en la dirección radial. Las concentraciones varían a lo largo de la coordenada de longitud (como se indica en las flechas), pero no a lo largo de la coordenada radial. En general, los reactores de flujo pistón se operan en estado estable, por lo que las propiedades en cualquier posición son constantes con respecto al tiempo.

En un reactor de, flujo pistón la cinética: de remoción de la DBO se expresa como

$$S_e = S_i e^{-k\tau} \quad (2)$$

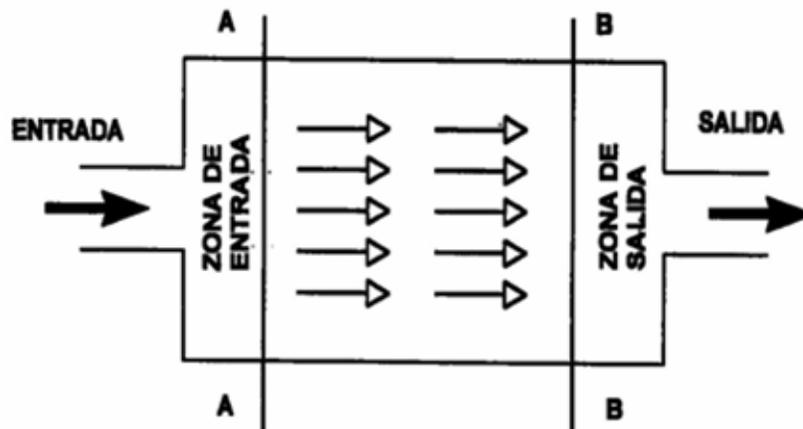


Figura 2.8 Flujo pistón ideal.

### 2.5.3. Desviaciones de la idealidad hidráulica

Una vez establecidas las condiciones de idealidad (reactor completamente mezclado y reactor pistón), es necesario tener en cuenta que éstas no existen que en la práctica las expresiones matemáticas se complican.

En los reactores con mezcla completa las desviaciones principales son la aparición de zonas muertas y de cortos circuitos que aumentan o disminuyen el tiempo de retención hidráulica. Problemas que se determinan con un estudio de trazado.

Con respecto al flujo pistón se presentan dos tipos de desviaciones: aquellas con mezclado parcial en la dirección longitudinal y aquellas con mezclado incompleto en

dirección radial. En la primera, los elementos del flujo no se mezclan sino que siguen trayectorias separadas a través del reactor (flujo disperso). Estos elementos quedan retenidos en consecuencia tiempos diferentes. La segunda, es una distribución del flujo en la cual los elementos adyacentes de éste se mezclan parcialmente (micromezclado). Es, posible evaluar los efectos de estas dos desviaciones sobre la conversión, mediante la evaluación de distribución de tiempos de residencia del fluido en un estudio de trazado (Smith, 1995).

#### 2.5.4. Estudios de trazado

Es importante reconocer que en la práctica no es posible distribuir uniformemente el fluido en la entrada del reactor (lagunas) en su sección longitudinal y transversal, ya que se tienen cambios climáticos y fenómenos de convección en el agua a ser tratada. El viento es uno de los factores que más afectan el régimen de flujo puesto que se generan cortos circuitos y espacios muertos.

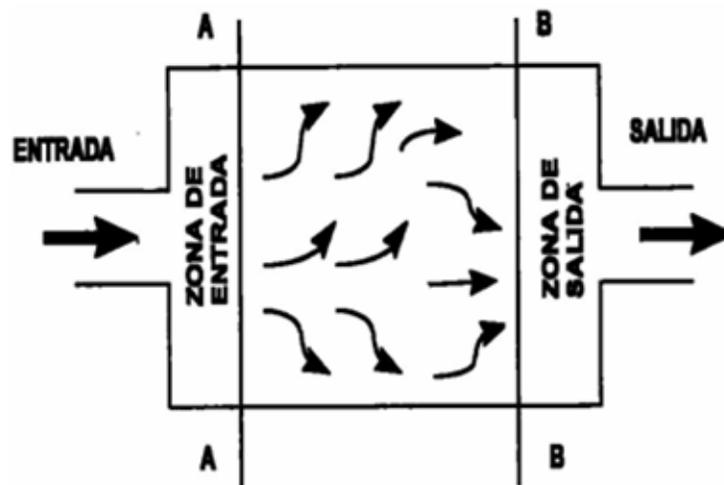


Figura 2.9 Flujo pistón disperso

El tiempo de retención hidráulica,  $\tau$  se estima dividiendo el volumen líquido de la laguna entre el gasto del agua residual. Como en la realidad el tiempo, que cada elemento del agua permanece en la laguna es diferente de  $\tau$ , se efectúa un estudio de trazado para determinar su valor ( $t$ ). De manera que la diferencia entre  $\tau$  y  $t$  debe ser determinada en campo por medio de un estudio de trazado y a medida que  $t < \tau$ , la eficiencia decrece.

Las pruebas con trazadores permiten determinar el patrón de flujo, el tiempo real promedio de retención  $t$  y la existencia de espacios muertos o cortos circuitos. La prueba consiste en adicionar una pequeña mezcla de un trazador (colorante) a un tiempo inicial ( $t = 0$ ) en la entrada de la laguna y monitorear las concentraciones del mismo a la salida a diferentes intervalos de tiempo, para ser graficados como se muestra en la Figura 2.10 (curva C). Las precauciones del estudio consisten en mantener constante la temperatura y la rapidez del flujo, ya que son determinantes en la confiabilidad de los resultados obtenidos (Thirumurthi, 1991).

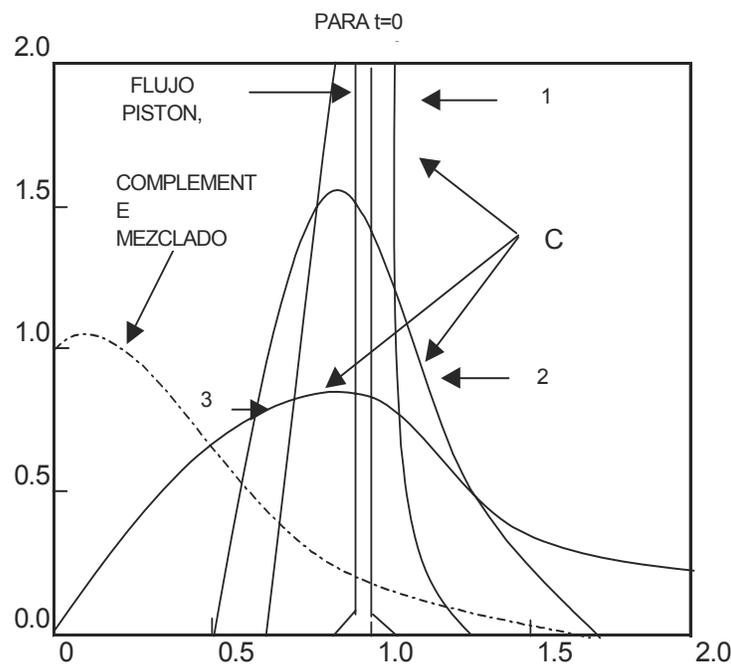
Para un flujo pistón, la curva C tiene un estrechamiento en la base debido a que el trazador no es dispersado y sale todo junto, al igual que entró. Para un flujo pistón disperso, la curva es más amplia en la base; a medida que incrementa la dispersión lateral incrementa la amplitud de la base. Levenspiel (1965), desarrolla una técnica para cuantificar la extensión de la dispersión introduciendo el concepto del índice de dispersión ( $d$ ) que se define como.

$$d = D/UL \quad (3)$$

donde:

- $D$ : coeficiente de dispersión axial ( $m^2/h$ ),
- $U$ : velocidad del fluido ( $m/h$ ),
- $L$ : longitud de la trayectoria del liquido (m)

Para un flujo pistón ideal  $d = 0$  y para un flujo moderadamente disperso  $d$  varía de 0 a 0.25 (Thirumurthi, 1991).



**Figura 2.10 Curvas C típicas de patrones de flujo para regimenes de tipo pistón y completamente mezclado.**

La importancia de seleccionar un trazador es esencial y se deben evaluar sus características químicas, durabilidad, costo y sus limitaciones inherentes. Los posibles trazadores empleados en los estudios hidráulicos son: objetos flotantes, sales, radioisótopos, sustancias colorantes y no colorantes y microorganismos. Los compuestos coloridos tienen mayores ventajas ya que son detectables a bajas concentraciones y en general no son tóxicos. Además, en la selección para análisis de patrones de flujo en lagunas es necesario que el trazador a utilizar tenga las

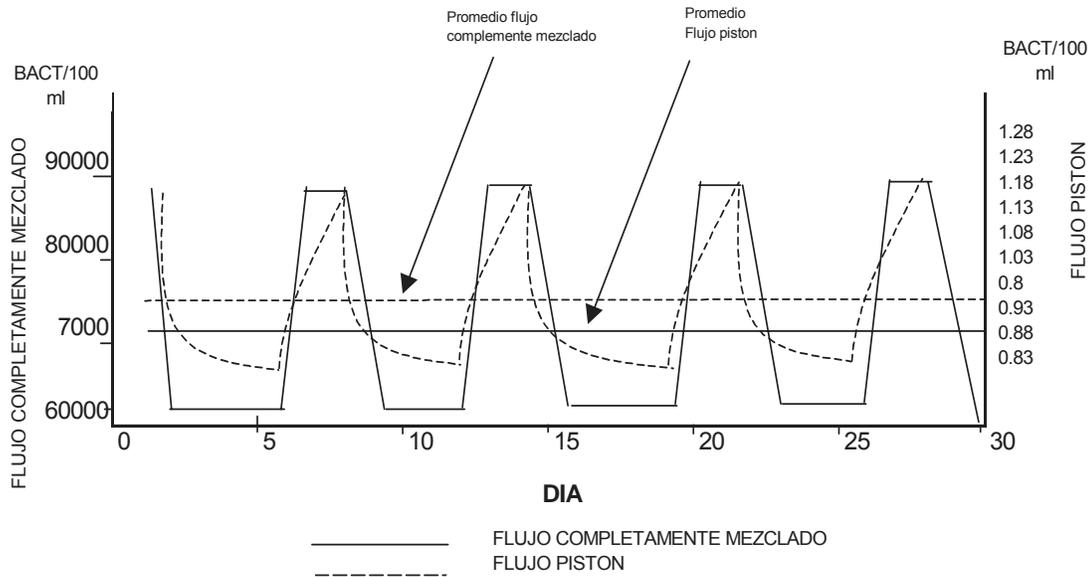
siguientes características: bajo decaimiento de la actividad fotosintética, alta resistencia a la adsorción de sólidos, biodegradabilidad y bajo costo. Los trazadores más empleados son la rodamina B, cloruro y fluoruro de sodio (Aldana et al 1995); sin embargo, se ha reportado problemas con el empleo de las sales cuando al efectuar el estudio de trazado varía la temperatura hay medios porosos o posibilidad de adsorción. Jiménez et al., (1988) sugieren una serie de indicadores especiales para modelación hidráulica en reactores biológicos que son Azul de Dextrano, Azul de Bromofenol, Verde de Bromofenol, Eosina Y y Rodamina B.

#### **2.5.5. Modelos de flujo aplicados a lagunas de estabilización**

Diferentes autores que han desarrollado varios modelos para la remoción de DBO y bacterias en lagunas han encontrado que el flujo tipo pistón las representa en mejor forma, que el tipo completamente mezclado, con excepción de las lagunas completamente aeradas.

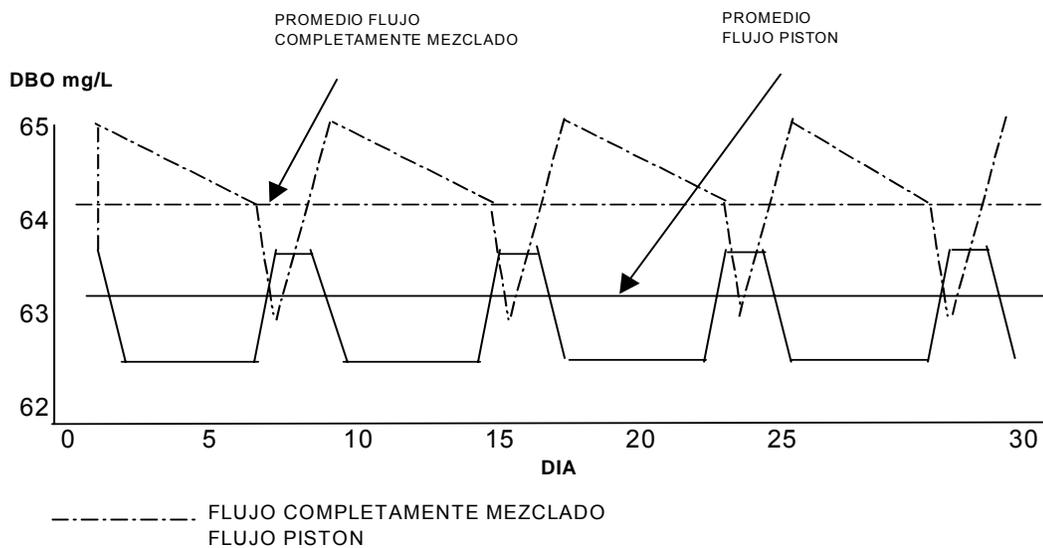
Anteriormente no se consideraban los regímenes de flujo como un factor de pero actualmente gracias a los trabajos de Mara y Pearson (1987 en Arthur, 1990) se recomiendan lagunas con altas relaciones longitud/ancho (favoreciendo el flujo pistón). Algunos autores han señalado el efecto negativo de los cortos circuitos a la entrada y salida de la laguna y recomiendan el empleo de varias lagunas de menor tamaño en serie de manera que se integren como una sola (Juanico, 1991). De hecho, varias lagunas mezcladas en serie equivale a un pistón.

Los efluentes provenientes de un sistema que se acerquen al flujo pistón tienen cuatro órdenes de magnitud menos de bacterias que flujos que tienden a un completamente mezclado. Los cambios en la carga hidráulica no afectan la concentración media de salida, aunque es variable. (Figura 2.11). El flujo pistón muestra mejores eficiencias de remoción cuando la carga orgánica es uniforme o bien cuando los cambios son semanales.



**Figura 2.11 Concentración de bacterias en el efluente de un reactor de flujo pistón y otro completamente mezclado simulados en estado estacionario. Juanico, 1991**

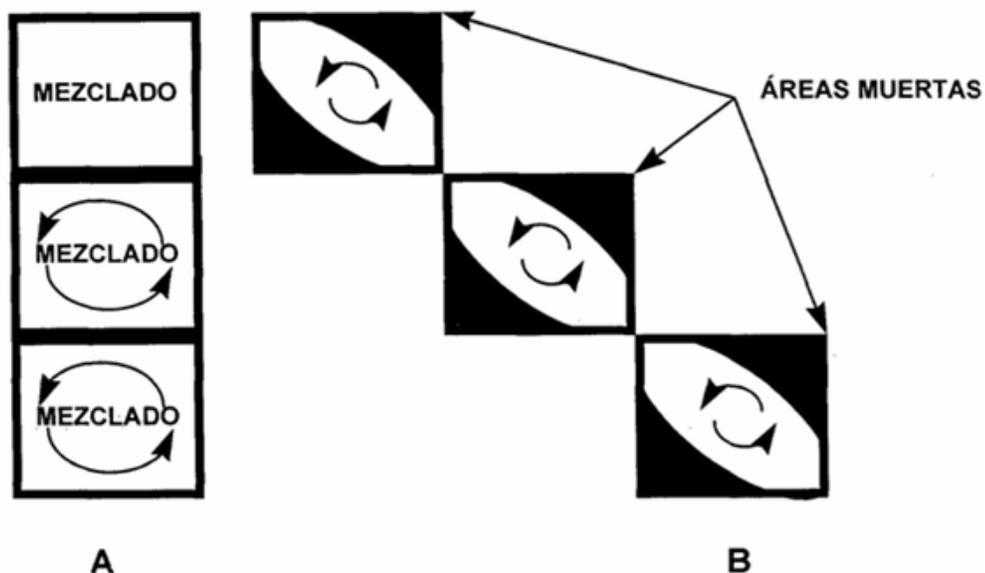
Con respecto a la remoción de la DBO, Juanico (1991) no encontró gran variación entre los dos tipos de regimenes. De manera que los cambios hidráulicos no afectan la remoción de la DBO a la salida de la laguna (Figura 2.12). De esta manera, una laguna facultativa cuya finalidad remover la DBO se puede diseñar como un reactor de flujo pistón o completamente mezclado. Mientras que las lagunas de pulimento construidas para la eliminación de patógenos sólo pueden ser de tipo pistón.



**Figura 2.12 Concentración de DBO en el efluente de un reactor de flujo pistón y otro completamente mezclado simulados en estado estacionario. Juanico, 1991**

Como el carácter facultativo de una laguna se obtiene mediante el control de la carga orgánica en términos de kgDBO/día/área, una laguna facultativa con flujo pistón puede recibir una alta carga orgánica en la primera parte de la laguna (condiciones anaerobias reales), una carga media a la mitad de la laguna (donde se pueden encontrar condiciones facultativas) y una carga baja en la última parte (completamente aerobia) lo que no conduce a lo deseado. El problema puede ser resuelto mediante la recirculación del efluente de la laguna. Sin embargo, la práctica de la recirculación cambia de un régimen de flujo pistón a uno completamente mezclado. El efecto de la recirculación en una serie de lagunas parcialmente mezcladas es positivo para la remoción de la DBO pero aún no está estudiada la recirculación en flujo pistón.

Algunos autores han recomendado el diseño de varias lagunas de pulimento pequeñas en serie instaladas como si fuera una sola, lo cual resulta benéfico para evitar los cortos circuitos y crear un flujo hidráulico cercano al tipo pistón, asegurando la remoción de bacterias. Con respecto a los reactores completamente mezclados, se ha observado a través de estudios realizados con trazadores que las lagunas rectangulares no están bajo dicho régimen, pero si tienen una área de mezclado central aun que a la entrada y salida del sistema se tengan zonas muertas. Para resolver este problema, se debe considerar el diseño de lagunas pequeñas con tiempos de retención cortos y reducir las zonas muertas y los circuitos cortos. La Figura 2.13 muestra la diferencia entre un flujo hidráulico ideal en operación cuando una laguna es dividida en varias pequeñas. La solución a este problema es diseñar las lagunas con una relación adecuada largo/ancho, lo que indica que se parte de un flujo completamente mezclado a uno pistón. El uso de mamparas favorece este tipo de flujo (Quanico, 1991).



**Figura 2.13 Flujo hidrdulico en una serie de lagunas de maduración pequeñas con un tiempo de retención corto. A) Se considera un flujo Completamente mezclado, B) diseño hidráulico y flujo de operación**

### 3.DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

La aplicación de las lagunas como método de tratamiento se dio en forma casual por lo que las primeras no se diseñaron, simplemente se usaron y funcionaron. Para este capítulo, es conveniente tener presente que los modelos matemáticos son una herramienta de apoyo para el diseño de algún proceso. Cabe señalar que la complejidad de las reacciones biológicas y las interacciones que se dan entre ellas dificultan, por una parte, la racionalización de los criterios y recomendaciones de diseño y, por la otra, el establecimiento de una metodología basada en un modelo matemático simple y universal para las lagunas (Ouano, 1981). A pesar de ello se han establecido criterios (apoyados ya sea en modelos matemáticos, conceptualizaciones teóricas y/o en la experiencia) con los que obtienen sistemas confiables para predecir la calidad de los efluentes (Thirumurthi, 1991). De hecho, dado el gran tamaño de las lagunas los más útiles son los más simples que se derivan de la experiencia mientras que los más complicados ayudan a entender el proceso.

En este capítulo se describen algunas metodologías que han sido propuestas para diseñar los diferentes tipos de lagunas. Asimismo, se presenta al final de cada sección un resumen de los métodos de diseño.

#### 3.1.CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO

Para realizar en forma apropiada el diseño y la operación de una laguna es necesario entender claramente el significado de los siguientes conceptos en los que se basan la mayoría de los criterios y recomendaciones:

Tiempo de retención hidráulica ( $\tau$ ). Es el tiempo que teóricamente pasa el agua dentro del sistema de tratamiento biológico y que se utiliza en el diseño. Se puede estimar a partir de la siguiente relación.

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

donde:

- V: Volumen total del líquido contenido dentro de la laguna, m<sup>3</sup>
- Q: Gasto de agua, m<sup>3</sup>/d

Volumen efectivo ( $V_E$ ). Es el volumen donde se realiza efectivamente el tratamiento biológico y es menor que V debido a que toman en consideración los cortos circuitos y zonas muertas en la laguna. De la utilización de este volumen, se deriva el concepto de tiempo real de retención hidráulica:

$$t = \frac{V_E}{Q} < \tau \quad (5)$$

donde:

$t$ : Tiempo Promedio real de retención hidrúlica, obtenido a partir de un estudio de trazado, d

$V_E$ : Volumen efectivo de la laguna, m<sup>3</sup>

Carga orgánica ( $C_o$ ). Es la masa de sustrato (materia orgánica medida como DBO<sub>5</sub>, o DQO) que se aplica diariamente a la laguna y que será estabilizada en el tratamiento biológico. Su valor se expresa normalmente en kg de DBO<sub>5</sub>, por unidad de tiempo. Se obtiene mediante

$$C_o = \frac{S_i}{Q} \quad (6)$$

Carga orgánica superficial ( $C_s$ ) Es la masa diaria de sustrato aplicado a la laguna por unidad de área superficial. Se expresa en kgDBO/m<sup>2</sup>.d y se estima mediante

$$C_s = \frac{S_i \cdot Q}{A} \quad (7)$$

Carga orgánica volumétrica ( $C_v$ ). Es la masa diaria de sustrato aplicado a la laguna por unidad de volumen y tiempo. Se expresa en kgDBO o DQO/m<sup>3</sup>.d y se calcula mediante

$$C_v = \frac{S_i \cdot Q}{V} \quad (8)$$

Cabe mencionar que tanto para la carga orgánica superficial como para la volumétrica es común omitir el término orgánico.

## 3.2.LAGUNAS AEROBIAS

### 3.2.1.Lagunas aerobias con oxigenación natural

Los sistemas de lagunas aerobias se usan principalmente para la producción de algas y requieren grandes áreas por unidad de DBO estabilizada comparadas con los sistemas facultativos o anaerobios (Ouano, 1981).

Una laguna aerobia sin aeración superficial se puede diseñar para una producción máxima de algas o de oxígeno (lagunas aerobias de alta tasa), o bien, para mantener las condiciones aerobias a través de toda la laguna (lagunas aerobias de baja tasa). En este tipo de reactores, el oxígeno es provisto por la fotosíntesis y la reaeración. En general, el tiempo de retención es de 3 a 5 días con profundidades de 0.3 a 0.45 m y remociones entre el 80 y 95 % de la DBO soluble. La concentración de DBO<sub>5</sub>, que incluye la producida por las algas excede, y en mucho, la concentración de la DBO del influente, pero como las algas no forman parte de la carga contaminante, se

deben separar antes de evaluar la, eficiencia, de la lagyna 1 (Ouano, 1981). Los lodos que sedimentan en la laguna deben ser removidos una vez cada 2 a 4 años para evitar, la formación de capas anaerobias.

Las lagunas aerobias de baja tasa se aplican como un postratamiento a efluentes secundarios por lo que requieren tiempo de retención mayores para garantizar un tratamiento adecuado.

El proceso para diseñar lagunas aerobias es similar a los empleados para lagunas facultativas, con base en la carga orgánica superficial y el tiempo de retención hidráulico. Las plantas de mayor tamaño se diseñan como reactores de flujo completamente mezclado, usando dos o tres reactores en serie. Una segunda aproximación es el uso de ecuaciones que consideran una cinética de primer orden como la desarrollada por Weliner-Williwm para un reactor con un regimen arbitrario (entre un flujo pistón y uno completamente mezclado). En la Tabla 3.1 se indican algunas recomendaciones de diseño para las lagunas aerobias.

**Tabla 3.1 Cuadro resumen localidades mayores de 50,000 habitantes**

RECOMENDACION DE DISEÑO	LAGUNAS AEROBIAS DE BAJA TASA	LAGUNAS AEROBIAS DE ALTA TASA
Tiempo de retención, d	10 a 40	4 a 6
Profundidad, m	0.90 a 1.20	0.30 a 0.45
Carga superficial <sup>b</sup> , kg/ha.d	67 a 135	90 a 180
Conversión de DBO <sub>5</sub> , %	80 a 95	80 a 95

Notas:

<sup>a</sup> Dependiendo de las condiciones climáticas.

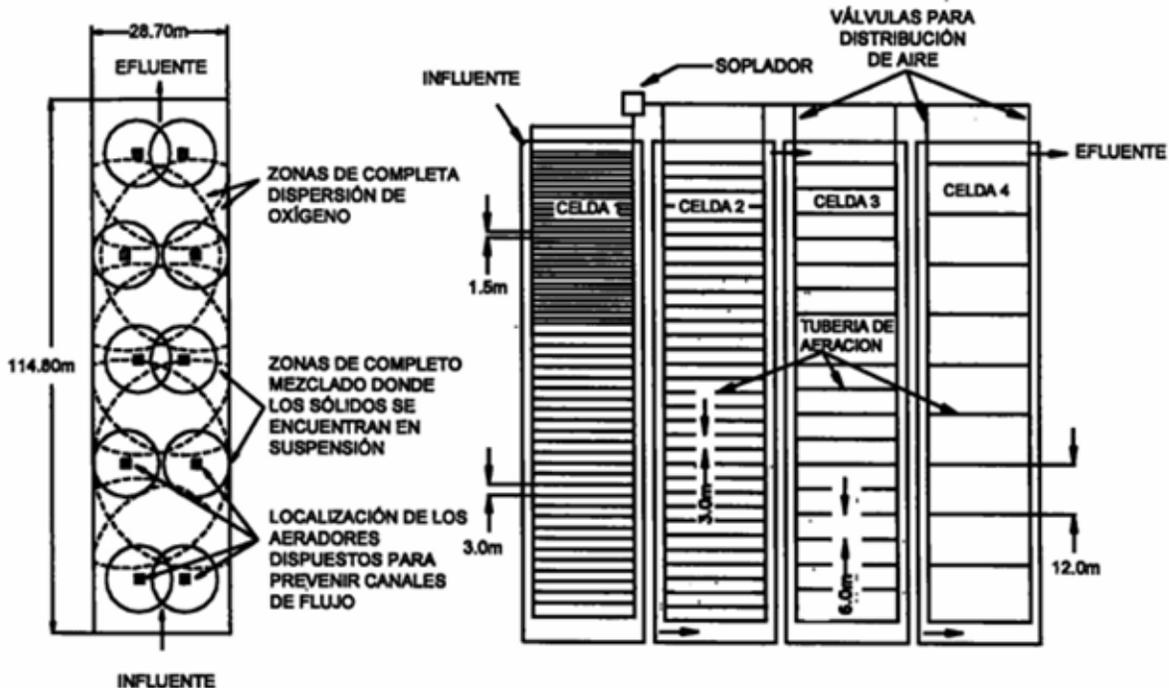
<sup>b</sup> Valores típicos. Se han aplicado valores muy superiores en dferentes plantas.

FUENTE: METCALF y EDDY, 1991

### 3.2.2.Lagunas aeradas en forma mecánica

Una laguna aerada se puede definir como una variante, del tratamiento de lodos activados en la que los lodos biológicos se mantienen en equilibrio con los contaminantes aplicados. Este sistema difiere del de lodos activados convencional en que no es necesaria la recirculación de la biomasa activa y que la concentración de los microorganismos depuradores no es muy alta. Esta falta de organismos es compensada por un volumen considerable del tanque, correspondiente a varios días (3 a 20) de retención del agua por tratar (Ouano, 1981).

Por lo común, son tanques con profundidad de 2 a 6 m en el cual el oxígeno, es, proporcionado por difusores o sistemas mecánicos de deración. La Figura 3.1a muestra la distribución de, los aeradores superficiales y la Figura 3.1b la correspondiente a difusores.



**Figura 3.1 Líneas de distribución de a) aeradores superficiales y b) difusores en la primera laguna de un sistema parcialmente mezclado**

La transferencia de oxígeno en el agua depende de diferentes parámetros: calidad del agua, temperatura y presión atmosférica (altitud). El movimiento generado durante la aeración debe ser eficiente de manera que asegure la repartición uniforme del oxígeno disuelto en toda la extensión de la laguna.

En los sistemas aerados artificialmente no sólo se aplican las cantidades de oxígeno requeridas sino que se mantiene un contacto estrecho y uniforme con la biomasa, el material contaminante y el oxígeno disuelto en toda la extensión de la laguna alcanzando tasas de oxidación de 1.5 a 2.0  $d^{-1}$  y, en ocasiones, incluso más elevadas. Tal intensificación en el proceso de tratamiento permite incrementar la capacidad de oxidación en la laguna y, como resultado, el tiempo de retención se reduce considerablemente, asegurando más o menos tasas normales para las reacciones bioquímicas durante el periodo del invierno. Más afín, se puede aumentar la profundidad de la laguna (5 a 6 m), lo que ayuda a disminuir los requerimientos de área.

Debido al corto tiempo de retención, la comunidad biológica de este tipo de lagunas no es tan diversa como en las lagunas facultativas. Las bacterias son la especie microbiana predominante. Todo esto permite la producción de un efluente con una calidad mejor y más constante durante todo el año.

Los principales factores para la determinación de una laguna aerada son: la remoción de la DBO, la aeración, y la producción de lodos. Dado que la tasa de biodegradación es mayor que en las lagunas no aeradas, las cantidades de oxígeno

producido por las algas no constituyen un factor de diseño (Thirumurthi, 1991) La Figura 3.2 muestra un esquema general de las lagunas aeradas

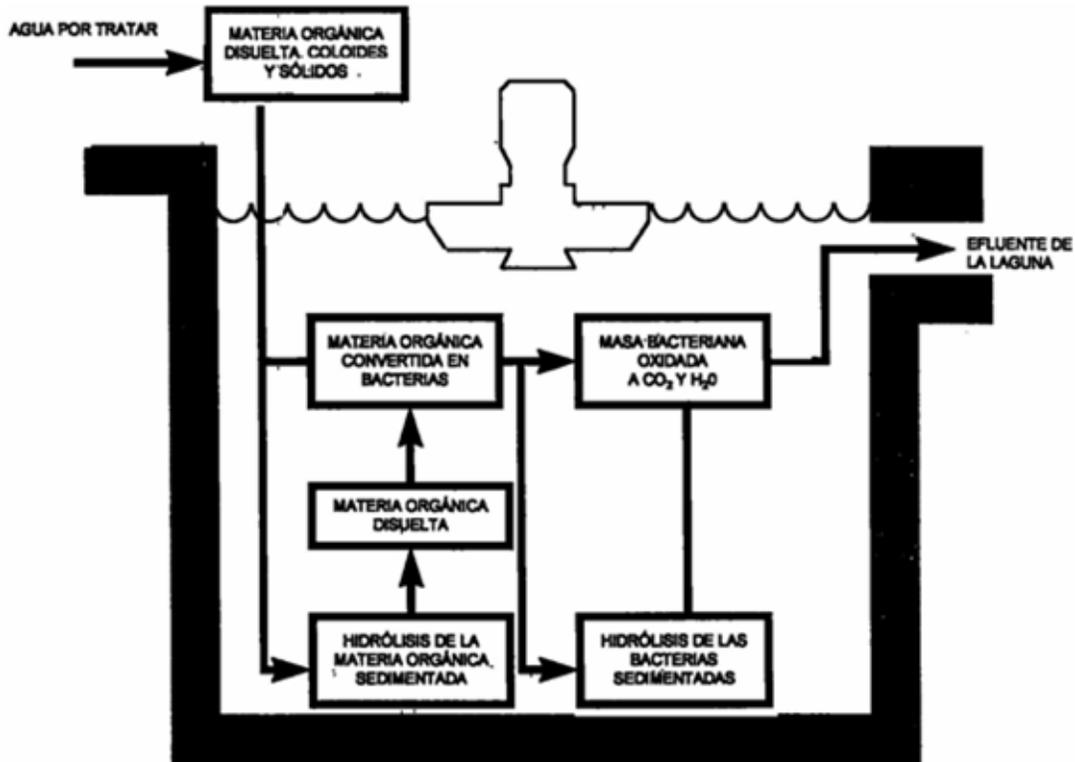


Figura 3.2 Esquema de una laguna aerada

Las lagunas de aeración se clasifican en:

- Aeradas con mezcla, completa
- Aeradas con mucia parcial

Las lagunas aeradas completa y parcialmente se diferencian por el nivel energético empleado. En las primeras, la energía debe ser lo suficientemente alta para mantener todos los sólidos en suspensión con el oxígeno disuelto; la energía varía de 2.8 a 3.9 W/m<sup>3</sup>. Los datos experimentales demuestran que 2.8 W/m<sup>3</sup> es suficiente para mantener en suspensión los sólidos en efluente de papeleras, mientras que se requieren 3.9 W/m<sup>3</sup> para sólidos de aguas residuales de origen doméstico. En las segundas, los aeradores son usados para proporcionar la tasa de la transferencia del oxígeno necesaria para mantener las condiciones, aerobias. De esta manera, la energía requerida inicialmente es reducida de celda en celda debido a la disminución de la materia orgánica (DBO) que se va a estabilizar. Los requerimientos de oxígeno se calculan usando cuidadosamente las fórmulas desarrolladas para los sistemas de lodos activados; sin embargo, se debe tener en cuenta que estas ecuaciones consideran que toda la DBO<sub>5</sub> que entra a la laguna es oxidada. Posterior al cálculo de la tasa de transferencia de oxígeno es necesario revisar los catálogos de los

fabricantes para determinar la zona de dispersión completa de oxígeno por aeradores superficiales, helicoidales o chorros de aire.

### 3.2.2.1 Aeradas con mezcla completa

En las lagunas aeradas con mezcla completa, el oxígeno disuelto y los sólidos son mantenidos en suspensión de manera uniforme a través del estanque por lo que se requiere una relación suministro de potencia/volumen alta. La remoción de DBO<sub>5</sub>, varía de 50 a 60 % con la desventaja de que el efluente transporta una gran cantidad de sólidos. De hecho, funcionan básicamente como un sistema de lodos activados sin recirculación.

Para el diseño se cuenta con modelos basados en cinéticas de primer orden para reactores de flujo completamente mezclado y de flujo pistón.

#### Diseño

En estas lagunas, la concentración en equilibrio de los sólidos y la tasa de remoción orgánica para un tiempo de retención constante aumentan conforme incrementa la concentración de materia orgánica en el influente. Para un agua residual, la concentración en equilibrio de sólidos biológicos,  $X_v$ , puede ser calculada mediante la siguiente expresión (Eckenfelder Jr., 1989)

$$X_v = \frac{Y \cdot S_i}{1 + b \cdot \tau} \quad (9)$$

Cuando están presentes sólidos suspendidos volátiles no biodegradables, la expresión tiene la siguiente forma

$$X_v = \frac{Y \cdot S_i}{1 + b \cdot \tau} + X_i \quad (10)$$

donde:

- $X_v$ : sólidos suspendidos volátiles de equilibrio en la laguna, mg/l
- $X_i$ : sólidos suspendidos volátiles en el influente no degradables en la laguna mg/l
- $Y$ : Coeficiente de producción de biomasa, mg SSV/mg DBO
- $b$ : Coeficiente de decaimiento endógeno, d<sup>-1</sup>

Con respecto a la remoción de la DBO del influente, éste se determina mediante la fórmula tradicional para un reactor completamente mezclado con cinética de primer orden

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{1}{[1 + k \cdot \tau]} \quad (11)$$

El coeficiente  $k$  depende de la temperatura y el tipo del agua. Este coeficiente es igualmente sensible a la presencia de nutrientes (nitrógeno y fósforo). Por otro lado, el oxígeno requerido para la biooxidación es función de la proporción de DBO a remover y de la cantidad de microorganismos presentes

$$O_r = a'Q(S_i - S_e) + b'X_v \quad (12)$$

donde:

- $O_r$ : cantidad de oxígeno requerida, kg/d
- $a'$ : coeficiente del oxígeno consumido por unidad de DBO removida, kg  $O_2$ /kg  $DBO_{rem}$
- $b'$ : coeficiente de respiración endógena de las bacterias, kg  $O_2$ /kg SSV.d

El coeficiente  $a'$  es variable dependiendo de la naturaleza de la materia orgánica por remover. En general, se encuentra entre 0.5 y 1.5 kg  $O_2$ /kg  $DBO_{rem}$ . Para  $b'$  se tienen valores relativamente constantes de 0.06 a 0.1 kg  $O_2$ /kg SSV.d. La determinación de estos coeficientes se realiza mediante pruebas respirométricas.

Por otra parte, dado que el suministro de oxígeno no es igual en laboratorio que en campo es necesario calcular el rendimiento  $N$  de un equipo de aeración en condiciones diferentes a las de referencia (20 °C y 760 mm Hg), esto es:

$$N = N_o \times \left( \frac{\beta C_w - C_L}{C_{O_{sat}}} \right) \times 1.024^{(T-20)} \times \alpha \quad (13)$$

donde:

- $N_o$ : rendimiento del equipo de aeración en condiciones estándar (20 °C y 760 mm Hg)
- $C_{O_{sat}}$ : concentración del oxígeno saturado en el agua residual, mg/l
- $C_L$ : concentración del oxígeno disuelto en el agua durante la aeración, mg/l
- $C_s$ : concentración del oxígeno saturado en agua pura a 20°C y 1 atm, mg/l
- $\alpha$ : coeficiente de transferencia de oxígeno en el agua tratada (0.65 - 0.95)
- $\beta$ : factor de corrección por salinidad y tensión superficial (0.9 - 1.0)

Un problema en la aplicación de ésta ecuación es que, está influenciada por los cambios de temperatura en la laguna, la cual es función de la temperatura del agua que entra y de la del aire. Algunas fórmulas han sido desarrolladas para estimar la temperatura de las lagunas aeradas, la ec. (14) desarrollada por Mancini y Barnhart, 1976 (en Middlebrooks y Crites, 1988), se emplea con fines de diseño. Esta ecuación fue desarrollada para aeración superficial no así para aeración subsuperficial (difusores).

$$T = \frac{AfT_a + QT_i}{Af + Q} \quad (14)$$

donde:

$T_a$ : temperatura del aire, °C

$T_i$ : temperatura del agua residual influente, °C

$f$ : factor de proporcionalidad que involucra los coeficientes de transferencia de calor, el aumento del área superficial por el equipo de aeración y los efectos por el viento y la humedad es igual a 0.5

### 3.2.2.2 Aeradas con mezcla parcial

Las lagunas aeradas parcialmente, mezcladas también se conocen como lagunas aeradas facultativas. En estas lagunas, la aeración sirve sólo para proveer un adecuado abastecimiento de oxígeno, lo que no garantiza que todos los sólidos estén en suspensión (completamente mezclado). Lo anterior se debe a que al mantenerse el oxígeno, sólo en las capas superiores del tanque una parte de los sólidos está en suspensión, los cuales salen con el efluente, mientras la parte restante decanta en el fondo del mismo, (Middlebrooks y Crites, 1988).

La principal ventaja de estas lagunas es que requieren menor área superficial que, las lagunas facultativas sin aeración. Generalmente, se diseñan como reactores total o parcialmente mezclados, ya que la energía disipada es empleada para mantener el contenido de la laguna en suspensión (Figura 3.3). La remoción de  $DBO_5$  varía del 70 al 90%.



Figura 3.3 Tipos de lagunas aeradas (facultativas)

### Diseño

La remoción de la DBO se estima empleando un modelo de  $j$  reactores completamente mezclados en serie con reacción de primer orden. Como, es lógico, el empleo de un modelo de flujo pistón y cinética de primer orden también predice el funcionamiento de este tipo de lagunas (Ouan, 1981). Por lo que se diseñan empleando la siguiente ecuación

$$\frac{S_j}{S_i} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{k\tau}{j}\right)\right]} \quad (15)$$

donde:

$S_j$ : concentración de la DBO en el efluente por celda, mg/l  
 $j$ : número de celdas en la serie

La ecuación 15 considera la operación de  $j$  celdas de igual tamaño dispuestas en serie y una cinética de primer orden. De tal manera que para  $j$  número de celdas o reactores de cualquier forma y tamaño, se establecen  $j$  número de términos

$$\frac{S_j}{S_i} = \left( \frac{1}{1+k_1\tau_1} \right) \left( \frac{1}{1+k_2\tau_2} \right) \dots \left( \frac{1}{1+k_j\tau_j} \right) \quad (16)$$

donde:

$k_1, k_2, \dots, k_j$ : tasas de reacción en las celdas 1 a la  $j$   
 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j$ : tiempos de retención hidráulicas para las respectivas celdas.

Teóricamente un número de reactores de igual volumen dispuestos en serie es más eficiente que reactores de volúmenes diferentes; sin embargo, la topografía del terreno es una de las razones para proyectar celdas o lagunas de volúmenes desiguales.

La selección de los valores de  $k$  es una decisión crítica en el diseño de sistemas lagunares La Tabla 3.2 indica algunos de los valores recomendados por diversas fuentes.

**Tabla 3.2 Valores de  $k$  recomendados por diversos autores**

Origen	$k, d^{-1}$	Temperatura, °C
Ten States Recommended Standards	0.276	20
	0.138	1
Bouller and Atchinson	0.2 - 0.3	20
	0.1 - 0.15	0.5
Reid (para lagunas parcialmente mezcladas en Canadá)	0.28	20
	0.14	0.5

FUENTE: OUANO, 1981

Al poner la ecuación 15 en términos de  $z$ . se tiene

$$\tau = \frac{j}{k} \left[ \left( \frac{S_i}{S_j} \right)^{1/j} - 1 \right] \quad (17)$$

donde, para estimar el área superficial se debe corregir  $k$ , por temperatura.

Para la configuración de las lagunas parcialmente mezcladas se recomienda que las celdas se diseñen con una relación largo/ancho de 3:1 o 4:1 para favorecer un flujo pistón. Las dimensiones de las celdas se pueden calcular por medio de la ecuación

$$V = [LW + (L - 2sh)(W - 2sh) + 4(L - sh)(W - sh)] \frac{h}{6} \quad (18)$$

donde:

- L: longitud de la laguna o celda, m
- W: ancho de la laguna o celda, m
- s: factor de inclinación (ej. 3:1, s = 3)
- h: profundidad de la laguna, m

En general, en una laguna facultativa aerada, el nivel de sólidos biológicos mantenidos en suspensión es función de la energía empleada en ella y la sedimentación de los mismos en el fondo trae consigo una degradación anaerobia, la cual resulta en la alimentación de material orgánico soluble a las capas superiores de nitrógeno y de fósforo. Lo anterior se relaciona como

$$\frac{S_e}{FS_i} = \frac{F \cdot S_i}{F \cdot S_i + k_{am} \cdot X_v \cdot \tau} \quad (19)$$

donde:

- F: coeficiente para contabilizar la solubilización del sustrato
- K<sub>am</sub>: constante de actividad anaerobia

El grado de actividad anaerobia depende fuertemente de la temperatura y del coeficiente F que varía de 1.0 a 1.4 en condiciones de invierno a verano.

Los sólidos suspendidos volátiles en las lagunas aeradas parcialmente (X<sub>v</sub>) se mantienen a un nivel más bajo que en las lagunas aeradas completamente y las sustancias orgánicas solubles son integradas al líquido como productos de degradación anaerobia. Por ello, no es posible calcular los requerimientos de oxígeno empleando las ecuaciones para lodos activados, pero es posible estimarlos de manera empírica a través de la remoción orgánica con

$$R_r = F' \cdot S_r \quad (20)$$

donde:

- R<sub>r</sub>: remoción orgánica
- F': coeficiente de sobreutilización del oxígeno
- S<sub>r</sub>: concentración de DBO removida

Los resultados obtenidos para diferentes residuos industriales indican que el coeficiente F' es función del grado de actividad biológica, que a su vez está dependiente de la temperatura. En general, dependiendo de la localización geográfica de la

planta,  $F'$  varia de 0.8 a 1.1 durante el invierno cuando la actividad anaerobia en el tanque es mínima y de 1.1 a 1.5 en verano cuando la actividad anaerobia en el fondo del tanque es máxima (Eckenfelder Jr., 1989).

Los requerimientos de nutrientes son calculados de manera similar que para sistemas de lodos activados. Pero, además se debe considerar la retroalimentación a partir de la descomposición anaerobia de lodo sedimentado, lo que abastece de la cantidad de nutrientes requeridos por el proceso y evita la adición extra de nitrógeno y fósforo.

La Tabla 3.3 muestra una síntesis de los modelos estudiados.

**Tabla 3.3 Método de diseño para lagunas aeradas**

MÉTODO DE DISEÑO	VARIABLES	ECUACIÓN	VALORES RECOMENDADOS
Aeradas con mezcla completa	Concentración de sólidos suspendidos volátiles	SSV: $\tau = \frac{1}{b} \left[ \frac{Y \cdot S_i}{X_v} - 1 \right]$ SSV no biodegradables: $\tau = \frac{1}{b} \left[ \frac{Y \cdot S_i}{X_v - X_i} - 1 \right]$	b : 0.1 a 0.2 d <sup>-1</sup> a 20 °C
	Tasa de remoción orgánica.	$\frac{S_e}{S_i} = \frac{1}{[1 + k \cdot \tau]}$	
	Requerimientos de O <sub>2</sub>	$O_r = a'Q(S_i - S_e) + b'X$	a': 0.5 y 1.5 kg O <sub>2</sub> /kg DBO <sub>rem.</sub> b': 0.06 a 0.1 kg O <sub>2</sub> /kg SSV.d
Aeradas con mezcla parcial	Cinética de 1 <sup>er</sup> orden, k, para flujo pistón o real en serie  j: en serie	$\frac{S_j}{S_i} = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{k\tau}{j} \right) \right]^j}$ en serie $\frac{S_j}{S_i} = \left( \frac{1}{1 + k_1\tau_1} \right) \left( \frac{1}{1 + k_2\tau_2} \right) \dots \left( \frac{1}{1 + k_j\tau_j} \right)$	Ten States Recommended Standards k = 0.138 - 0.276 a T entre 1 y 20 °C Bouliuer Atchinson k=0.2 - 0.3 a T = 20 °C y k=0.1 - 0.15 a T=0.5 °C Reid (para lagunas parcialmente mucladas en Canadá): k = 0.14 - 0.28 a T entre 0.5 y 20 °C Relación largo/ancho : 3 :1 o 4 :1 en cada Celda Yánez : k : 2.5 d <sup>-1</sup> a 20°C

### 3.2.3.Lagunas de pulimento

Una vez que la DBO ha sido degradada a niveles aceptables para su descarga a corrientes de agua la concentración de los coliformes fecales por lo común es muy alta ( $10^6$  o  $10^7$ ). En este caso se recurre al uso de lagunas de maduración que además pueden servir de criadero de peces.

Un problema en el diseño de estas lagunas es que no han sido extensamente estudiados los factores que afectan la muerte bacteriana. Hoy día, las mayoría de las lagunas de maduración se diseñan con base en métodos empíricos y semi-empíricos a partir de fórmulas desarrolladas para las lagunas facultativas. Sin embargo, algunos de los estudios reportados en la literatura como el de Oswald, Thirumurti y Marais han revelado que la muerte bacteriana depende principalmente de parámetros ambientales y climatológicos. Los parámetros que han sido postulados como aquellos que interfieren son: pH alto (Parhad y Rao), la producción de compuestos extracelulares tóxicos por las algas (Davis y Gloyna), el agotamiento de los nutrientes (McGarry et al.) y la exposición al sol o a la luz ultravioleta (Kapuscinski et al; Moller et al.). Polprasert et al., 1983 (en Quin et al., 1991) además de la temperatura, incluyeron los efectos de la concentración de algas, la carga orgánica, la intensidad y duración de la luz, el tiempo de retención hidráulica, la rapidez de degradación del sustrato y el coeficiente de dispersión para la muerte bacteriana. Mancini y Ridgewood por su parte, indicaron que la muerte bacteriana también depende del coeficiente de extinción de la luz y la profundidad del agua para conseguir un mezclado perfecto. Asimismo, Parhad y Rao determinaron que la generación de efectos antagónicos y antibióticos afectan la tasa de decaimiento bacteriana (Quin et al., 1991).

En general, una laguna de maduración tiene una profundidad de 0.9 a 1.5 m. El tiempo de retención depende de la eficiencia de remoción de patógenos usando a los coliformes fecales como indicadores, aunque hay modelos que incluyen la remoción de huevos de helmintos.

Los métodos de diseño se dividen en empíricos, semi-empíricos y cinéticos. Los primeros fueron desarrollados por Marais, y la, OPS. Sin embargo se ha establecido que los métodos empíricos son más confiables (Quin et al., 1991 y Ayres et al., 1993).

#### 3.2.3.1 Métodos empíricos y semi-empíricos

Método de Quin, Bliss, Barnes y FitzGerald (Quin et al., 1991). Estos autores mediante la identificación de los principales parámetros que afectan la muerte bacteriana y sus relaciones entre ellos establecieron un modelo experimental que define tres grupos de factores que tienen efectos significativos sobre el coeficiente de primer orden para el decaimiento bacteriana. Estos grupos son:

GRUPO A Ambiental, incluye la temperatura, pH y carga orgánica de manera que

$$k_{obs} = k_T + k_{pH} + k_{DBO5} \quad (21)$$

donde:

$k_{obs}$ : tasa de decaimiento en la obscuridad  
 $k_T$ : tasa de decaimiento en función de la temperatura

$$k_T = 0.0279 + 0.00890 \cdot T \quad (22)$$

$k_{pH}$ : tasa de decaimiento en función del pH

$$k_{pH} = 0.2207(pH)^2 - 3.5797(pH) + 14.489 \quad (23)$$

$k_{DBO5}$ : tasa de decaimiento en función de la  $S_i$

$$k_{DBO5} = 0.46 - 0.184 \cdot \log(S_i) \quad (24)$$

GRUPO B Iluminación, que incluye la intensidad de la luz (I) y el coeficiente de extinción. Estos a su vez relacionados por la profundidad, la concentración de algas y la turbiedad, los cuales afectan la tasa de decaimiento

$$k\ell = k_h h + k_{CA} C_A + k_{turb} Turb \quad (25)$$

donde:

$k\ell$ : coeficiente de la extinción de la luz  
 $k_{turb}$ ,  $k_h$ ,  $k_{CA}$  coeficientes de la tasas de decaimiento en función de la turbiedad (Turb), profundidad (h) y concentración de algas (CA) y los efectos de la extinción de la luz se calculan mediante la ec. (26)

$$I = I_0 \cdot (1 - B) \cdot (1 - e^{-k\ell h}) / k\ell h \quad (26)$$

donde:

I: Intensidad de la luz a la profundidad h  
 $I_0$ : Intensidad de la luz en el agua superficial de la laguna  
B: coeficiente del efecto de la capa superficial (0.0 a 0.3)

GRUPO C Factores que definen las dimensiones físicas de las lagunas (profundidad, ancho y largo) y la configuración hidráulica del sistema, incluyendo tiempo de retención y número de dispersión: D. La ecuación que se aplica fue desarrollada por Polprasert et al, 1983 (en Quin et al., 1991)

$$D = \frac{E[D_t \cdot v_t (W + 2h)]^q \cdot W^{(2-q)}}{L \cdot h^{(1+q)}} \quad (27)$$

donde:

- $V_T$  viscosidad cinemática a la temperatura T
- $q$ : exponente = 0.489
- $E$ : constante que depende de la configuración de la laguna (1.264 a 4.044)

La ecuación general es

$$k_{CF} = k_{obs} + k\ell \quad (28)$$

donde:

- $k_{CF}$  es el coeficiente de decaimiento bacterial

De esta manera, el modelo consiste en combinar los factores de los tres grupos con un modelo de dispersión. Para su calibración se empleó un efluente secundario, operando entre 15 °C y 35 °C y pH de 8.6 a 10. Los resultados obtenidos, a nivel piloto muestran una excelente eliminación de bacterias patógenas., sin embargo,. la aplicación práctica de este modelo es limitada.

Remoción de huevos de helmintos (Ayres et al., 1993). Se ha demostrado que la remoción de huevos de helmintos en las lagunas de estabilización es altamente eficiente si hay suficiente sedimentación. De hecho la mayor parte de los huevos de helmintos se remueve por decantación en las lagunas: anaerobias o en la facultativa primaria.

Dependiendo del número de huevos de helmintos presentes en el agua residual cruda y de los tiempos de retención de las lagunas anaerobias y facultativas, puede ser necesario incorporar una laguna de maduración: para asegurar que el efluente final contenga el estándar deseado. Los análisis de los datos de remoción de huevos en Brasil, India y Kenya (Ayres, et al., 1992; en CNA e IMTA, 1994) han llevado a las siguientes relaciones, las cuales son igualmente válidas para lagunas anaerobias, facultativas y de maduración.

$$R_{HH} = 100 \cdot \left[ 1 - 0.4^{-0.38 \cdot \tau} \right] \quad (29)$$

donde:

- $R_{HH}$ : remoción de huevos de helmintos, %

La ecuación que corresponde a un límite de confianza del 95% está dada por una modificación realizada por Yáñez a la ecuación 29.

$$R_{HH} = 100 \cdot \left[ 1 - 0.41^{-0.38 \cdot \tau + 0.0085 \cdot \tau^2} \right] \quad (30)$$

La ecuación 30 se aplica secuencialmente a cada laguna en serie, de tal manera que el número de huevos de helmintos, en el efluente final pueda ser calculado. Esta ecuación, por ser empírica el principal factor de remoción está relacionado con la sedimentación por lo que para influentes con un alto contenido de sales no se recomienda su empleo.

### 3.2.3.2 Métodos cinéticos

Método de Marais de 1974 (en Ouano, 1981). Marais propuso un modelo basado en la cinética de primer orden y considerando un reactor completamente mezclado.

$$CF_e = \frac{CF_i}{1 + k_{CF} \cdot \tau} \quad (31)$$

donde:

$CF_e$ : número de coliformes fecales en el efluente/100 ml

$CF_i$ : número de coliformes fecales en el influente/100 ml

$k_{CF}$ : tasa de primer orden para la remoción de coliformes fecales de  $2.6 \text{ d}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$

Para lagunas en serie se establecen  $j$  términos en función del número de lagunas

$$CF_e = \frac{CF_i}{(1 + k_{CF} \cdot \tau_1)(1 + k_{CF} \cdot \tau_2) \cdots (1 + k_{CF} \cdot \tau_j)} \quad (32)$$

Según Mara (1976), el gasto máximo del efluente de cada laguna en serie debe ser menor de  $500 \text{ m}^3/\text{d}$  y de preferencia mayor a  $250 \text{ m}^3/\text{d}$ .

La clave para un diseño eficiente es el valor de  $k_{CF}$ , Yáñez, 1984 considera que el valor de  $k_{CF}$  de Marais es demasiado alto y sugiere la ecuación 33.

$$k_{CF} = 0.84(1.07)^{T-20} \quad (33)$$

Los datos colectados en Africa (Alabaster et al., 1989), Francia y Portugal (Mills, 1987 en Rolim, 1990) y en Brasil (Pearson et al., 1904 en Rolim, 1990) son menos conservadores que el de Marais pero se ha encontrado que el uso de este valor tiene efectos positivos ya que reduce los requerimientos de área.

La ecuación 33 también se puede emplear directamente en la ecuación propuesta por Thirumurti, 1969 (en CNA e IMTA, 1994). Esta ecuación emplea el factor de dispersión con base en la relación largo/ancho de la laguna

$$\frac{CF_e}{CF_i} = \frac{4 \cdot a \cdot e^{(1-a/2d)}}{(1+a)^2} \quad (34)$$

donde:

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392 \cdot X + 1.01360 \cdot X^2} \quad (35)$$

$$a = \sqrt{1 + 4 \cdot k_{CF} \cdot \tau \cdot d} \quad (36)$$

Modelo empleado por la Organización Panamericana de la Salud, OPS (IMTA, 1995). La OPS utiliza un modelo matemático calibrado a través de pruebas en flujo discontinuo (batch) realizadas en campo para la predicción de la calidad del efluente en las lagunas de estabilización. El modelo se basa en la Ley de Chick para la remoción de las bacterias.

$$CF_e = CF_i \cdot e^{(k_{CF} \cdot \tau)} \quad (37)$$

Dado a que en las lagunas reales no se tienen condiciones de flujo discontinuo sino continuo, la ley de Chick se ve modificada por el efecto de dispersión. Para el modelo de la OPS, el factor de dispersión se calcula con las consideraciones de:

- Geometría de la laguna (L, W, h)
- Diseño y ubicación de las estructuras de entrada y salida (H)
- Velocidad de flujo, filtración y evaporación (E)
- Temperatura del agua y la intensidad luminosa (I)
- Caracterización del agua residual que ingresa a la laguna
- Constantes de decaimiento, k y  $k_{CF}$
- Operación y mantenimiento

de tal forma que:

$$S_e = f(L, W, h, H, E, T, I, k, k_{CF}, O \& W) \cdot S_i \quad (36)$$

El modelo además considera algunas correcciones especiales para tomar en cuenta el efecto de la mortalidad de las algas a través de tres factores:

- A. Factor de corrección hidráulica (*FCH*). En la mayoría de las lagunas de estabilización el comportamiento hidráulico es regido por las leyes del flujo laminar. Bajo este régimen de flujo las capas superiores del agua de la laguna hacia las cuales son atraídas las algas durante el día se mueven a una velocidad igual a 3/2 de la velocidad promedio. Por consiguiente, el tiempo de retención de la biomasa que está en esta zona de la laguna tiende a ser  $(2/3) \cdot (V/Q)$ .

Debido al efecto de la posición relativa de las estructuras de entrada y salida, y al diseño de las mismas, el factor de corrección hidráulica (*FCH*) tiene en la práctica un valor entre 0.3 y 0.8. Tomando en cuenta este factor, el tiempo de retención modificado será

$$\tau_c = FCH \cdot \tau \quad (37)$$

donde:

$\tau_c$ : tiempo de retención hidráulica corregido.

- B. Factor de características de sedimentación (*FCS*). El valor de este factor varía de 0.5 a 0.8 en lagunas primarias; y está cerca de 1.0 para lagunas secundarias y de pulimento. El valor del *FCS* por lo general es más bajo para las bacterias que para la DBO.
- C. Factor de DBO intrínseca de las algas (*FIA*). Las algas que mueren en las lagunas ejercen una DBO que debe ser tomada en cuenta agregando el valor *FIA* al lado derecho de la ecuación 34. El valor de *FIA* varía entre 0 y 1.2 correspondiendo los valores bajos a lagunas primarias y los altos a las de maduración.

Lo anterior muestra que la información requerida para emplear este modelo es excesiva y ello refleja la complejidad de su uso.

Finalmente, la Tabla 3.4 muestra el resumen de los modelos vistos para el diseño de las lagunas de pulimento.

### 3.3.LAGUNAS ANAEROBIAS

Las lagunas anaerobias son poco empleadas debido a los problemas relacionados con el olor. A finales de 1940, Parker demostró que si no se excede una determinada carga orgánica los gases malolientes no son de consideración. Por ejemplo, para las condiciones de Africa del Sur se estima 400 gDBO/m<sup>3</sup>.d como carga volumétrica límite antes de que se libere al ácido sulfídrico (Marais, 1970 en Ouano, 1981).

La digestión anaerobia es más lenta que la reacción aerobia. En las lagunas anaerobias una gran parte de las partículas coloidales están bajo coalescencia formando natas y lodos que aceleran la remoción de la DBO<sub>5</sub> suspendida por adsorción (Ouano, 1981). La digestión anaerobia es muy sensible, a los cambios de pH y no tiene lugar fuera del intervalo de 6.0 a 8.0, de tal manera que se requiere suficiente alcalinidad.

Las lagunas anaerobias en general reciben altas cargas orgánicas y no cuentan con zonas aerobias. Normalmente, son de 2.5 a 5 m de profundidad. Las dimensiones se seleccionan dando una relación mínima del área superficial/volumen de manera que tenga una retención calorífica máxima (Eckenfelder Jr., 1989). La remoción de la DBO en el sistema es debida a la sedimentación y adsorción de los sólidos (Figura 3.4).

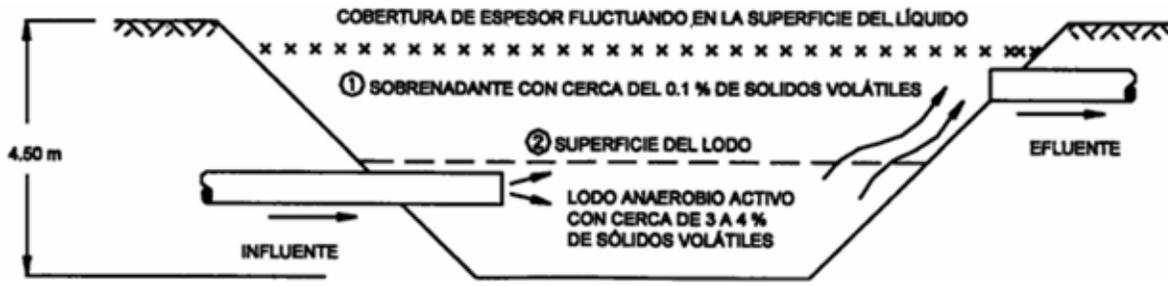


Figura 3.4 Esquema de una laguna anaerobia

**Tabla 3.4 Métodos de diseño para lagunas de pulimento**

MÉTODO DE DISEÑO	VARIABLES	ECUACIÓN	VALORES RECOMENDADOS
Métodos empíricos y semi- empíricos			
Quin et al., 1991	$K_{obs}$ , $k\ell$ , D	$k_{CF} = k_{obs} + k\ell$	No Disponible
	Ambiental : T, pH, Si	$k_d = k_T + k_{pH} + k_{DBO5}$ $k_T : k_T = 0.0279 + 0.00898 \cdot T$ $k_{pH} : k_{pH} = 0.2207(pH)^2 - 3.5797(pH) + 14.489$ $k_{DBO5} : k_{DBO5} = 0.46 - 0.184 \cdot \log(S_i)$	No Disponible
	Iluminación: I, $k_t$	$k\ell = k_h h + k_{CA} C_A + k_{urb} Turb$ $I = I_0 \cdot (1 - B) \cdot (1 - e^{-k\ell h}) / k\ell h$	No Disponible
	Dimensiones físicas y configuración hidráulica	$D = \frac{E[D_t \cdot v_t (W + 2h)]^q \cdot W^{(2-q)}}{L \cdot h^{(1+q)}}$	No Disponible
Thirumurti, 1969	d, a, X	$\frac{CF_e}{CF_i} = \frac{4 \cdot a \cdot e^{(1-a/2d)}}{(1+a)^2}$ $X = \frac{d}{-0.26118 + 0.25392 \cdot X + 1.01360 \cdot X^2}$ $a = \sqrt{1 + 4 \cdot k_{CF} \cdot \tau \cdot d}$	$k_{CF} = 0.84(1.07)^{T-20}$
Ayres et al., 1993 Yáñez	t y sedimentabilidad	$R_{HH} = 100 \cdot [1 - 0.4^{-0.38 \cdot \tau}]$ Limite de confianza del 95% $R_{HH} = 100 \cdot [1 - 0.41^{-0.38 \cdot \tau + 0.0085 \cdot \tau^2}]$	

**Tabla 3.4 Métodos para lagunas de pulimento (continuación)**

MÉTODO DE DISEÑO	VARIABLES	ECUACIÓN	VALORES RECOMENDADOS
Métodos cinéticos			
Marais, 1974	Reactor de flujo Completamente mezclado con cinética de 1er orden	$\tau = \frac{1}{k_{CF}} \left[ \frac{CF_i}{CF_e} - 1 \right]$	$k_{CF} = 2.6d^{-1} a 20^{\circ}C$ Yánez: $k_{CF} = 0.84(1.07)^{T-20}$
	j: reactores en serie	$CF_e = \frac{CF_i}{(1 + k_{CF} \cdot \tau_1)(1 + k_{CF} \cdot \tau_2) \cdots (1 + k_{CF} \cdot \tau_j)}$	$k_{CF} = 2.6d^{-1} a 20^{\circ}C$ Yánez: $k_{CF} = 0.84(1.07)^{T-20}$ 250 M3/d < Qmax < 500
OPS, 1995	Ley de Chick modificada por el fenómeno de dispersion	$S_e = f(L, W, h, H, E, T, I, k, k_{CF}, O \& W) \cdot S_i$ $\tau = \log \frac{CF_e}{CF_i} / k_{CF}$ FCH, FCS, FIA	FCH - 0.5 - 0.8 FCS : 0.3 - 0.8 lagunas primarias y 1.0 para lagunas secundarias y de pulimento FIA : 0 - 1.2

El efluente de una laguna anaerobia es de color amarillo a café oscuro con sólidos suspendidos blancos. Posterior a la laguna anaerobia se requiere una laguna facultativa para pulir el efluente y mantener el nivel de DBO<sub>5</sub> en los estándares por reoxigenación. A menudo, se recircula el efluente de una laguna facultativa a la superficie de la anaerobia para minimizar los problemas de olor al formar una capa aerobia.

Para agua residual municipal, Marayeporta tasas de acumulación de lodos de 0.03 a 0.04 m<sup>3</sup>/hab.año. Para residuos industriales estima que del 20 al 30% de la DBO<sub>5</sub> en el influente es transformada en lodo. Así, las lagunas anaerobias remueven el 70% de la DBO influente; 50 a 40% de la DBO removida es convertida a CO<sub>2</sub> y gas metano. Del 40 a 60% de la DBO remanente es convertida a lodos. El contenido de sólidos sedimentables varía de 6 a 10% debido a la compactación. El desazolve es más frecuente en este tipo de lagunas que en las facultativas, por ello, se diseña una zona profunda, de 2 a 4 veces el valor lateral del tanque. La digestión de los lodos está limitada al 60% del contenido orgánico total debido al agotamiento del oxígeno contenido en las sustancias del lodo (Ouano, 1981).

El desazolve se realiza cuando la laguna está llena con lodos a la mitad de su capacidad. El tiempo de desazolve puede estimarse mediante la siguiente ecuación.

$$\theta_L = \frac{0.5 \cdot V}{T_{ac} \cdot P} \quad (38)$$

donde:

- $\theta_L$  periodo de desazolve, años
- $T_{ac}$ : tasa de acumulación de lodos, m<sup>3</sup>/hab.año
- $P$ : población, habitantes

A través de la práctica, se ha podido observar, que es mejor secar la laguna que intentar remover el lodo. Las tuberías de dragado se pueden emplear para el desazolve, pero esta operación es sucia e ineficiente. En ocasiones se llegan a usar cucharas de dragado en forma manual pero, también, con malos resultados. El lodo extraído conviene depositarlo en otra laguna anaerobia debido a que en un kilogramo de sólidos están contenidos en 99.5 kg de agua (Ouano, 1981).

Los modelos que se tienen para el diseño son del tipo empíricos y cinéticos

### 3.3.1. Métodos de diseño

#### 3.3.1.1 Métodos empíricos

Existen varias correlaciones para el diseño de las lagunas anaerobias, desarrolladas a partir de datos colectados de plantas en operación. Las tres primeras fueron desarrolladas por Kawai (Yáñez, 1993) con datos de lagunas en Brasil:

$$S_e = -14.4555 + 0.6876S_i \quad (39)$$

$$S_e = -86.0971 + 0.6543S_i + 3.3985T \quad (40)$$

$$S_e = -265.0576 + 0.7491S_i + 23.5258\tau \quad (41)$$

Estas ecuaciones están establecidas con altos coeficientes de correlación (0.98) pero corresponden a valores reportados en plantas cuyas eficiencias de operación oscilan entre 60 % y 70 % de remoción de la DBO.

Las ecuaciones 42 y 43 corresponden a los datos de operación de las lagunas de Al Samra (Yáñez, 1993) para lagunas anaerobias primarias (agua residual cruda) y secundarias (agua residual ya tratada), respectivamente.

$$S_e = -1326 + 7.4T + 3961C_v - 68\tau \quad (42)$$

$$S_e = -138 + 0.35T + 3494C_v + 32\tau \quad (43)$$

La Tabla 3.5 muestra los intervalos de las variables de proceso empleados en las lagunas de Al Samra.

**Tabla 3-5 Variables de las lagunas anaerobias primarias de Al Samra**

VARIABLES DEL PROCESO	UNIDAD	ECUACIÓN (41)		ECUACIÓN (42)	
		Intervalo	Promedio	Intervalo	Promedio
DBO influente (S <sub>i</sub> )	mg/l	629-826	726	213-440	321
DBO efluente (S <sub>e</sub> )	mg/l	213-440	321	198-323	258
Eficiencia de remoción de la DBO	%	32-71	56	8-41	19
Temperatura del agua (T)	°C	14.4-27	20	13.8-27.5	20
Carga volumétrica de DBO (C <sub>v</sub> )	kg /m <sup>3</sup> .día	0.091-0.153	0.117	0.029-0.078	0.05
Tiempo de retención (t)	días	4-7	5.7	4.7-8.0	6.7

FUENTE: Yáñez, 1993

La carga volumétrica puede ser calculada por la ecuación

$$C_v = \frac{S_i \cdot Q}{A \cdot h} = \frac{S_i}{\tau} \quad (44)$$

La ecuación 45 permite obtener el valor operacional (V<sub>E</sub>)

$$V_E = C_s Q / C_v \quad (45)$$

El área de la laguna se puede determinar por medio de la profundidad de la misma, la cual se encuentra entre 2 y 5 m. Pero el considerar este parámetro puede traer serias limitaciones por lo que se emplea el área a una profundidad media ( $A_{an}$ ) dada por:

$$A_{an} = V_E / h \quad (46)$$

donde:

$A_{an}$ : Área a la profundidad media de la laguna anaerobia,  $m^2$

Actualmente, debido a su pequeña área, las lagunas anaerobias se dimensionan por carga orgánica superficial. Las ecuaciones son similares a las de las lagunas facultativas e involucran cargas orgánicas superficiales del orden de 280 a 4,500 kg/ha.d. La experiencia Latinoamericana sugiere un tiempo de retención mínimo (tomando en cuenta la zona de almacenamiento de lodos) de 1 día.

El valor permisible de diseño de  $C_v$  se incrementa con la temperatura, pero existen pocos datos que permiten el desarrollo de una adecuada ecuación de diseño. No obstante, las recomendaciones generales de Mara y Pearson (1986 en CNA e IMTA, 1994), las cuales se muestran en la Tabla 3.6, pueden ser utilizadas para propósitos de diseño en México.

**Tabla 3.6 Valores de diseño para cargas volumétricas permisibles en función de la temperatura**

TEMPERATURA, °C	CARGA VOLUMETRICA g/m <sup>3</sup> .d	REMOCION DE DBO %
< 10	100	40
10-20	20T -100	2T + 20
> 20	300	60*

T temperatura del aire del mes más frío

\* Valores más altos pueden utilizarse si la experiencia local indica que es apropiado

FUENTE: CNA e IMTA, 1994

### 3.3.1.2 Métodos cinéticos

**Método Sudáfricano.**- Este método relaciona la carga orgánica que entra a la laguna con el tiempo de retención hidráulica mediante la siguiente ecuación.

$$S_e = \frac{S_i}{\left[ k \left( \frac{S_e}{S_i} \right)^m \cdot \tau \right] + 1} \quad (47)$$

donde:

$m$ : exponente determinado por experimentación

La Tabla 3.7 muestra los datos presentados por Gloyna en Zambia, Africa.

**Tabla 3.7 Remoción teórica de la  $dbo_5$  en lagunas anaerobias**

TIEMPO DE RETENCIÓN d	DBO <sub>5</sub> REMANENTE %	DBO <sub>5</sub> REMOVIDA %
0.12	80	20
0.40	70	30
0.71	65	35
1.30	60	40
2.40	55	45
4.70	50	50
9.40	45	55

\* Datos basados en un sistema mixto (fosas sépticas, laguna anaerobias, en Zambia, Africa), para  $m = 4.8$  y  $k = 6: d^{-1}$  a  $22^{\circ}C$   
FUENTE: Rolim, 1990

### 3.3.1.3 Valores recomendados

Dada la dificultad para establecer una tasa de remoción de DBO en las lagunas anaerobias, Mara en 1976 recomendó los valores: de eficiencia de remoción para diferentes tiempos de retención a temperaturas mayores de  $20^{\circ}C$  y con la eliminación de olores desagradables (Tabla 3.8).

**Tabla 3.8 Eficiencia de remoción del tratamiento del agua residual en lagunas anaerobias**

TIEMPO DE RETENCIÓN, d	$\eta$ DE REMOCIÓN, %
1	50
2.5	60
5.0	70

Por su parte Arceivala 1981 (en Thirumurti, 1991) indicó que para la India las lagunas anaerobias que se encuentran entre  $20$  a  $25^{\circ}C$  tendrán un tiempo de retención de 2.5 a 3 días con una reducción de la DBO del orden de 40% al 60%.

Para el noreste de Brasil, Silva (1982 en Rolim, 1990), verificó en campo que las lagunas anaerobias con periodos de retención entre 0.8 a 5 días a temperaturas de  $25$  a  $27^{\circ}C$ , tienen una remoción de DBO<sub>5</sub> de 70% a 80%. Rolim, 1990 considera que un tiempo de retención de 1 a 2 días para agua residual de origen doméstico con una reducción esperada de la DBO<sub>5</sub> del 60% al 70%.

Una recomendación tradicional es utilizar una carga orgánica volumétrica de 100 a  $400 g/m^3 \cdot día$  para el caso de lagunas anaerobias que tratan agua residual doméstica. Según Silva 1982 (en Rolim, 1990), para residuos domésticos, la carga orgánica volumétrica se aproxima a  $300 g/m^3 \cdot d$ , para el noreste de Brasil. Asimismo, este autor cita que Marais (Rolim, 1990) recomienda  $250 g/m^3 \cdot d$  para Africa del Sur. Cargas mayores como las de origen industrial, no deben contener una concentración de sulfatos mayor de 100 mg/l.

Para aplicar satisfactoriamente alguno de los métodos señalados para el diseño de este tipo de lagunas se estima que en México se tiene una temperatura promedio de 10 a 22 °C durante el invierno-otoño y > 26 °C en primavera-verano para el norte del país, 14 a 26 °C en la zona centro y para el sur la temperatura es > 26 °C durante todo el año.

La Tabla 3.9 muestra el resumen de los métodos observados para el diseño de las lagunas anaerobias.

### 3.4.LAGUNAS FACULTATIVAS

Las lagunas facultativas son las más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. También se les denomina lagunas de oxidación de agua residual doméstica o laguna fotosintéticas. El tiempo de retención hidráulica (t) varía de 5 a 30 días y la profundidad de 1.5 a 2 m, dependiendo de su localización geográfica, clima y del volumen requerido para almacenar el lodo sedimentado. Se recomienda mantener un bordo libre de 0.5 a 0.8 m para minimizar los efectos del viento y el oleaje así como absorber temporalmente sobrecargas hidráulicas (Figura 3.5).

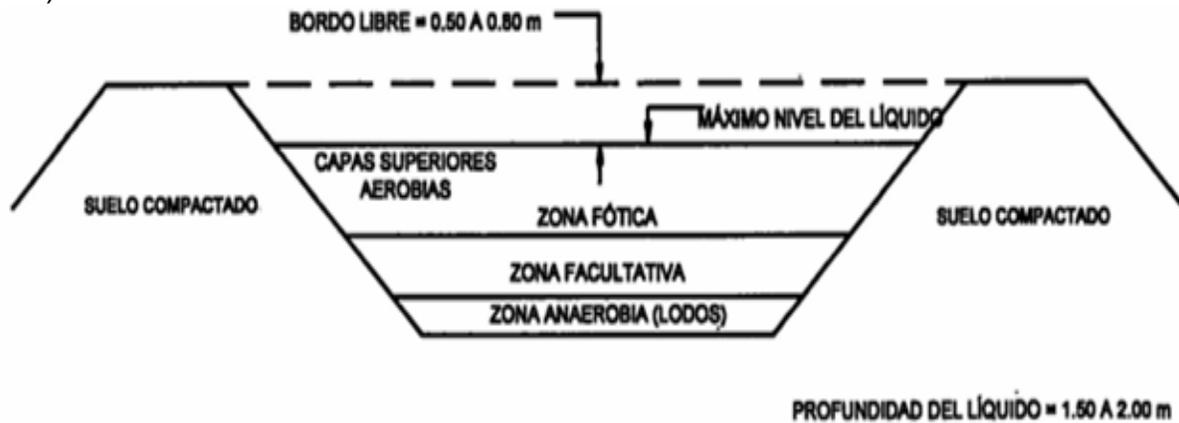
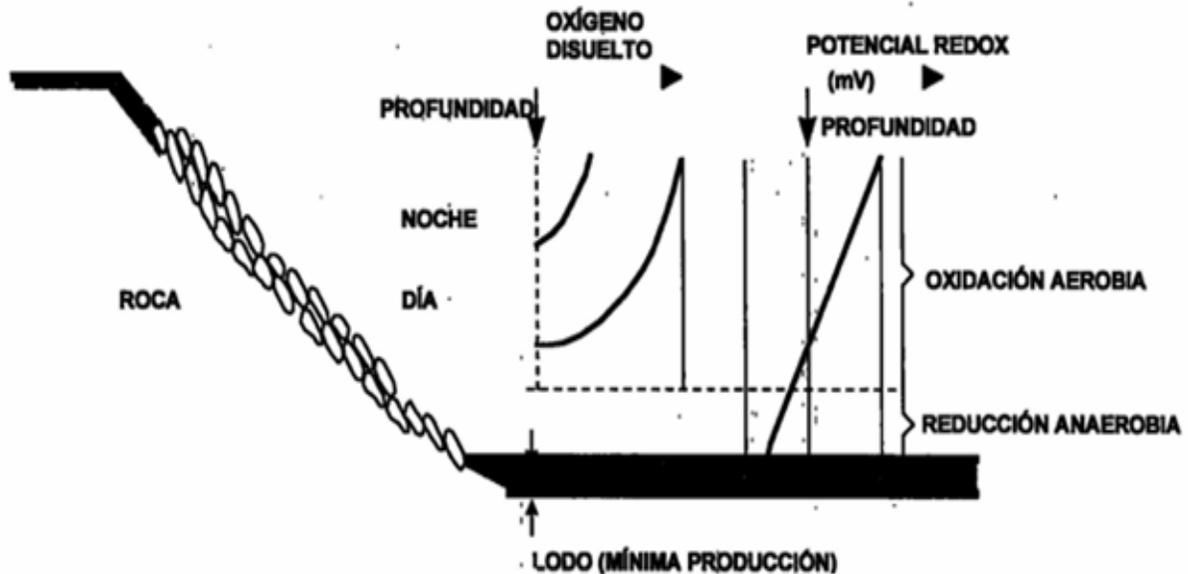


Figura 3.5 Laguna facultativa típica (sin escala)

**Tabla 3.9 Métodos de diseño para lagunas anaerobias**

MÉTODO DE DISEÑO	VARIABLES	ECUACIÓN	VALORES RECOMENDADOS
<b>Métodos empiricos</b>			
Kawai	$S_e, S_i, t, T$	$S_e = -14.4555 + 0.6876S_i$ $S_e = -86.0971 + 0.6543S_i + 3.3985T$ $S_e = -265.0576 + 0.7491S_i + 23.5258\tau$	
Yánez	$T, C_v, T$	<p>Lagunas primarias</p> $S_e = -1326 + 7.4T + 3961C_v - 68\tau$ <p>Lagunas secundarias</p> $S_e = -138 + 0.35T + 3494C_v + 32\tau$	No disponible pero puede emplearse la ec. de la carga volumétrica.
Carga volumétrica	$S_i, T$	$C_v = \frac{S_i \cdot Q}{A \cdot h} = \frac{S_i}{\tau}$	<p><math>C_v = 100- 400g /m^3</math> para agua residual doméstica</p> <p>Norte de Brasil : <math>C_v = 300 g/m^3</math></p> <p>Africa del Sur : <math>C_v=250 g/m^3</math></p> <p>Mara y Pearson (ver Tabla 3.6)</p>
<b>Métodos semi-empiricos</b>			
Método Sud Africano	$S_e, S_i, t$	$S_e = \frac{S_i}{\left[ k \left( \frac{S_e}{S_i} \right)^m + \tau \right] + 1}$ <p style="text-align: center;">o</p> $\tau = \frac{1}{k \left( \frac{S_e}{S_i} \right)^j} \cdot \left[ \frac{S_i}{S_e} - 1 \right]$	<p>No se dan valores recomendados pero otros autores proponen:</p> <p>Arceivala, 1981 : <math>k = 2.5</math> a <math>3.0 d^{-1}</math> a <math>20 - 25^\circ C</math></p> <p>Silva, 1982 : <math>k = 5d^{-1}</math> a <math>25 - 27^\circ C</math> con eficiencias del <math>70 - 80\% DBO_{removida}</math></p> <p>Rolim, 1990 : <math>k = 1 - 2d^{-1}</math> con eficiencias de <math>60 - 70\% DBO_{removida}</math></p> <p>USA : <math>Co = 280 - 4500 kg/ha.d</math></p> <p>Latinoamerica : <math>t = 1d</math></p>

El parámetro de diseño y de operación más importante de las lagunas facultativas es la producción de oxígeno. La principal fuente es la fotosíntesis de las algas y, la segunda, el aire atmosférico transferido por la acción del viento. El oxígeno es usado por las bacterias aerobias para la estabilización de la materia orgánica en la capa superior. Entre la capa aerobia y anaerobia, la concentración del oxígeno disuelto (OD) varía de la sobresaturación al medio, día a un nivel prácticamente no detectable durante las primeras horas de la madrugada. La Figura 3.6 muestra la fluctuación del OD en una laguna facultativa.



**Figura 3.6 Fluctuación de OD en una laguna facultativa**

Las lagunas facultativas pueden sobrecargarse orgánicamente, en este caso, opera como laguna anaerobia. El fenómeno de sobrecarga en una laguna facultativa se refleja en la inhibición del desarrollo de las microalgas por la presencia del sulfuro de hidrógeno, ácidos volátiles o un ambiente fuertemente reductor. La ausencia de luz debido al contenido de materia suspendida en el cuerpo de agua y la absorción de la radiación solar por las natas formadas (generalmente de color negro) fomentan la generación de sulfuro ferroso, limitando también la producción fotosintética de oxígeno. Una laguna así operada se encuentra propensa a un mal funcionamiento, generación de olores ofensivos, propagación de insectos y a una pobre eficiencia.

#### 3.4.1. Métodos de diseño

Diferentes modelos tanto empíricos como científicos han sido desarrollados para diseñar este tipo de lagunas. Cuatro son las aproximaciones usadas:

- empíricas,
- semi-empíricas,
- cinéticas y
- teóricas

Los modelos empiricos, se fundamentan en una colección y análisis de datos de plantas existentes como los de McGarry y Pescod, USEPA y Canter y Englande; los semi-empiricos se basan en la simplificación de conceptos teóricos de remoción de carga orgánica e hidráulica, ocasionalmente combinados con los resultados obtenidos en plantas piloto a nivel laboratorio (por ejemplo, Mara, Gloyna, Arthur y Yáñez); los modelos cinéticos emplean la teoría cinética de los reactores bioquímicos para tratamiento (Wehener-Wilhelm, completamente mezclado flujo pistón) y los teóricos interrelacionan la teoría cinética con parámetros como materia orgánica, fitoplancton, oxígeno disuelto, nutrientes y lodos (los modelos empleados son los de la relación del oxígeno fotosintético y el de Llavador y Prats). Estos métodos de diseño se presentarán atendiendo al factor principal de diseño.

### 3.4.1.1 Métodos empiricos y semi-empiricos

#### Carga orgánica

Básicamente, la carga orgánica crítica (superficial o volumétrica) para una laguna facultativa es el principal criterio de diseño de las lagunas de estabilización. Este valor debe ser determinado atendiendo a las condiciones climáticas que afectan a la laguna tales como la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, etc (Tabla 3.10).

**Tabla 3.10 Cargas orgánicas críticas, KG. DBO<sub>5</sub>/HA D**

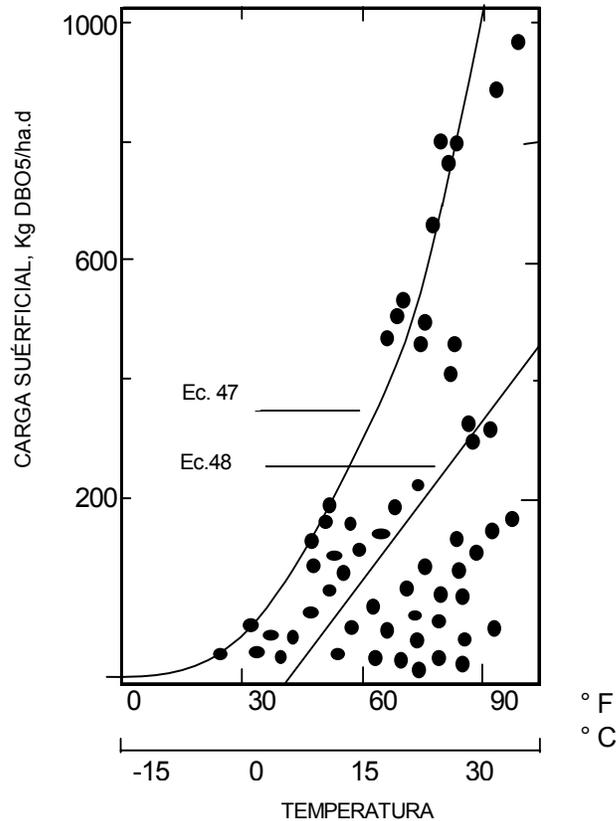
REGIÓN	C <sub>s</sub> , kg DBO <sub>5</sub> /ha.d
California	56-67
Norte de Israel	100- 120
Sur de Israel	120- 150
Climas subtropicales	80- 160
Climas tropicales	120-200
Climas templados	40-80
Para EUA en época invernal:	
Temperatura del aire mayor de 15° C	45-90
Temperatura aire entre 0 y 15° C	22-45
Temperatura del aire menor, de 0° C	11-22

FUENTE: Shelef y Kanarek, 1995

McGarry y Pescod 1970 (en Middlebrooks y Crites, 1988) colectaron los datos experimentales y operacionales de 134 plantas con sistema de lagunas a nivel mundial y les aplicaron un análisis, de regresión para determinar la eficiencia promedio de operación bajo diversas condiciones de, operación (C<sub>s</sub>, carga superficial, kgDBO/ha.d y T, temperatura del líquido, T). La ecuación 47 describe los resultados obtenidos y sugeridos por McGarry y Pescod para la carga superficial máxima.

$$C_s = 60.26(1.099)^T \quad (48)$$

La Figura 3.7 muestra el efecto de la temperatura en la carga superficial y el funcionamiento de las lagunas. No se emplearon los valores de dispersión dada la disparidad de los datos.



**Figura 3.7 Variación de la carga máxima admisible y de diseño en una laguna facultativa con temperaturá media del aire.**

En 1976, Mara propuso una forma más conservadora de la ecuación anterior

$$C_s = 40.35(1.099)^T \quad (49)$$

Finalmente, Pescod y McGarry establecieron un criterio aun más estricto que el de Mara, y determinaron que la carga máxima permisible en una laguna facultativa debe ser (Rolim, 1990)

$$C_{s \max} = 20T - 20 \quad (50)$$

A partir de la ecuación (50), Arthur (1983 en Rolim, 1990) la modificó de la siguiente manera

$$C_{s \max} = 20T - 60 \quad (51)$$

Posteriormente, Mara determinó que debía existir una ecuación para conocer la carga orgánica superficial en función de la parte del mundo donde se instale la laguna

$$\text{Europa mediterránea} \quad C_s = 10(T) \quad (52)$$

$$\text{Sudamérica} \quad C_s = 350(1.107 - 0.002(T))^{T-25} \quad (53)$$

Sin embargo, los datos de estudios llevados a cabo en lagunas piloto localizadas en Extrables, Universidad de Paraiba, Brasil, sugieren que a temperaturas del agua de 25 °C, las cargas orgánicas muy superiores a los 350 kg/ha.d reducen significativamente la población de algas y por consiguiente la producción de oxígeno, vital para el proceso de tratamiento. Por lo que se propuso la siguiente ecuación, la cual se aproxima con mayor precisión a las condiciones de México.

$$C_s = 250 \cdot (1.085)^{T-20}, \text{kg/ha} \cdot \text{d} \quad (54)$$

Asimismo, The Indian, Central Public Health Engineering Research Institute (ahora, National Environmental Engineering Research Institute, en Quano, 1981) propuso

$$C_s = 375 - 6.15LAT \quad (55)$$

donde: LAT son grados de latitud (intervalo en la India: 8 - 36 °N) que se relaciona con la temperatura.

Canter y Englande (1970, en Thirumurthi, 1991) estimaron mediante la aplicación de cuestionarios, los valores promedio usados en los estados más calurosos de los Estados Unidos. En la Tabla 3.11 se muestran los resultados de las diferentes regiones. Se observa que las lagunas en el norte de Estados Unidos permanecen cubiertas de hielo durante largos periodos, las de la región central por lapsos más cortos y las del sur, no tienen ese problema. Estas condiciones se semejan a las de México.

**Tabla 3.11 Resultados de los cuestionarios aplicados en estados unidos**

Variables	Valor dado por region		
	Norte	Centro	Sur
Número de estados	18	17	15
Cs (promedio), kgDB05/ha.d-	29	37	50
tiempo de retención hidráulico, d	117	82	31

FUENTE: Thirumurthi, 1991.

Con base en los resultados, de la Tabla 3.11, se propuso que la profundidad del líquido en las lagunas fuera de 1.2 m, con un bordo libre de 0.9 m, y el uso de lagunas múltiple para alcanzar mayor flexibilidad de operación y mantenimiento (Thirumurthi, 1991).

## Obtención del drea superficial de la laguna

En la India (Mara, 1976 en Rolim, 1990) el drea de la laguna facultativa es estimada con la siguiente ecuación

$$A = \frac{Q(S_i - S_e)}{0.30 \cdot S_e h (1.05)^{T-20}} \quad (56)$$

Además, se señala que la DBO<sub>5</sub> del efluente debe estar entre 50 a 70 mg/l (agua con carga orgánica débil) para mantener la laguna facultativa predominantemente aerobia. La profundidad de la laguna está comprendida entre 1.0 a 2.5 m.

En Rolim, 1990, se presentan diferentes criterios considerados por diversos autores conio, es el caso de, Arceivala quien estima que el tiempo de retención hidráulica varia de 7 a 110 días para temperaturas entre 5 ° y 25 °C . Para Silva, el tiempo, minimo para el noreste de Brasil es de 6 días mientras que para el Banco Mundial (Broome) de 5 días. De acuerdo con fos criterios anteriores se puede estimar el área de la laguna con:

$$A = \frac{Q \cdot \tau}{h} \quad (57)$$

Asimismo, existen varias correlaciones y datos desarrollados a través de experiencias de campo que tienen su aplicación básicamente para localidades con características similares al lugar donde se desarrollaron.

La primera relación de cargas de DBO fue reportada por McGarry y Pescod (1970 en Yáñez, 1993) durante sus estudios de 134 plantas operando, a nivel mundial para su aplicación en climas tropicales.

$$C_{sr} = 10.35 + 0.725 \cdot C_s \quad (58)$$

donde:

$C_{sr}$ : carga superficial de DBO removida en kg/ha.d, calculada a partir de  $S_i$ .

La correlación anterior es aplicable a zonas tropicales y templadas y, tiene un error estándar de  $\pm 16.4$  kgDBO/ha.d. Esta estimación es aplicable para intervalos de carga superficial entre 50 y 500.

El uso de este tipo de correlaciones permite estimar la calidad del efluente de las lagunas primarias, en función de la carga orgánica, parámetro que ha sido empleado y considerado como un factor importante de diseño (Yáñez, 1993). En las evaluaciones de las lagunas de San Juan realizadas en Perú, en dos distintas etapas se han determinado correlaciones similares de la form.a.

$$C_{sr} = A + B \cdot C_s \quad (59)$$

Los valores de los coeficientes A y B se muestran en la Tabla 3.12,

**Tabla 3.12 Coeficientes de correlaciones de carga de DBO**

TIPO DE LAGUNAS	COEFICIENTES		CORR %	No. OBS.	INTERVALO Kg/ha.d
	A	B			
Cuatro primarias <sup>a</sup>	7.67	0.806	99.6	71	200-1158
Una primaria <sup>b</sup>	-23.46	0.998	98.9	26	113 -364
Cinco primarias <sup>c</sup>	20.51	0.777	99.0	97	113 -1158
Cuatro primarias <sup>c</sup>	1.46	0.801	97.9	46	467-1158
Tres primarias <sup>c</sup>	0.75	0.906	85.7	15	251-335
4 primarias + 1 secundaria <sup>b</sup>	-7.81	0.819	99.8	139	42-1158
Una secundaria <sup>a</sup>	-0.80	0.765	98.6	63	42-248
Una secundaria <sup>b</sup>	-7.14	0.923	94.7	33	31- 14
Una terciaria <sup>b</sup>	-7.16	0.941	97.0	26	18- 90
Primaria + secundaria + terciaria <sup>b</sup>	-8.53	0.942	99.6	85	18- 466

a) Primera fase      b) Segunda fase      c) Primera y segunda fases  
FUENTE: Ydnez, 1993

Es importante notar que para el cálculo de las cargas, removidas, se consideraron pérdidas por infiltración. Además, durante el procesamiento de datos se calcularon las cargas aplicadas con base en la DBO total y las cargas del efluente con base en la DBO soluble. De igual forma se han desarrollado correlaciones de carga con base en datos de la DQO (para mayor detalle ver Yáñez, 1993).

### Obtención del volumen total de la laguna

La ecuación de Gloyna 1976 (en Thirumurti, 1991) es resultado de los estudios realizados por la Universidad de Texas, EUA a nivel laboratorio y que establece.

$$V = (3.5 \times 10^{-5}) Q S_u \theta^{35-T} f_T \cdot f' \quad (60)$$

donde:

- $S_u$ : DBO o DQO última del influente, mg/l
- $\theta$ : coeficiente de corrección por temperatura (1.085)
- $f_T$ : Factor de toxicidad de algas (1 para agua residual municipal e industrial)
- $f'$ : Factor de demanda de sulfuro de oxígeno (1 cuando la concentración de iones equivalentes de sulfato en el influente es < 500 mg/l)

La eficiencia de remoción de DBO se estima del orden del 80 a 90% sobre muestras del influente no filtrado y del efluente filtrado. La profundidad de la laguna es de 1 m en climas cálidos y de 1.5 a 2 m en fríos.

Con respecto a la temperatura de diseño, ésta corresponde al promedio aritmético de los meses más fríos. Es importante mencionar que la luz solar no se considera un factor crítico pero se puede considerar en el cálculo empleando un valor promedio de incidencia como se muestra en la ecuación 58 (Middlebrooks and Crites, 1988; Thirumurthi, 1991)

$$V = 0.035 \cdot Q \cdot (S_i) \cdot 1.099^{\frac{\text{luz}(35-T)}{250}} \quad (61)$$

donde:

*Luz*: radiación solar, langleys

### Valores estimados de k

De acuerdo con Yáñez 1980 (en Yáñez, 1993), uno de los principales problemas para el diseño de lagunas por los modelos de equilibrio continuo es el seleccionar la tasa de reacción global, k. Los valores reportados para esta constante varían desde 0.1 hasta mayores que 2. En general, empleando métodos similares se recomienda usar k grandes para tiempos de retención pequeños. El valor de k, experimental obtenida para, San Juan, Lima, Perú es

$$k = \frac{\tau}{-14.77 + 4.46 \cdot T} \quad (62)$$

El empleo de esta ecuación se recomienda para periodos de retención de 8 o más días para el cual k es  $0.38 \text{ d}^{-1}$ .

En 1984, Yáñez estableció una ecuación simplificada (Yáñez, 1993)

$$k = 0.796\tau^{-0.355} \cdot 1.085^{T-20} \quad (63)$$

#### 3.4.1.2 Métodos cinéticos

Modelo de Wehner-Wilhelm 1956 (en Thirumurti, 1991).- Thirumurti encontró que en las lagunas facultativas podrían seguir la ecuación desarrollada por Wehner-Wilhelm para el diseño de reactores químicos

$$\frac{S_e}{S_i} = \frac{4ae^{(1/2d)}}{(1+a)^2 e^{(a/2d)} - (1-a)^2 e^{(-a/2d)}} \quad (64)$$

donde:

$$a: (1 + 4k\tau d)^{1/2}$$

En esta ecuación el factor de dispersión para agua residual varía de 0.1 a 2.0, con pocos valores menores de 1.0. La selección tanto del valor de d como el de k afecta

en forma drástica el tiempo de retención requerido para producir un efluente de buena calidad (Middlebrooks, 1988 en Thirumurti, 1991). Para facilitar el uso de esta ecuación, Thirumurti desarrollo el gráfico de la Figura 3.8, en el que el término  $kt$  se traza contra  $S_e/S_i$  para factores de dispersión que varlan desde el cero para un reactor de flujo pistón hasta el infinito en un reactor completamente mezclado.

Modelo completamente mezclado (Metcalf y Eddy, 1991).- La ecuación de Marais y Shaw de 1991, se basa en un modelo de  $j$  reactores completamente mezclados en serie y con cinética de primer orden. La relación es

$$\frac{S_e}{S_i} = \left[ \frac{1}{1 + ktj} \right]^j \quad (65)$$

donde:

$k$ : Constante de reacción de primer orden,  $d^{-1}$

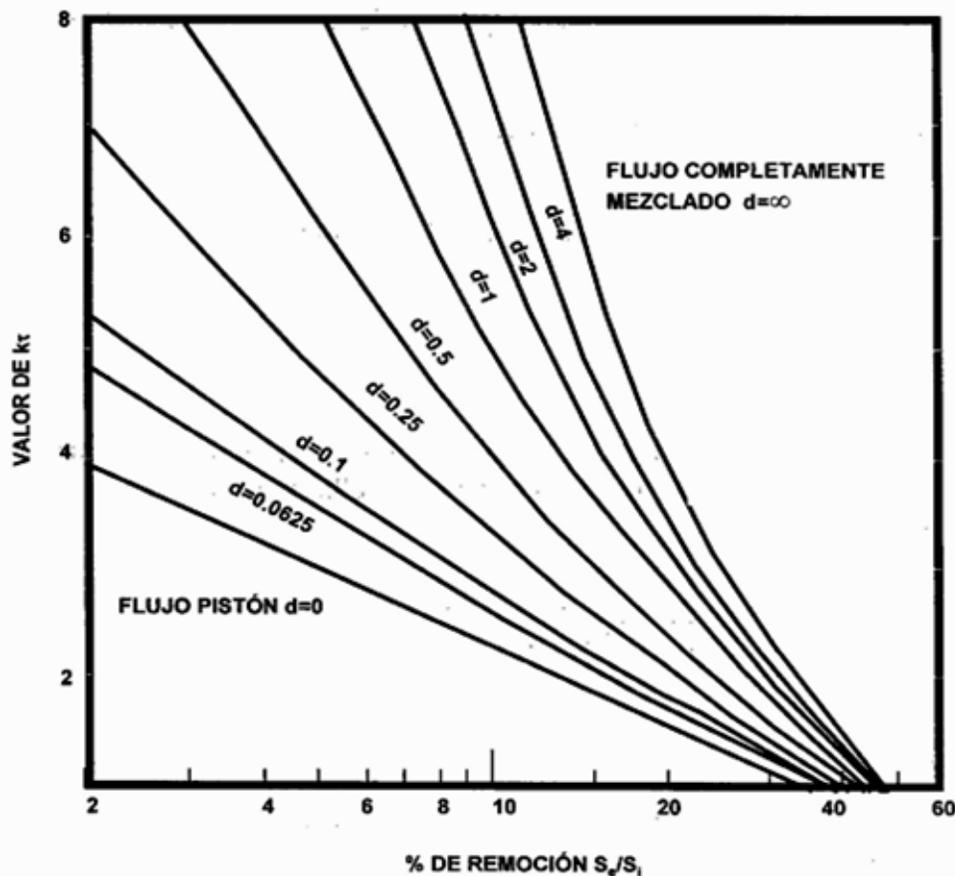


Figura 3.8 Valores de  $kt$  para la ec. De Wehner y Wilhelm contra la fracción remanente para varios factores de dispersión.

El valor de  $k$  debe ser corregido por temperatura si ésta difiere de  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El valor promedio, para la constante de Arrhenius se considera como de 1.085.

El límite superior propuesto para  $(S_e)_{\max}$  en celdas primarias es de 55 mg/l, para evitar condiciones anaerobias y malos olores. La profundidad permisible de la laguna está dada por  $h$  y se establece como:

$$h = \frac{700 / (S_e)_{\max} + 8}{0.6}, \text{ ft} \quad (66)$$

donde:

$(S_e)_{\max}$ : Concentración máxima de la DBO<sub>5</sub> en el efluente, mg/l

En 1970, Marais incorporó la influencia de la cama de lodos al modelo completamente mezclado. Este modelo permite determinar la influencia del lodo en las lagunas primarias a lo largo de la vida del proceso"

Modelo de flujo pistón (Middlebrooks y Crites, 1988). - La ecuación base para el modelo de flujo pistón es:

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{-k\tau} \quad (67)$$

donde:

$k$ : Rapidez de reacción de primer orden para un reactor de flujo pistón, d<sup>-1</sup>

La rapidez de reacción de primer orden  $k$  varía con la carga de la DBO como se muestra en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.13 Variación de la rapidez de reacción en un flujo pistón en función de carga orgánica**

CARGA ORGANICA, kg/ha.d	$k$ a 20°C, d <sup>-1</sup>
22	0.045
45	0.071
67	0.083
90	0.096
112	0.129

FUENTE: Middlebooks and Crites, 1988

### 3.4.1.3 Métodos teóricos

Estos modelos representan en forma matemática los procesos físicos y bioquímicos responsables de la degradación de la materia orgánica. Para emplearlos se debe evaluar la tasa de control de cada fenómeno y su efecto total, es, cuantificado sobre, la eficiencia global de operación del proceso. La reproducibilidad a gran escala de los modelos es difícil debido a que tanto las tasas como los mecanismos predominantes de remoción varían en cada punto de la laguna.

Relación del oxígeno fotosintético en la laguna facultativa. - Las algas, convierten, el 6 % de la energía solar en nuevas células. Por cada kilogramo de masa de algas, 6 millones de calorías de energía solar son requeridas para que se produzcan 1.6 kg de oxígeno por la fotosíntesis. La cantidad del oxígeno producido por día, en una hectárea, puede expresarse como

$$O_i = \frac{\lambda_s \cdot 0.06 \cdot 1.6 \times 10^8}{6 \times 10^6} = 1.6 \cdot \lambda_s \quad (68)$$

donde:

$O_i$ : cantidad de oxígeno liberada, kg/ha.d  
 $\lambda_s$ : energía solar, cal/cm<sup>2</sup> d

En la práctica, la India utiliza tasas de carga superficial de 150 a 250 kg DBO/ha.d mientras que en América se limitan los valores a 100 kg DBO/ha.d. Para cargas orgánicas bajas se tiene la sobresaturación en forma inmediata y el líquido es continuamente mezclado, siendo mayor la liberación de oxígeno hacia la atmósfera. En climas templados como el norte de la República Mexicana, las lagunas se deben diseñar considerando las condiciones de invierno cuando el metabolismo bacteriano y la fotosíntesis están a un nivel mínimo.

Para conocer la cantidad de oxígeno presente en el agua, se emplea la ecuación 69 modificada por el coeficiente  $\alpha$  (transferencia de oxígeno en el agua residual) cuyo valor varía en función de las condiciones de locales. Como ejemplo, para la India oscila entre 55 y 100 % y, para el Continente Americano se ha evaluado entre 27 y 36 %.

$$O_i = 1.6 \lambda_s \alpha \quad (69)$$

La cantidad de oxígeno máximo requerido ( $Q$ ) para estabilizar la carga orgánica es equivalente a la DBO última, la cual es cercana a 1.5 veces la DBO<sub>5</sub>

$$O_r = 1.5 \cdot Q \cdot S_i \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \quad (70)$$

Se debe tratar que  $O_i \geq O_r$

Al relacionar las ecuaciones 66 y 67 se tiene que

$$C_s = 1.07 \cdot \lambda_s \cdot \alpha \quad (71)$$

Para el valor de  $\lambda_s$ , se debe tener en cuenta que la radiación solar que incide en una laguna facultativa depende de la nubosidad, que puede reducir el número total de horas de radiación real comparada con el número de horas totales posibles. El promedio de radiación solar,  $\lambda_s$  se calcula como

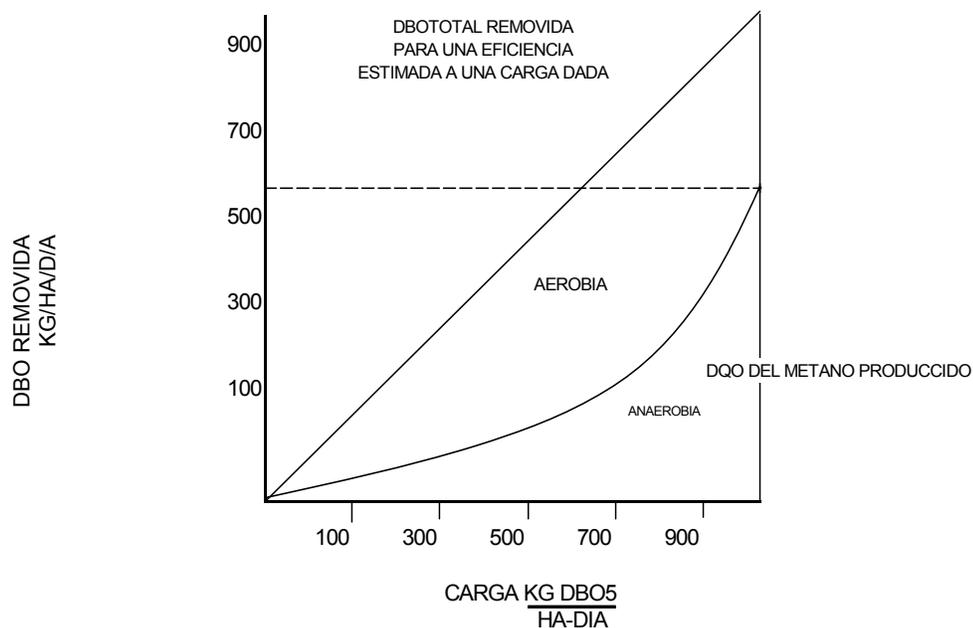
$$\lambda_s = \lambda_{\min} + p(\lambda_{\max} + \lambda_{\min}) \quad (72)$$

donde:

- p: fracción de horas de irradiación comparada con el número total de horas posibles.

Asimismo, debe recordarse que en este tipo de lagunas, se está llevando a cabo una reacción anaerobia y, por tanto los sólidos sedimentados, las algas y bacterias muertas son descompuestas en el fondo del tanque. La degradación anaerobia genera ácidos grasos volátiles, metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. El dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno son atrapados en una solución alcalina en las capas superiores formando carbonatos y sulfuros. El gas metano se libera a la atmósfera.

Siddiqui 1974 (en Ouano, 1981) en sus estudios sobre la generación del metano como subproducto de la capacidad de degradación de la materia orgánica encontró que para cargas orgánicas de 767 kg DBO/ha.d, la eficiencia de remoción de la DBO, es del 78 %, y que de ésta el 65 % se debe a la actividad anaerobia (Figura 3.9). Además, debido a las condiciones alcalinas de las capas superiores, los malos olores generados por los gases del sulfuro son atrapados. Para cargas orgánicas de 70 kg DBO/ha-d, la remoción de la DBO corresponde a una degradación aerobia.



**Figura 3.9 Fracción de la DBO removida anaerobiamente para diferentes cargas orgánicas. FUENTE: Ouano, 1981**

Modelo de Llavador y Prats (1993). - Consiste en una modificación al modelo de Fritz et al., donde se emplean estudios de estabilidad. Este modelo describe un sistema donde se interrelacionan doce componentes: sustrato orgánico (S), biomasa bacteriana

(Xb), biomasa de algas (Xa), oxígeno disuelto (OD), nitrógeno orgánico soluble (NO), nitrógeno amoniacal (NA), nitrógeno de nitratos (NN), fósforo orgánico soluble (FO), fósforo inorgánico (M), alcalinidad total (AT), masa sedimentada (D), para los cuales se establecen balances parciales de masa con base en la expresión de variación de velocidad de concentración

$$\frac{d[C]}{dt} = \frac{[C_i]}{\tau} - \frac{[C_j]_e}{\tau} + \sum S(j) \quad (73)$$

donde:

[C<sub>i</sub>]: concentración del componente i en el efluente, mg/l

[C<sub>j</sub>]: concentración del componente j en el influente, mg/l

∑S(j): suma de todos los mecanismos cinéticos que afectan a dicho componente.

Cada uno de estos mecanismos cinéticos se puede expresar en términos de la concentración de los diversos componentes en un reactor bioquímico empleando las constantes específicas. La combinación de las doce ecuaciones obtenidas del balance de masa se resuelve mediante la generación de un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden donde las concentraciones de cada compuesto varían a través del tiempo.

En general, el modelo permite determinar las constantes o parámetros que generan condiciones de inestabilidad importantes como son el tiempo de retención y la carga orgánica. Sin embargo, la aplicación práctica de este modelo es limitada debido a que muchas de las constantes deben ser predeterminadas en laboratorio. Su utilidad principal radica en la comprensión de los mecanismos que intervienen en la operación de las lagunas.

La Tabla 3.14 muestra el resumen de los métodos revisados para el diseño de las lagunas facultativas.

### 3.5.EFECTO DE LA TEMPERATURA-ECUACIÓN DE ARRHENIUS

La variable con mayor influencia en la selección de un modelo para diseño de cualquier tipo de laguna es el efecto de la temperatura en la operación del proceso. El efecto en la actividad biológica está dado por la ecuación

$$k = k_{20^{\circ}c} \theta \cdot (T - 20) \quad (74)$$



**Tabla 3.14 Métodos de diseño para lagunas facultativas (continuación)**

MÉTODOS	VARIABLES	ECUACIÓN	VALORES RECOMENDADOS
Middlebrooks y Crites, 1988	S <sub>i</sub> , T, Luz	$V = 0.035 \cdot Q \cdot (S_i) \cdot 1.099^{\frac{luz(35-T)}{250}}$	
Constante de rapidez de 1 <sup>er</sup> Orden			
Yáñez, 1980	T, k	$k = \frac{\tau}{-14.77 + 4.46 \cdot T}$	k 0.38d <sup>-1</sup> Para τ de 8 o más d
Yáñez, 1984	t, k	$k = 0.796\tau^{-0.355} \bullet 1.085^{T-26}$	No Disponible
MÉTOS CINÉTICOS			
Modelo de Wehner-Wilhelm, 1956	k, t	$\frac{S_e}{S_i} = \frac{4ae^{(1/2d)}}{(1+a)^2 e^{(a/2d)} - (1-a)^2 e^{(-a/2d)}}$	d : 0.1 a 2.0
Modelo completamente mezclado, 1961	k <sub>c</sub> , t	$\frac{S_e}{S_i} = \left[ \frac{1}{1 + k\tau j} \right]^j$ o $h = \frac{700 / (S_e)_{\max} + 8}{0.6}$	Se puede emplear la ecuación de Yáñez (1984)  (S <sub>e</sub> )= 55 mg/l
Modelo de flujo pistón (Middlebrooks y Crites, 1988)	K <sub>p</sub> , c	$\frac{S_e}{S_i} = e^{-\tau k}$	ver Tabla 3.11 para valores de K <sub>p</sub> , t
MÉTODOS TEÓRICOS			
Relación del oxígeno fotosintético en la laguna facultativa			
Modelo de Llavador y Prats (1993)			

La ecuación 71 por lo común se aplica a, un intervalo de 4 a 30 °C. Este intervalo se define para una actividad mesofílica. Para los diversos tipos de modelos donde se emplee la corrección por temperatura se considerará un valor promedio para  $\theta$  de 1.085.

### 3.6.COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS

De acuerdo con Middlebrooks (1988), la comparación entre los diversos modelos permite realizar una primera selección cualitativa del método, idóneo para una situación en particular. Pero las limitaciones y exigencias de los propios modelos hacen difícil esta comparación. Sin embargo, se puede decir que para una retención con condiciones climáticas adecuadas todos los modelos son equivalentes y, lo más práctico resulta emplear la carga orgánica aplicada en combinación con un tiempo de retención adecuado. Únicamente se deben considerar en forma adicional y particular, los problemas asociados a la generación de áreas muertas y cortos circuitos ya que abaten la eficiencia del tratamiento, así como algunos efectos de compuestos tóxicos. En otras palabras, la importancia del diseño hidráulico no debe ser menospreciado.

En cuanto a los modelos tradicionales de reactores bioquímicos (ej. Wehner-Wilhelm y los modelos completamente mezclado y de flujo pistón) que combinan la cinética en el sentido de introducir el tiempo necesario del proceso con los patrones de flujo, estos tienen la gran limitación de que hay que suponer antes de construir la laguna, una serie de parámetros, que en realidad son resultado del diseño. En especial:

↳ Aun cuando en laboratorio se haya determinado el tiempo de retención,  $t$ , éste se emplea como equivalente a,  $\tau$  (tiempo teórico), que en la práctica no se conoce hasta obtener  $\tau_c$ . De hecho la única forma de verificar que  $t = \tau$  es llevando a cabo un estudio de trazado una vez construida la laguna.

Por último, los modelos teóricos (ej. Quin et al., 1991) requieren muchas determinaciones a nivel laboratorio que sólo se aproximan en forma vaga a lo que sucede en la laguna debido al gran tamaño y complejidad ecológica de éstas. De ellos, es relevante que el diseñador tenga claro las recomendaciones prácticas que resultan de comprender los fenómenos como la insolación, el papel que juegan las algas, etc.

La Tabla 3.15 muestra un resumen general de los modelos para el diseño de lagunas con base en el tiempo de retención, la profundidad y la carga orgánica superficial. o volumétrica.

**Tabla 3.15 Resumen de los diferentes modelos empleados para el diseño de los diversos tipos de lagunas de estabilización**

Laguna	Tiempo de Retención $\tau$ , d	Carga orgánica		Profundidad m	Tamaño de la laguna ha	Mezclado	% de remoción de la DBO <sub>5</sub>
		Superficial kgDBO/ha.d	Volumétrica gDBO/m <sup>3</sup> d				
Aerobia							
Baja tasa	10-40	67- 135		0.90- 1.20	< 4 por celda	Mezclado	80-95
						natural	
Alta tasa	4-6	90- 180		0.30-0.45	0.20-0.80	Equipo	80-95
						adicional	
Pulimento	5-20	17		0M - 1.50	0.80 - 4.0 por celda	Mezclado Natural	
Aeradas							
Con mezcla							
Completa	3-20			2.0-6.0		Equipo	50-60
						Adicional	
Con mezcla	3- 10			12.0-6.0	0.80	Equipo	70-90
Parcial						adicional	
Anaerobias	1 - 5	280-4500	100-400	12.0-5.0	0.20-0.80 por celda	Sin mezclado	60-70
Facultativas	5 - 30	40 - 200*10:- 40		1.5 - 2.0	0.80 - 4.0 por celda	Mezclado superficial	80-90
	31 - 117	29- 50		1.20			
		150 – 250*					
		100*					

\* Valores empleados de climas subtropicales, tropicales y templados

Valores empleados en la India

Valores empleados en America

ADAPTADO: Metcalf y Eddy, 1991 y de la síntesis de los modelos vistos.

### 3.7.SISTEMAS COMBINADOS

Los sistemas lagunares múltiples e integrados forman un tratamiento más económico y seguro que los sistemas convencionales y se diseñan de la misma forma que los sistemas individuales.

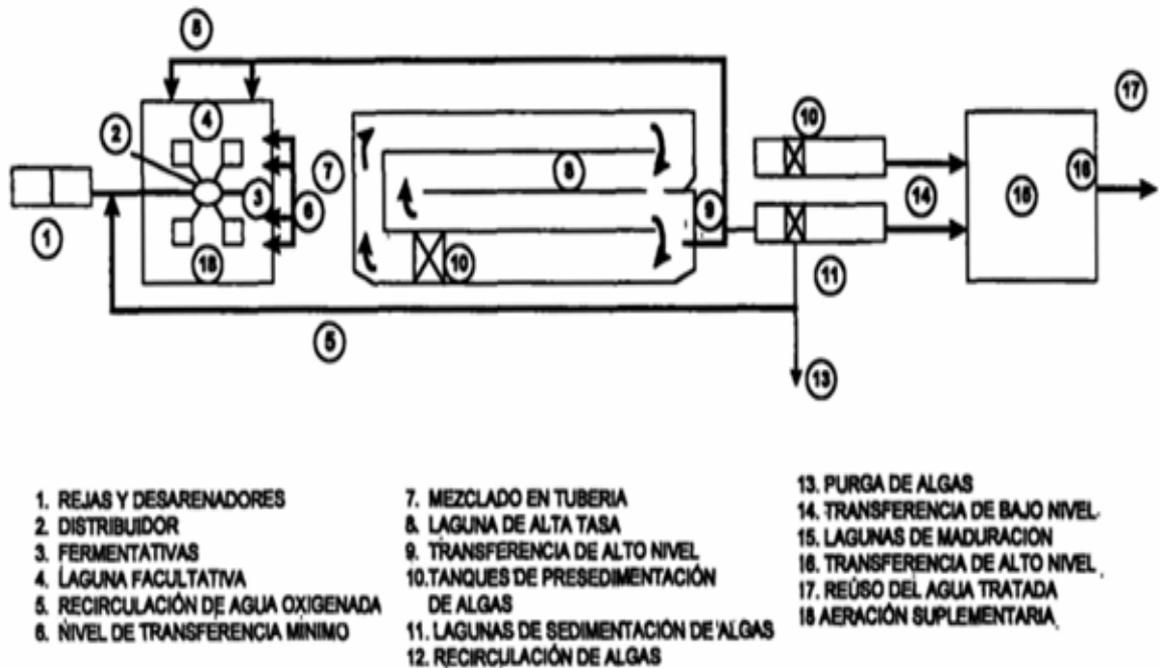
Se pueden establecer distintas combinaciones de los tipos de lagunas en función de las características del agua a tratar, de las exigencias del efluente y de la disponibilidad de terreno, básicamente,. Para agua residual de origen doméstico o equivalente, los sistemas más adecuados son:

- a)           Facultativa + Aerobia
- b)           Facultativa + Facultativa + Aerobia
- c)           Anaerobia + Facultativa + Aerobia
- d)           Anaerobia + Facultativa + Maduración
- e)           Facultativa + Facultativa + Maduración

El establecimiento de líneas en paralelo es interesante en el caso de que exista fuerte estacionalidad y es útil en las lagunas primarias para evitar problemas de funcionamiento, facilitar el secado y la limpieza de lodos.

Los sistemas en serie se aceptan cuando se tiene disponibilidad de terreno y cuando, a partir de un balance económico, se obtiene un volumen mínimo total. En general, en la primera laguna el volumen es minimizado para mantener la temperatura, la concentración de sólidos y la tasa de reacción de la DBO en niveles altos. La segunda, generalmente facultativa, tiene bajo requerimiento energético que permite la sedimentación de los sólidos y su descomposición en el fondo (Figura 3.10). Para la remoción de coliformes fecales se emplean lagunas de maduración al final. Asimismo, cuando se desea una baja concentración de sólidos suspendidos en el efluente se emplea un tanque de sedimentación el cual debe cumplir con los siguientes objetivos:

- ☐ Un tiempo de retención suficiente para alcanzar la remoción deseada
- ☐ Volumen adecuado para el almacenamiento del lodo
- ☐ Crecimiento mínimo de algas
- ☐ Olores mínimos por la actividad anaerobia.



**Figura 3.10 Sistema lagunar integrado para el tratamiento del agua residual y agua aerada, recuperación de nutrientes o reúso (Oswald, 1991)**

### 3.8. SISTEMAS CON RECIRCULACIÓN

La introducción de la recirculación de una laguna posterior a otra tiene varias ventajas como:

- Disminuir los requerimientos de tierra.
- Evitar la generación de olores.
- Controlar las variaciones estacionales.
- Incrementar en tres veces o más de la carga orgánica crítica, comparado con la carga permisible en una laguna facultativa.
- Mantener las condiciones aerobias en la entrada de la primer laguna, para eliminar olores generados.
- Distribuir la biomasa activa en la primer laguna
- Romper la estratificación térmica, la cual reduce el funcionamiento, de la laguna (Marais, 1970, en Shelef y Kanarek, 1995)
- Incrementar la estabilidad y pocos cambios en las variaciones estacionales que afectan directamente la operación así como para las cargas orgánicas.
- Incrementar la capa de lodo sedimentado en todo el fondo de la laguna. Esta ventaja es marcada principalmente cuando se realiza la alimentación.
- Reducir los costos energéticos y de inversiones de equipo en general (bombeo y tubería), así como de una fuente de poder.

El manejo de la recirculación se dio simultáneamente, pero en forma independiente, en Nueva Zelanda y el Sur de Africa (Shelef y Kanarek, 1995) con el propósito de permitir el tratamiento de altas cargas orgánicas en la primer laguna en un sistema en serie, sin la generación de malos olores ni molestias por vectores. En ambos países su implantación permitió tratar efluentes industriales, con grandes variaciones de, carga mejorando la operación de los sistemas de tratamiento. En la Figura 3.11, sección A, se muestra la introducción de parte del efluente de la última laguna facultativa en serie en la primera laguna.

Aplicando la recirculación junto con la etapa de alimentación del sistema (Figura 3.11 sección B) y alimentando un porcentaje del flujo de entrada en la tercera laguna, se obtiene una gran mejora cuando se doblan las cargas orgánicas. En 1977, Shelef (en Shelef y Kanarek, 1995) reportó que la relación de recirculación óptima se encuentra entre 1.5 y 2.5, la cual cambia de acuerdo con las condiciones climáticas y la carga orgánica aplicada. La Figura 3.11 sección C, muestra la aplicación más reciente de un sistema en serie con recirculación el cual fue instalado en Maracafflo, Venezuela en 1992.

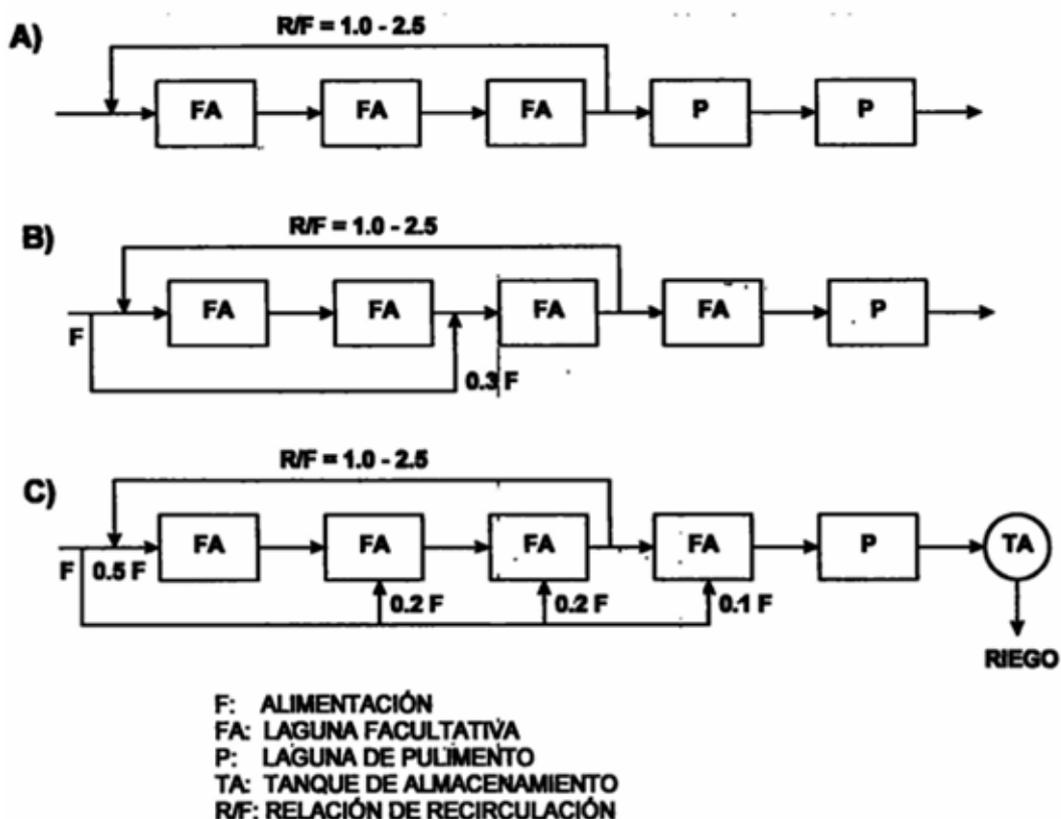


Figura 3.11 Esquemas de flujo de lagunas de estabilización con recirculación

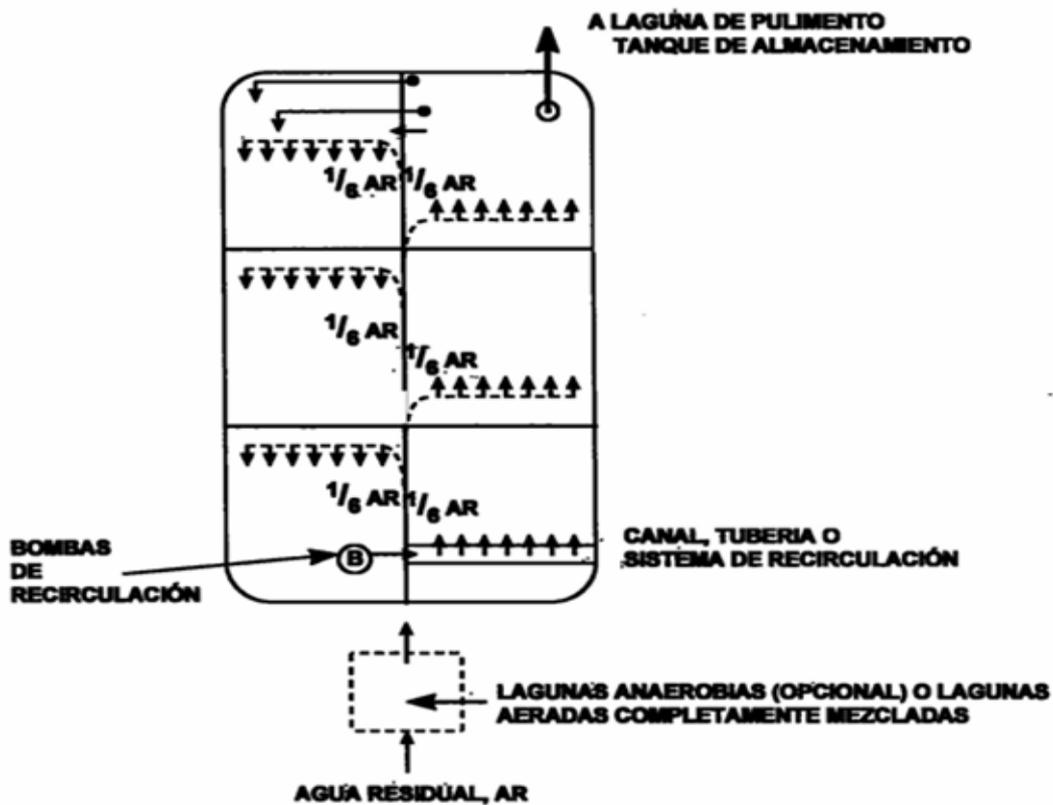
La Tabla 3.16 muestra las cargas orgánicas recomendadas para la primera laguna, cuando se aplica recirculación.

**Tabla 3.16 Cargas orgánicas permisibles en la primerlaguna cuando se aplica la recirculación**

Región Dan, Israel	Relación de Recirculación (R/F)	Carga orgánica, kg DBO <sub>5</sub> /ha-día
Primavera	2.0	600
Primavera	1.0	450
Verano	2.0	400
Verano	1.5	350
Verano	1.0	280

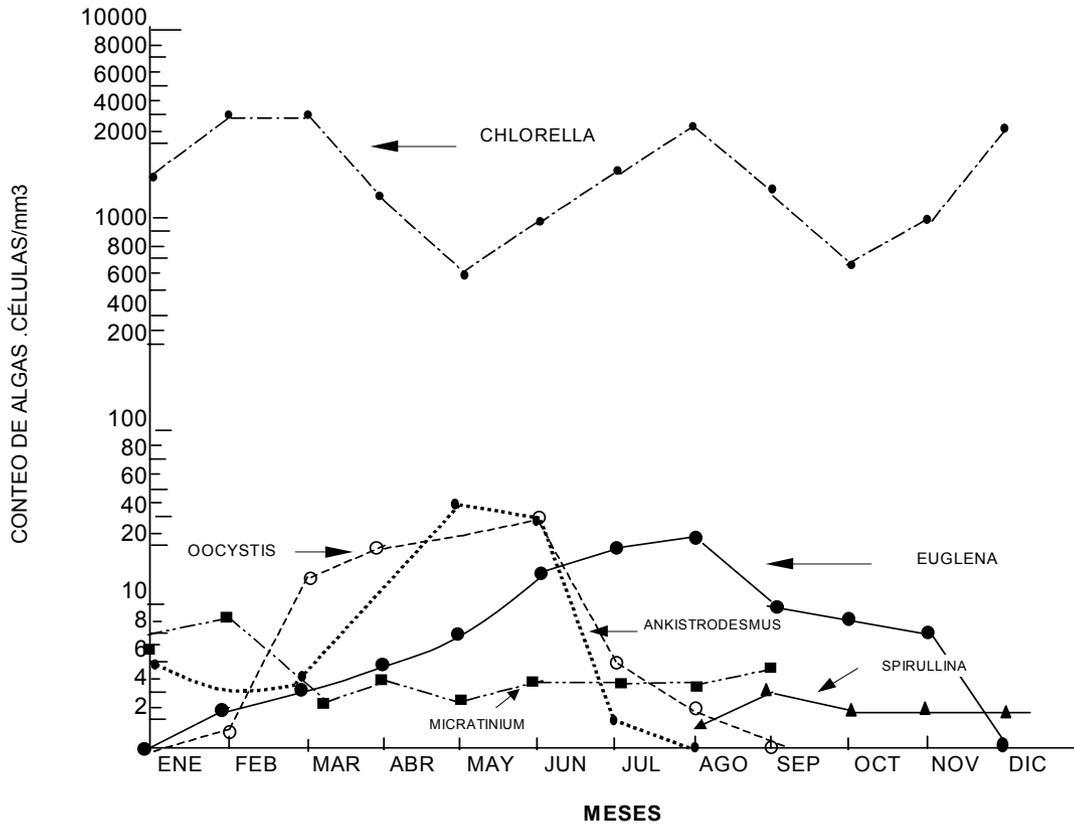
FUENTE: Shelef y Kanarek, 1995

Para maximizar las ventajas de la recirculación, una forma de alimentación en las lagunas facultativas se muestra en la Figura 3.12 (diseño introducido por Shelef en 1993). Con una relación de recirculación: de 1.5 a 2.0, cargag orgánicas en función del área total de las lagunas (seis lagunas) alcanza valores de 400 a 600 kg DBO<sub>5</sub>/ha.d en regiones subtropicales. Este sistema conocido como SFFPR tiene una excelente relación costo efectivo/eficiencia.



**Figura 3.12 Etapas de alimentación de las lagunas facultativas con recirculación (SFFPR).**

La Figura 3.13 ilustra las variaciones estacionales de la cantidad de algas en las lagunas de la región Dan, Israel, con recirculación. Existe una estabilidad estacional pese a las variaciones de temperatura (de 8.8 hasta, 30.2 °C) y de la radiación solar, donde el verano es completamente seco y algunas lluvias concentradas entre diciembre y marzo (aproximadamente 550 mm/año). Como se puede observar, la *Chlorella* es el alga predominante en todas las estaciones.



**Figura 3.13** Conteo de algas a través del año en las lagunas de estabilización con recirculación (R/F = 1.5) de la Región Dan.

El efluente de las lagunas de estabilización con recirculación obviamente es rico en algas como es de esperarse de un sistema saludable. La  $DBO_5$  disuelta es por lo común menor de 10 mg/l, pero la concentración de la materia suspendida puede llegar a alcanzar 200 mg/l o más, asociado con una  $DBO_5$  total de 60 a 120 mg/l. Las lagunas de maduración o pulimento secuencial y/o almacenamiento son esenciales para obtener una alta calidad del efluente ya que estos sistemas remueven algas por sedimentación y por la actividad de los organismos herbívoros. En la Región Dan en Israel, el efluente de la laguna es dispuesto en dunas cercanas, recargando el acuífero de manera que el agua tratada es recuperada y bombeada para riego agrícola al Sur de Israel (Shelef, 1993b en Shelef y Kanarex, 1995). Idelovitch y Michail (1985 en Shelef y Kanarex, 1995) encontraron que el paso del efluente final de un sistema de lagunas en serie a través de un suelo arenoso provee una excelente etapa de pulimento obteniendo una calidad del agua compatible con el consumo humano.

## 4.ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

En este capítulo se describen las recomendaciones para construir lagunas de tratamiento de aguas residuales así como las características de los sistemas de pretratamiento que utilizan.

### 4.1.TRATAMIENTO PRELIMINAR

El pretratamiento del agua cruda no es indispensable para este tipo de sistemas. Sin embargo, es deseable contar por lo menos con mecanismos para remover sólidos flotantes grandes y arenas.

#### 4.1.1.Rejillas

En general, las rejillas son dispositivos formados por barras metálicas paralelas del mismo espesor e igual espaciamiento. Sirven para:

- Proteger las bombas, registros, tuberías, piezas especiales, etc., de taponamientos y abrasión.
- Evitar la acumulación de basura en las lagunas.

El espacio útil entre barras es función del tipo de material que se emplea y los equipos a proteger. La Tabla 4.1 muestra las aberturas más empleados y su aplicabilidad.

**Tabla 4.1 Tamaño de la abertura de las rejillas en función de su uso**

ABERTURA	USO
51 a 153	Protección de las bombas de agua residual y del desarenador
19 a 51	Protección del proceso

ADAPTADO DE: WPCF, 1997

Para el dimensionamiento de las rejillas se debe escoger además del espaciamiento la forma tamaño y tipo de barras. También, se debe considerar la sección de aproximación para obtener velocidades del agua que no permitan el paso del material retenido, o bien, que no formen depósitos de arena en el fondo del canal. Las velocidades recomendadas a través de las barras limpias son:

- velocidad mínima: 0.30 m/s
- velocidad máxima: 1.00 m/s

Estos valores deben cumplirse para los gastos mínimo y máximo.

Una vez especificados, la sección transversal y el espaciamiento de las barras, las rejillas se calculan con el largo del canal a la altura de la lámina del agua establecida por el nivel de las unidades subsecuentes y por la pérdida de carga.

Asimismo, se establece que el área del canal,  $A_s$ , sea la misma que las áreas ocupadas por las barras más el área útil de los espaciamientos. El área transversal se calcula mediante

$$A_s = Au \frac{a + e}{a} \quad (75)$$

donde:

- $A_s$ : área del canal,  $m^2$
- $A_u$ : área entre barras,  $m^2$
- $a$ : espaciamiento entre barras, m
- $e$ : espesor de la barra, m

De acuerdo con la forma de limpieza en manual o mecánica las rejas se clasifican

- ⇒ Reja de limpieza manual. Las rejas sencillas de limpieza manual (Figura 4.1) están formadas por barras de acero, de sección cilíndrica o rectangular. Estas rejas pueden ser verticales aunque con frecuencia se encuentran inclinadas (con ángulos de  $60^\circ$  a  $80^\circ$  sobre la horizontal) para facilitar su empleo. Este tipo de rejas es el más común para sistemas lagunares, pequeños. La limpieza manual de la rejilla es desagradable, y esto es el motivo principal de su mal funcionamiento.
- ⇒ Reja mecánica. Las rejas mecánicas (Figura 4.2), por el medio agresivo al que son sometidas, exigen un mantenimiento cuidadoso, siendo consideradas sólo en instalablones que justifiquen su empleo, como el alto volumen de tratamiento, la gran cantidad de material que tapone la reja en tiempos cortos y dinero suficiente para comprarlas y operarlas. Las rejillas con limpieza mecánica se clasifican a su vez por la posición del sistema de limpieza en:
  - Limpieza frontal, con un ángulo de  $80^\circ$  sobre la horizontal. Las rejas pueden ser curvas o verticales. Las primeras se adaptan perfectamente a instalaciones profundas, pueden tratar de 3 a, 1400 Us. Las segundas pueden tener diferentes dispositivos como el empleo de cadenas sin fin para la remoción final, por lo general tratan de  $2.7 \times 10^{-2}$  a 11000 L/s.

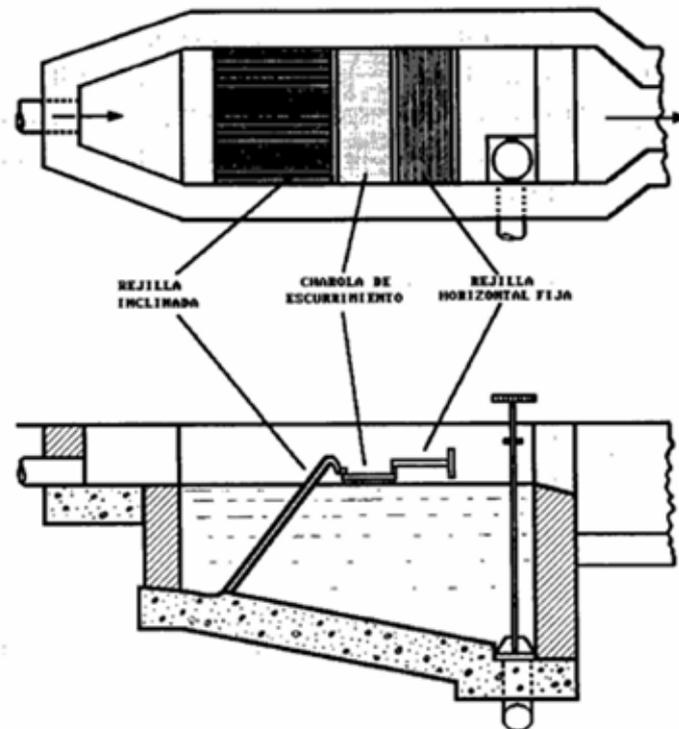


Figura 4.1 Rejas de limpieza manual

- Limpieza trasera, generalmente vertical y que están equipadas con peines montados sobre cadenas sin fin. Pueden tratar entre 140 y 8.5 l/s. con funcionamiento discontinuo ya que el dispositivo de limpieza actda por medio de indicadores de pérdida de presión.

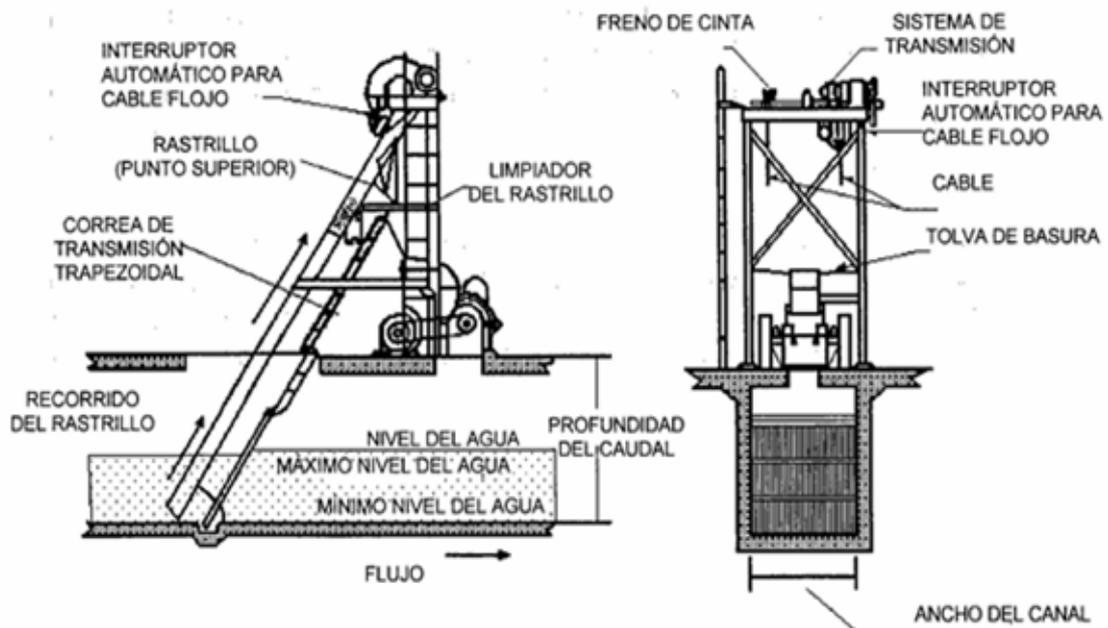


Figura 4.2 Sección transversal y vista de una rejilla con limpieza mecánica

La cantidad de material retenido por las rejillas varia entre 0.010: a 0.25 l/m<sup>3</sup>, de acuerdo con las condiciones locales, hábitos de la población, época del año y sobretodo, de la abertura de las rejillas. La Tabla 4.2 presenta la variación de la cantidad de material retenido en relación con la abertura de las rejillas.

**Tabla 4.2 Variación de la cantidad de material retenido en función de la abertura de la reja**

ABERTURA DE LA REJA, cm	MATERIAL RETENIDO, l/m <sup>3</sup>
2.0	0.038
2.5	0.023
3.5	0.012
4.0	0.009

FUENTE: WPCF, 1977

El material retenido esta constituido principalmente de papel, trapos, desechos de cocina y material introducido a la red a través de pozos de visita. Su composición física es del orden de 70 a 90 % de agua, pesando 0.70 a 1.0 kg/l.

En pequeñas instalaciones donde la limpieza es manual, se recurre al hacinamiento e incineración del material retenido. En instalaciones mayores, donde el material es retirado mecánicamente se incinera, digiere, tritura o es manejado como residuo no peligroso en el sistema local de disposición de sólidos.

#### 4.1.2. Desarenadores

Los desarenadores son tanques que evitan la decantación de arena en las lagunas primarias cerca de la entrada. Proidgen al equipo mecánico de la abrasión y el desgaste; reduce la obstrucción de los conductos causada por la deposición de partículas en las tuberías o canales, generalmente en los cambios de dirección y reducen la acumulación de material inerte en los estanques, lo que da lugar a pérdidas en el volumen. Cuando los sistemas son grandes (> 110 l/s) o cuando el agua residual contienen una gran cantidad de arena, los desarenadores son siempre requeridos.

El material retenido en los desarenadores se caracteriza por ser teóricamente inorgánico y tener una velocidad de sedimentación mayor que la correspondiente a la materia orgánica biodegradable. Los materiales que caen en esta categoría son partículas de arena, grava, de minerales, y orgánicos no putrescibles fácilmente, como semillas. En general, retienen los materiales en suspensión cuya granulometría sea mayor de 0.2 mm, o bien, materiales específicos y orgánicos fácilmente decantables.

Como la principal consideración que se debe tener es la protección del equipo, es deseable instalar los desarenadores antes de las bombas de agua residual. Pero, en muchas ocasiones el sistema de alcantarillado es tan profundo que situar el desarenador antes del bombeo no es posible. La instalación conjunta de las rejillas y los desadrenadores facilita la, eliminación de arena y su limpieza. Las

ventajas y desventajas de, instalar los desarenadores en diferentes lugares dentro de la planta de tratamiento se muestran en la Tabla 4.3:

**Tabla 4.3 Diferentes sitios para la instalcion dedesarenadores**

LOCALIZACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Antes de la estación de bombeo.	Máxima protección para el equipo de bombeo.	Cuando se tiene una gran Profundidad, los costos de Construcción son muy elevados; el acceso es difícil y la remoción de arena no es buena.
Después de la estación de bombeo.	Accesible y fácil de operar.	Algunas bornbas sufren desgaste.

ADAPTADO DE: Metcalf & Eddy, 1990.

La elección del tipo de desarenador se hace con base en la pérdida de carga, requerimientos de espacio, topografía, tipo de equipo utilizado en la planta y consideraciones económicas. En general, estas unidades se dividen en tres tipos:

- ↗ Controladores de velocidad,
- ↗ Aerados, y
- ↗ Sedimentadores de nivel constante.

Los más empleados para lagunas son los primeros con mantenimiento manual.

#### 4.1.2.1 Desarenadores con control de velocidad

Estos desarenadores tienen como base la sedimentación diferencial, la cual es un mecanismo seguro para separar la materia orgánica (que sedimenta como flóculos) de la arena. Esta última tiene una gravedad específica entre 1.5 a 2.7, mientras que la de la materia orgánica es de 1.02.

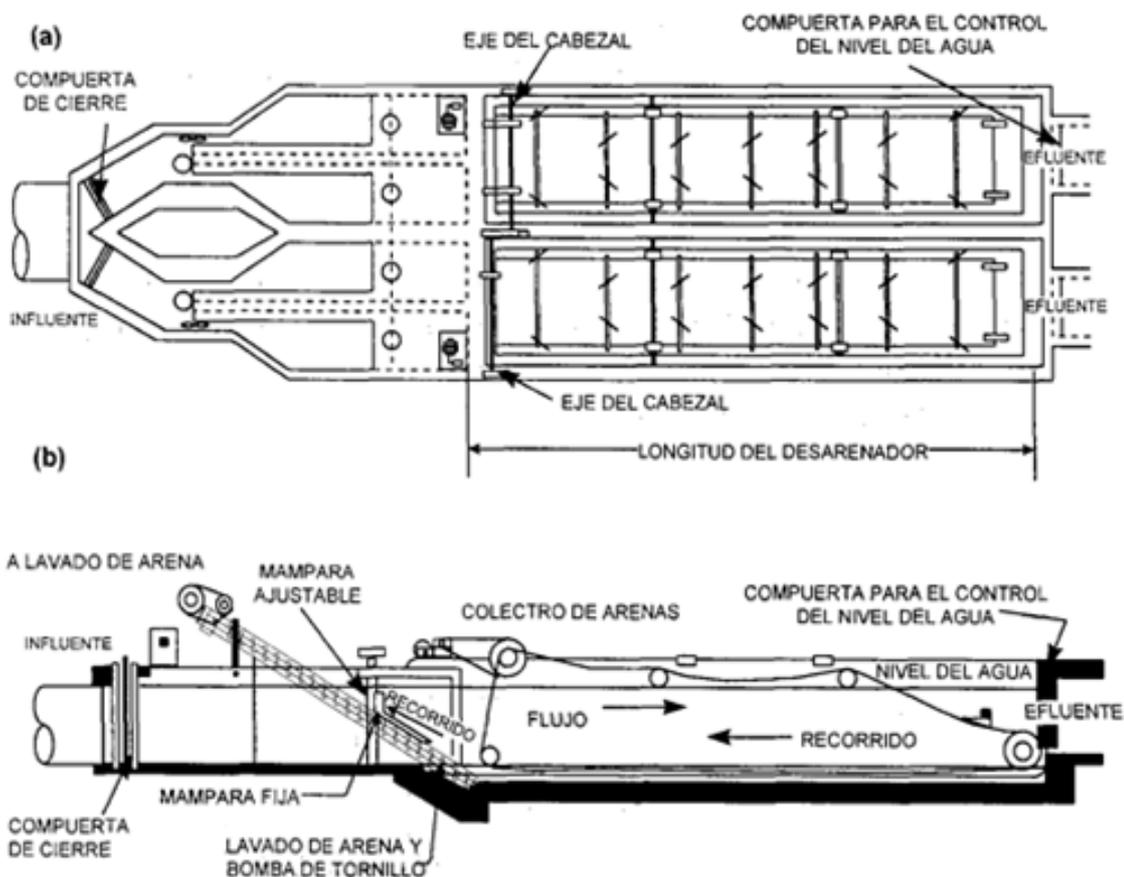
Los desarenadores con control de velocidad son tanques: de sedimentación largos y estrechos. En ocasiones, se emplean varios y se puede lograr un arreglo económico y eficiente usando secciones de control a la entrada y salida del canal. Las secciones de control incluyen vertedores proporcionales (Sutro, canales Parshall, canal parabolico, etc).

La velocidad horizontal en desarenadores es de 0.3 m/s y el tiempo de retención de 60 s. Cuando el peso específico de la arena debido a las condiciones locales sea inferior a 2.65 deberán considerarse velocidades inferiores. De hecho, el diseño de este tipo de desarenador debe contemplar que, bajo las condiciones más adversas, la partícula más ligera de arena alcance el fondo antes de su salida. La pérdida de carga a través de un desarenador con control de velocidad es del 30 al 40 % de la profundidad máxima del canal.

La longitud del canal es función de la velocidad de sedimentación y la sección de control. Es recomendable considerar una longitud adicional debido a la turbulencia

que se genera a la entrada y salida de los vertedores; comúnmente, se considera del doble de la profundidad del flujo hasta un máximo del 50 % de la longitud teórica. En cuanto al área de la sección transversal ésta función del caudal y número de canales.

El método más sencillo para la remoción de arena en una cámara de limpieza manual es el traspaleo y el transporte en carretillas, pero cuando se tienen flujos mayores de 40 l/s se recomienda la limpieza mecánica. Los equipos mecánicos para la extracción de la arena sedimentada son: transportador de cangilones o rascadores (plantas pequeñas) y elevadores de cadena continua con cangilones o transportador de tornillo helicoidal (plantas grandes, Figura 4.3).



**Figura 4.3 Planta y sección longitudinal de un desarenador de doble canal con depósito**

La arena eliminada por los desarenadores puede estar libre de materia orgánica o tener un alto porcentaje de ella. El método para la disposición final debe tomar en cuenta no sólo el contenido de arena sino también el de materia orgánica, especialmente la fracción que es fácilmente putrescible. La arena sin lavado contiene 50 % o más de material orgánico, mientras que la lavada tiene un máximo del 3 % de orgánicos putrescibles.

La cantidad de arena varia de 5 a 200 m<sup>3</sup>/10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> con un valor típico de 30 m<sup>3</sup>/10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, dependiendo de:

- Sistema de drenaje (separado o combinado)
- Condiciones climatologicas
- Tipo de suelo, condición y calidad de las alcantarillas
- Aportaciones residual industrial
- Uso de trituradores y
- Proximidad con banco de arena

Debido a que la arena es estable no causa problemas al disponerse en el suelo.

#### 4.1.3. Medidores de flujo

En cualquier sistema de tratamiento es muy importante conocer el flujo que entra. En las lagunas, los dispositivos más empleados son los vertedores y los canales Parshall que no requieren equipo electromecánico, son de fácil mantenimiento y operación.

##### 4.1.3.1 Vertedores

Tienen la ventaja de que su capacidad hidráulica se puede variar cambiando las placas de los mismos. Si ha habido una disminución del caudal se puede lograr mayor precisión cambiando un vertedor triangular de 90 ° por uno de 45 °. Si por el contrario se tiene un aumento del caudal, se puede pasar a un vertedor rectangular o a una compuerta con descarga de fondo (Figura 4.4).

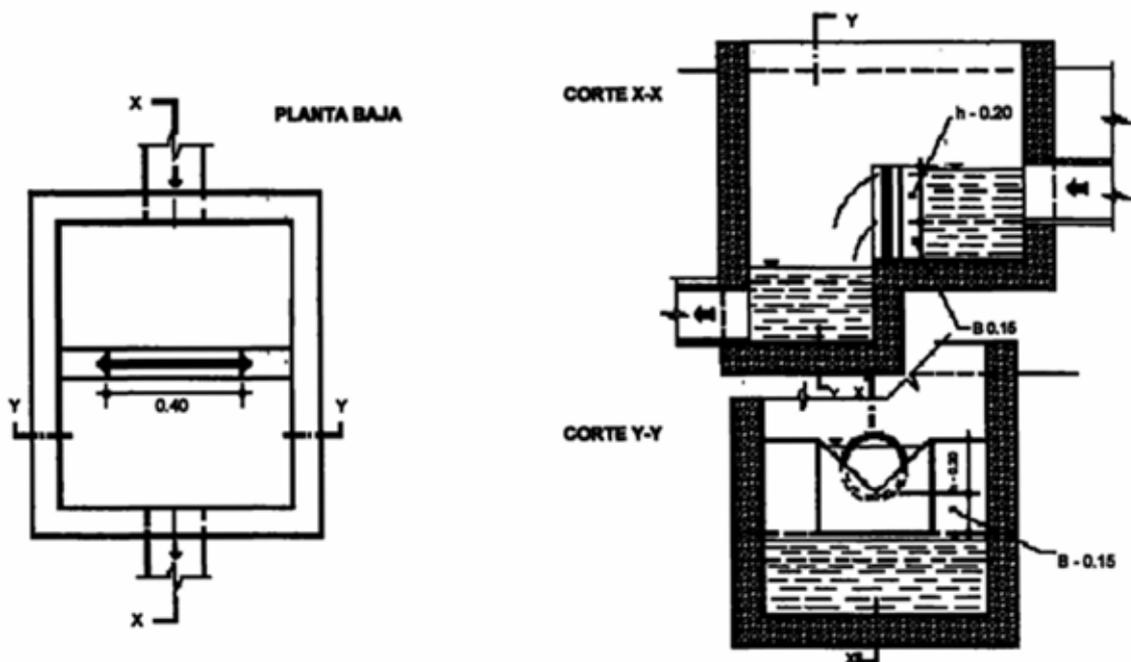


Figura 4.4 Esquemas típicos de medición y distribución con vertedores

#### 4.1.3.2 Canal Parshall

Tiene una sección contraída (Figura 4.5) en la cual se lleva a cabo la medición del flujo al mantener cierto nivel en dicha zona, además presenta pérdidas de carga más bajas comparados con los vertedores. La siguiente ecuación permite relacionar la descarga con la contracción

$$Q = 2.23 \times 10^{-2} W (H_a / 304.8)^{1.522 (w/304.8)^{0.026}} \quad (76)$$

donde:

- Q: caudal, m<sup>3</sup>/min
- W: ancho de la garganta, mm
- H<sub>a</sub>: tirante aguas arriba, mm

Una restricción a esta ecuación se da en función del ancho de la garganta, la cual debe estar comprendida entre 300 mm y 3.0 m. Los canales pueden adquirirse directamente fabricados en fibra de vidrio u otros materiales, y se suministran con las curvas de medición incorporadas. La profundidad del agua se mide por lectura directa, con un flotador situado en una arqueta lateral, o por medio de un detector electrónico de nivel.

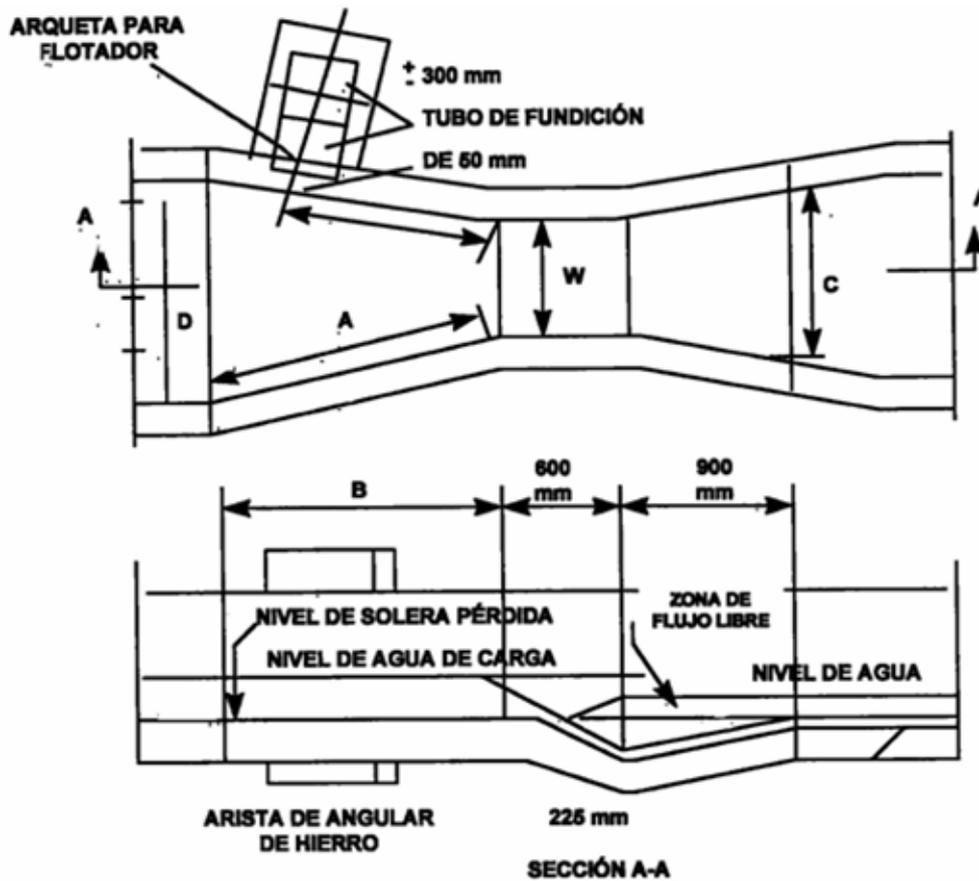


Figura 4.5 Canal Parshall

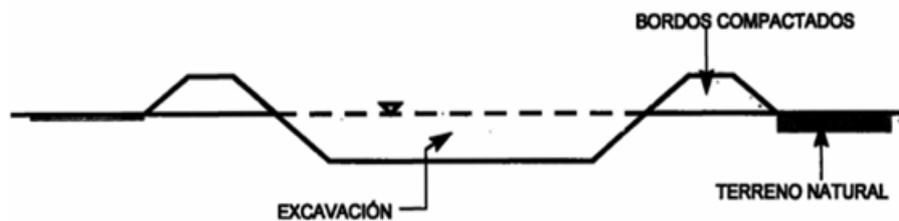
## 4.2.FACTORES CONSTRUCTIVOS DE LAS LAGUNAS

Las lagunas se construyen generalmente por excavación del terreno natural, formando un bordo perimetral con el fin de encerrar el área de tratamiento, evitar la aportación de escurrimientos superficiales y, en ocasiones, aumentar la capacidad de almacenamiento (Figura 4.6). Con frecuencia, se sobreexcava a mayor profundidad que la requerida por el proyecto ya que los depósitos naturales de suelo normalmente no tienen las características adecuadas para un desplante directo, y se debe sustituir el material sobreexcavado por uno de relleno seleccionado y bien compactado.

### 4.2.1. Identificación del sitio

La selección del sitio para la construcción de una laguna debe tomar en cuenta:

- La capacidad de tratamiento y de almacenamiento requerida
- La necesidades de elevación (presión)
- La disponibilidad y costo del terreno



**Figura 4.6 Sección transversal Típica de una laguna construida por excavación y formación de bordos**

Un factor determinante en la localización de las lagunas es la disponibilidad de terreno. Si existen grandes áreas de tierra que pueden adquirirse a bajo costo, entonces se tiene un terreno adecuado para la instalación del sistema. Estos requerimientos deben combinarse con las propiedades del sitio:

- Información geotécnica preliminar
- Topografía y geología
- Estudios de impacto ambiental

La topografía y geología de la región son los factores más importantes ya que, por lo común, el sitio debe ubicarse "cerca" de la población que genera las aguas residuales pero lejos de zonas habitacionales y procurar que la descarga llegue por gravedad. El motivo de ubicarlas alejadas de centros de población es para evitar los problemas de olores que son transportados por el viento. Se recomienda siempre, que sea posible, que los sistemas lagunares se localicen a mds de 500 m de las áreas residenciales y si se contemplan lagunas anaerobias, la distancia debe incrementarse a 1 km. Cabe mencionar que, a pesar de estas recomendaciones, existen muchos ejemplos donde la gente vive a 100 m de las

lagunas sin sufrir ningún tipo de molestia. Una precaución que puede tomarse en cuenta cuando las zonas poblacionales se encuentran cerca del sistema de tratamiento es colocar la laguna anaerobia al centro del mismo, para disminuir los efectos de olores, aunque no abate los problemas de insectos (Arthur, 1990). También, para minimizar las molestias causadas por la generación de malos olores se coloca una mampara de desvío opuesta a la dirección del viento (sotavento).

#### 4.2.2. Impermeabilización

Para evitar la contaminación de acuíferos lo principal para una laguna es que el agua no se infiltre al subsuelo. Para ello es necesario seleccionar el sitio buscando que tenga un suelo impermeable, de preferencia arcilloso, evitar áreas con fallas geológicas y lechos de río debido a los riesgos de infiltración. En caso de no ser así, deberá procederse a impermeabilizar el piso lo que puede representar el costo máximo de la construcción.

Básicamente, las técnicas para impermeabilización son tres:

- suelos naturales y compactados.
- suelos locales mejorados con estabilizantes químicos o con la adición de suelo importados.
- revestimientos sintéticos (geomembranas o liners).

Antes de efectuar los cálculos para determinar las necesidades de impermeabilización se requieren conocer los siguientes elementos:

- ↗ Nivel freático
- ↗ Coeficiente de permeabilidad del material poroso
- ↗ Coeficiente de permeabilidad del material que sustituir al material poroso
- ↗ Área del nivel medio de la laguna
- ↗ Profundidad útil de la laguna
- ↗ Profundidad del nivel freático en relación con el nivel máximo de la laguna.

La tasa de infiltración puede ser estimada mediante la ecuación 74, que involucra la ley de Darcy para un escurrimiento de tipo laminar a través de materiales porosos

$$Q = k_p J \cdot A \quad (77)$$

donde:

- Q: tasa de infiltración, m<sup>3</sup>/d
- k<sub>p</sub>: coeficiente de permeabilidad, m/d
- J: pérdida de la carga unitaria del escurrimiento, m/m
- A: Área del nivel medio de la laguna, m<sup>2</sup>

#### 4.2.2.1 Revestimientos con suelos compactados

Mediante los análisis geotécnicos se conoce el tipo de suelo y el grado y método de compactación que se utiliza. Los mejores suelos son las arcillas del tipo monmorilonítico (naturales) o bentónico (artificiales), debido a su composición química. El coeficiente de permeabilidad para arcillas no alteradas (impermeabilizadas) varía de  $10^{-9}$  a  $10^{-7}$  cm/s. Los silicoaluminatos de sodio son inestables en presencia de radicales oxhidrilos (OH) del agua con los que reaccionan fácilmente soltando el sodio  $\text{Na}^+$  y tomando el OH. Esto hace que se "hinchén" de agua y sellen las fugas que pudieran existir, o bien, que reduzcan en gran medida la permeabilidad del suelo local. Su problema radica en que son, difíciles de manejar en estado puro así como de acomodar y de compactar, requiriendo siempre espesores importantes de aproximadamente 50 cm por capa.

Algunos limos plásticos también son usados con el fin de lograr impermeabilizaciones aunque su permeabilidad es mayor que la de las arcillas (del orden de  $10^{-8}$  cm/s). Los limos tienen la ventaja de ser fácilmente compactables y no se agrietan con la facilidad que lo hacen las arcillas, sobre todo al ser sometidas a cambios en su contenido de humedad (Morales y Monroy en IMTA, 1995).

La impermeabilización de una laguna con suelo compactado y fino es una técnica delicada que requiere un buen conocimiento de las propiedades de los suelos y un riguroso control de calidad. El revestimiento debe combinar varias propiedades: baja permeabilidad, estabilidad a los gradientes fuertes a los que se encuentra sometido y resistencia a la erosión. Si además la laguna debe vaciarse periódicamente, el material deberá presentar una gran estabilidad volumétrica para evitar el agrietamiento por secado o, en su defecto, deberá protegerse adecuadamente.

En realidad la permeabilidad de los suelos finos no es una característica inherente sino que depende físicamente de su estructura. Para suelos compactados, la permeabilidad varía considerablemente con el contenido de agua y el método de compactación. Lo anterior se aprecia claramente en la Figura 4.7 donde se observa que el coeficiente de permeabilidad disminuye hasta en varios órdenes de magnitud si la compactación se realiza con un contenido de agua superior al óptimo Proctor. Lo anterior se debe a que, cuando el material se compacta en el lado seco respecto al óptimo Proctor, las partículas de arcilla forman flóculos o grumos que oponen una alta resistencia al rearrreglo durante la compactación y dan lugar a una estructura con una alta proporción de poros grandes. Para contenidos de agua altos los grumos se debilitan y los poros grandes tienden a desaparecer. Por tanto, para reducir eficientemente la permeabilidad, es más importante dar al suelo una estructura adecuada que tratar de disminuir su porosidad. Sin embargo, la tasa de percolación puede ser reducida a través de la sustitución del material poroso por una cama de arcilla homogénea bien

compactada. El método de compactación también interviene siendo mejor el amasado que el estático.

### Selección del material

En la Tabla 4.4 presenta diferentes tipos de suelos de acuerdo con sus propiedades mds relevantes desde el punto de vista de su uso como revestimiento.

Para la impermeabilización natural se puede afirmar que existen dos opciones: emplear un material fino plástico poco permeable y protegerlo con otro contra la erosión y el secado o elegir un material natural (o una mezcla) que combine, en la medida de lo posible, todas las propiedades deseables. Para la primera opción, debe verificarse que se cuenta con un banco de préstamo de material arcilloso adecuado. Las arcillas de baja compresibilidad presentan la ventaja de ser más estables volumétricamente y más manejables que las de alta compresibilidad. Además, si se les da una estructura adecuada se puede considerar que ambos materiales tienen permeabilidades semejantes, para fines prácticos.

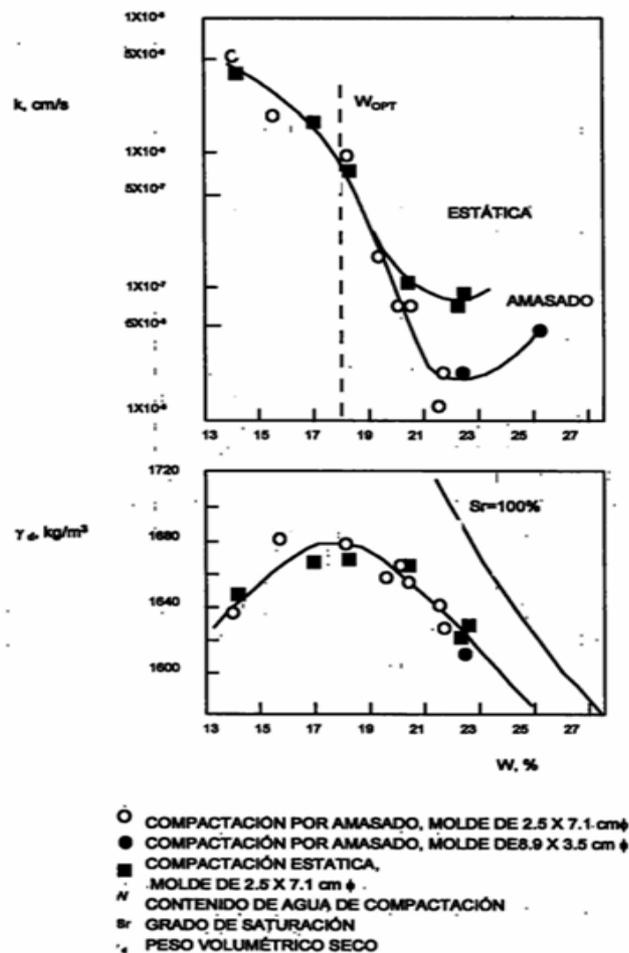


Figura 4.7 Influencia del método de compactación en la permeabilidad de una arcilla limos

**Tabla 4.4 Propiedades físicas de los suelos en relación con su uso para impermeabilización de lagunas**

NOMBRE TIPICO DE GRUPOS DE SUELOS (SUCS)	SIMB, GRUPO	PROPIEDADES DE LOS SUELOS			USO COMO REVESTIMIENTO	
		Permeabilidad	Resistencia al corte	Peso vol. Compactado	Resistencia a la erosión	Revestimiento de suelo compactado Impermeable
Gravas y mezclas de arena y grava, bien graduadas, poco o nada de finos.	GW	14	16	15	2	-
Gravas y mezclas de arena y grava, uniformes, poco o nada de finos	GP	16	14	8	3	-
Grava limosa, mezclas uniformes de grava, arena y limo.	GM	12	10	12	5	6
Grava arcillosa, mezclas uniformes de grava, arena y arcilla	GC	6	8	11	4	2
Grava con cementante de arena-arcilla	GW-GC	8	13	16	1	1
Arena y arena con grava, bien graduada, poco o nada de finos	SW	13	15	13	8	-
Arena uniforme, arena con grava, poco o nada de finos	SP	15	11	7	9 (gruesa)	-
Arena limosa, mezclas uniformes de arena y limo	SM	11	9	10	10 (gruesa)	7 erosión crítica
Arena arcillosa, mezclas uniformes de arena y arcilla	SC	5	7	9	7	4
Arena con cementante arcilloso	sw-sc	7	12	14	6	3
Limos inorgánicos y arenas muy finas polvo de roca, arenas finas, limosas o arcillosas con ligera plasticidad	ML	10	5	5	-	8 erosión crítica
Arcillas inorgánicas de baja a mediana plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas poco plasticas.	CL	3	6	6	11	5
Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad	OL	4	2	3	-	9 erosión crítica
Limo inorgánico, suelos finos arenosos o limosos micáceos o diatomeáceos limos plásticos	MH	9	3	2	-	-
Plasticidad, "fat clays"	CH	1	4	4	12	Cambio volumétrico crítico
Arcillas orgánicas de mediana a alta plasticidad	OH	2-	1			
Turba y otros suelos altamente orgánicos	Pt	10	-			
Plasticidad "fat clays"	CH	1	4	4	12	Cambio volumetricos
Arcillas orgánicas de mediana o alta plasticidad	OH	2	1	1	-	-
Turba y otros suelos altamente orgánicos	Pt	10	-	-	-	-

Si se opta por la segunda opción, los materiales más adecuados son las gravas con matriz arenoarcillosa o en su defecto, las gravas arcillosas. El contenido de arcilla debe ser suficientemente alto y uniforme para que si se presenta segregación local el porcentaje de arcilla no llegue a ser en ningún punto inferior a 15 %

El espesor del revestimiento debe ser suficiente para garantizar la continuidad del mismo y evitar que se encuentre sometido a un gradiente hidráulico excesivo. No es recomendable un espesor inferior a 30 cm ni un gradiente superior a 10 especialmente en materiales mal graduados.

### **Eneparación del material**

Por los motivos expuestos en el apartado anterior, es conveniente compactar el material sí eleccionado con un alto contenido de agua para reducir la permeabilidad. Si se quiere bajar la permeabilidad al mínimo, el contenido de a ua requerido puede ser hasta de 5 o 6 % superior al óptimo Proctor. Para evitar que existan zonas locales más permeables en el revestimiento es necesario que los materiales de los bancos de prdstamo sean preparados previamente a su colocación. La preparacion consiste en dardes el contenido de agua adecuado, homogeneizarlos por mezclado y dejarlos curar para que el contenido de agua se uniformice por difusión. El tiempo de curado debe fijarse para cada material mediante muestreos de control. Un tiempo del orden de tres a seis dias resulta generalmente suficiente.

### **Colocación**

Si se pretende lograr la mínima permeabilidad, los equipos tradicionales de compactación como rodillos "pata de cabra" o neumáticos pueden resultar inadecuados al atascarse debido al alto contenido de agua del material. Teniendo en cuenta que no se busca un alto grado de compactación sino dar al suelo una estructura adecuada, puede ser preferible recurrir a un equipo ligero (por ejemplo tractor agrícola) para formar una capa de suelo remoldeado, de espesor uniforme. Es convenientemente, que el revestimiento se construya, por capas de no más de 20 cm de espesor cada una.

Antes de iniciar la colocación, es necesario regar abundantemente el terreno natural para evitar que absorba el agua del suelo compactado. En el control de calidad de la colocación debe ponerse énfasis en la verificación del porcentaje de finos, contenido de agua y plasticidad de los mismos así como del espesor de la capa.

### **Protección**

La protección de los revestimientos de suelos finos a base de material granular, suelo-cemento o concreto asfáltico debe instalarse lo mas rápido posible. Durante

el lapso que separa. la colocación del revestimiento de la instalación de la protección, el contenido de agua del suelo debe mantenerse constante por riego.

En especial para arcillas el material de protección puede ser una grava-arena, de preferencia bien graduada, con tamaños suficientes para resistir en su caso el arrastre de las corrientes que pueden existir dentro de las lagunas, en particular cerca de la descarga y de la zona de bombeo. El suelo compactado puede también protegerse con una capa de suelo-cemento o de concreto asfáltico.

#### 4.2.2.2 Suelos locales mejorados con estabilizantes químicos o con la adición de suelos importados

Se ha observado, que el sellado natural de una laguna puede ocurrir por alguno de los mecanismos siguientes:

- ↪ Taponamiento físico de los vacíos del suelo por sólidos sedimentados
- ↪ Taponamiento químico de los vacíos del suelo por intercambio iónico, y
- ↪ Taponamiento biológico y orgánico por crecimiento microbiano en el fondo del estanque.

Varios productos químicos que se mezclan con el suelo han sido usados con grados de éxito muy variables para sellar lagunas. Los cationes monovalentes (iones de sodio, potasio y amonio) disminuyen químicamente la porosidad del suelo al reemplazar los cationes polivalentes calcicos. Se ha encontrado que la impermeabilización química puede ser efectiva en suelos con un mínimo de 8% de arcilla y de 10% de limo. Las sales que se usan con más frecuencia para el sellado químico son los polifosfatos de sodio (pirofosfato tetrasódico o tripolifosfato sódico), el carbonato de sodio y el cloruro de sodio. Debido a la compleja y variable composición química de los suelos, los tratamientos de esta naturaleza solamente deben aplicarse después de un estudio de laboratorio que demuestre su efectividad. Se trata en realidad de una técnica incipiente.

Una segunda categoría de productos químicos esta constituida por los aditivos que se agregan al agua para reducir las filtraciones. Algunos de estos productos. a base de polimeros, aumentan la atracción iónica de las partículas del suelo hacia el agua, con lo que se incrementa el diámetro efectivo de las mismas y se reducen las dimensiones de los poros. Otros son emulsiones de cera que; forman una membrana delgada en el fondo. Estos productos permiten reducir pero no eliminar las filtraciones. Sus principales atractivos son su bajo costo y la posibilidad que ofrecen de corregir en cierta medida los problemas de filtración sin tener que vaciar la laguna.

Las arcillas altamente expansivas, tales como la bentonita, pueden reducir efectivamente la permeabilidad del suelo natural al humedece. La bentonita es una arcilla montmorilonitica sódica que exhibe un alto grado de expansividad, permeabilidad y baja estabilidad en presencia de agua. Para revestir lagunas artificiales es posible dejar decantar una suspensión de bentonita en agua o

mezclar la bentonita en seco con el suelo natural o con arena, previamente al llenado. También puede aplicarse sobre una cama de grava para sellar los huecos entre partículas o enterrarse bajo una capa protectora de suelo. El comportamiento de los revestimientos de bentonita depende en gran parte de la calidad de las mismas. Algunos depósitos de bentonita pueden contener algo de arena, limo y arcilla como impurezas. La bentonita finamente molida es generalmente más adecuada para el revestimiento que la bentonita en greila. Por lo general, la bentonita debe tener un contenido de agua inferior a 20 %. Esto resulta especialmente importante para membranas delgadas. La bentonita de mala calidad se deteriora rápidamente en presencia de aguas duras y tiende a erosionarse por efecto de corrientes y oleaje. Durante el primer año puede presentarse agrietamiento de la membrana por asentamiento la saturarse la subrasante. Los revestimientos de bentonita deben generalmente colocarse a mano, lo que implica un alto costo.

No debe esperarse que la bentonita colocada simplemente sobre la superficie del terreno dure más de 2 o 4 años. Las capas de bentonita enterradas pueden tener una durabilidad mayor. Actualmente, existen en el mercado paneles prefabricados de bentonita que, diseñados originalmente para impermeabilizar cimentaciones, se han usado también para lagunas.

#### 4.2.2.3 Revestimientos sintéticos

Las membranas sintéticas, también conocidas como geomembranas o liners, llegan a proporcionar permeabilidades hasta del orden de 10-13 cm/s.

Al usar membranas sintéticas se busca generalmente eliminar totalmente las filtraciones. Así, quizá más que las propiedades en si del material sintético, la instalación de la membrana es primordial. En efecto, un desgarre o defecto local puede conducir a filtraciones importantes, aun si el terreno subyacente es poco permeable.

#### **Selección del tipo de membrana**

Existen, una gran variedad de membranas, sintéticas, las que se pueden dividir en los siguientes grandes grupos por su fabricación:

- De plásticos (PVC, PAD y poliamida).
- De elastómeros (butilo, neopreno, etilpropileno terpolimero, etilenopropileno dienomonómero y etileno vinilacetato).
- De bentonita y geotextiles.

El primer requisito para la selección de una geomembrana es su resistencia química. Se debe considerar para agua municipal una vida útil de 20 años. Así, por su resistencia las membranas de PAD (p lietileno de alta densidad) son las preferidas.

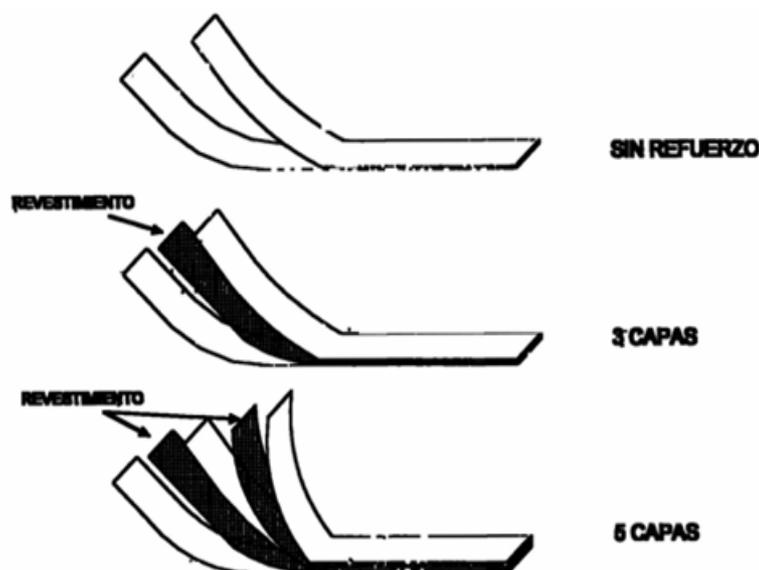
La selección del tipo de membrana para una obra particular debe tomar en cuenta múltiples factores. En la Tabla 4.5 se presenta una lista de los principales criterios de selección en orden decreciente de importancia. Esta lista tiene solamente valor indicativo y puede variar de una obra a otra.

Las membranas terminadas pueden tener diferentes estructuras. Para evitar los orificios debidos a defectos de fabricación, las membranas gruesas se obtienen frecuentemente superponiendo varias hojas, intercalando entre ellas una o dos telas de refuerzo (Figura 4.8). Este refuerzo aumenta la resistencia a la tensión de la membrana, facilita su manejo y los empalmes. Sin embargo, las razones más importantes para reforzar con tela son las siguientes:

- Estabilidad en el punzonamiento
- Estabilidad contra el encogimiento
- Mayor resistencia al desgarre

**Tabla 4.5 Criterios de selección para revestimientos sintéticos**

1.	Alta resistencia a la tensión, flexibilidad y elongación sin falla
2.	Resistencia a la abrasión, al punzonamiento y a los efectos de agua de desecho.
3.	Buena resistencia al intemperismo
4.	Inmunidad al ataque de bacterias y hongos
5.	Densidad >1.0
6.	Color: Negro (para resistir la acción de los rayos ultravioletas)
7.	Espesor mínimo : 0.4 mm
8.	Composición uniforme y ausencia de defectos físicos
9.	Resistencia variaciones de temperatura y a condiciones ambientales
10.	Reparación fácil
11.	Economía



**Figura 4.8 Fabricación típica de membranas**

Las telas de refuerzo que tienen más aceptación son a base de algodón, yute, poliéster y fibra de vidrio. Aunque el nylon tiene algunos inconvenientes sigue siendo el material más aceptado; su principal atractivo está en su fácil disponibilidad y en su resistencia a soluciones acuosas y organismos del suelo. Como desventajas deben mencionarse su baja resistencia a las soluciones de sales y a la luz solar, y su falta de adherencia a cualquiera de los polímeros.

## **Instalación**

Los principales aspectos a cuidar para la instalación de revestimientos sintéticos en lagunas artificiales se analizan en los siguientes puntos.

**Preparación del sitio.** Las membranas deben colocarse sobre una superficie tersa ya sea de concreto, concreto lanzado, concreto asfáltico o suelo. En este último caso, es necesario remover todas las ramas afiladas, las piedras y el escombro, tanto en el fondo como, a los lados de la instalación o recubrirlos con suelo fino (arena fina ó limo). Las zonas donde crezca el pasto deben limpiarse. De preferencia el área que se va a cubrir debe nivelarse y compactarse con rodillo y plancha para reducir las concentraciones de esfuerzos en la membrana. En instalaciones críticas para evitar daños a la membrana impermeable ésta se apoya sobre un fieltro de poliéster o polipropileno.

**Colocación de la membrana.** Las geomembranas se fabrican directamente en planta y se transportan, confeccionadas del tamaño requerido. En ocasiones, cuando abarcan una gran extensión no pueden ser ensambladas en planta (piezas hasta de 4,000 m<sup>2</sup> son factibles de fabricarse de una sola pieza) y se transportan al sitio en los tramos más grandes posibles, en donde se unen generalmente por termosoldado. Las membranas sintéticas impermeables se embarcan dobladas como, acordeón en ambos sentidos para poder extenderse fácilmente en la dirección longitudinal y después a lo ancho. Inicialmente, se coloca una primera sección sobre el talud del bordo, o de la berma perimetral para que uno de sus extremos se pueda enterrar en la zona de anclaje, antes de que el resto se desdoble hacia abajo del talud. Se coloca a continuación la segunda, sección junto a la primera y se desdobra en forma tal que las dos se puedan unir hasta cubrir el área total necesaria. Para unir los tramos entre sí es recomendable emplear una plataforma de trabajo que puede ser un tablón de 2.5 cm de espesor, 25 cm de ancho y 610 cm de largo colocado directamente en el terreno sobre suelo seco o sobre soportes en terreno húmedo. Los dos bordes del revestimiento, que se van a unir se traslapan a lo largo del centro de la línea del tablón y se alinean con la ayuda de dos trabajadores, quienes dejan libre el área de polvo, tierra o humedad mediante un trapo o un cepillo.

Las juntas entre secciones de membranas pueden hacerse recurriendo a diferentes técnicas. Las uniones realizadas en planta son más confiables que las efectuadas en campo donde no existen las condiciones óptimas para hacer este trabajo. Siempre debe buscarse minimizar el número de juntas. Los principales métodos empleados para la unión de juntas en la actualidad son:

- Dieléctrico
- Térmico
- Con solvente
- Con adhesivos

Si se usa el sistema de unión con solvente adhesivo, en primer término la membrana debe estar totalmente seca. Se tensa ligeramente el área mientras que un trabajador inyecta el solvente adhesivo entre las dos membranas preparadas (con cantidades de aproximadamente 35 g cada 10 m) usando unos envases flexibles. No es necesario ni deseable arremangar el borde, superior de la membrana. Inmediatamente después de aplicar el solvente adhesivo con un trapo se aplica presión con la mano, o con un rodillo de acero transversal a la junta. Si alguno de los bordes no selló se debe repetir la aplicación del adhesivo hasta unir completamente ambos bordes. Se desplaza entonces hacia adelante el tablón para sellar la siguiente zona (a veces se amarra una cuerda al extremo frontal del tablón para poder jalarlo hacia adelante). Después de completar la unión, el solvente, adhesivo habrá sellado la unión eficientemente para que se pueda desdoblarse un nuevo tramo en todo su ancho y colocar y sellar otra sección. Generalmente, la resistencia al corte se desarrolla entre 5 a 15 minutos, pero la resistencia final al desprendimiento solamente se alcanza en varios días hasta que el solvente, se evapora (Figura 4.9). Las uniones deben inspeccionarse cuidadosamente después de transcurrida la, primera media hora o más tarde, con el fin de detectar y resellar cualquier hueco que aparezca en la junta y en particular las clásicas "bocas de pescado" que se producen por tensiones diferenciales entre los bordes opuestos a las juntas.

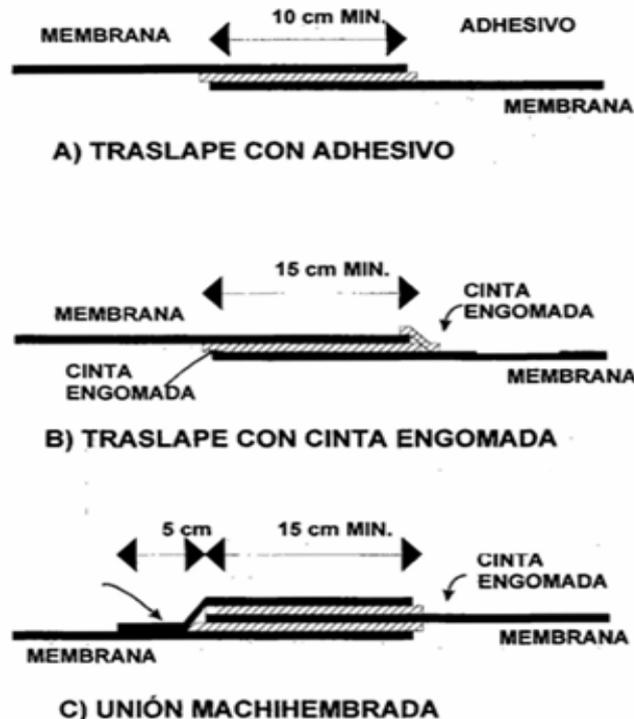
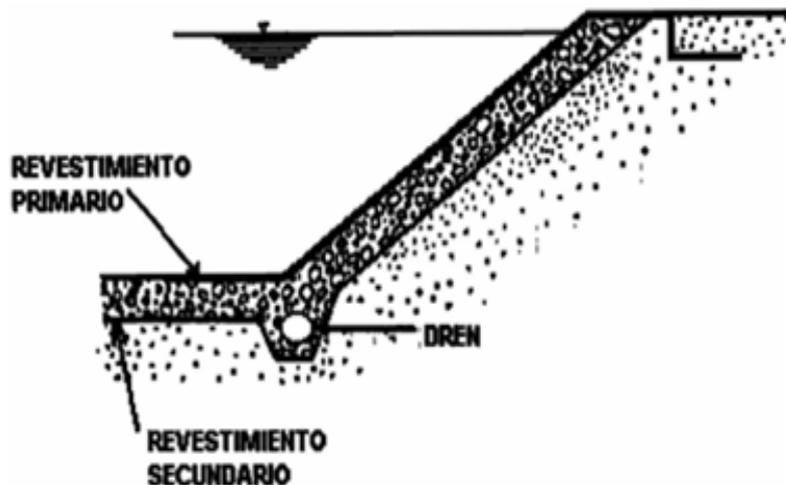


Figura 4.9 Empalmes con distintos sistemas adhesivos

Las operaciones de colocación de las membranas no deben realizarse cuando sopla, viento debido al peligro de movimiento, y desgarre de las membranas. Si el viento, se presenta durante la instalación, es indispensable lastrar el revestimiento de inmediato. Para ello, es recomendable preparar un número suficiente de sacos de área.

Subdrenaje. El fluido que puede llegar a acumularse detrás de una membrana impermeable por alguna discontinuidad de la misma, por infiltración del agua de lluvia o de otras fuentes, puede ocasionar múltiples, problemas. Una solución a esto es mediante una doble impermeabilización, la cual es muy onerosa y solamente se justifica si el fluido almacenado es altamente contaminante o si se ha detectado un problema geotécnico potencial de importancia (Figura 4.10). Otra opción más simple, consiste en: colocar el revestimiento sobre una capa de concreto asfáltico poroso que canaliza el fluido interceptado hacia un sistema de drenaje. Otra alternativa consiste en usar material granular, recubierto como suelo fino compactado o con geotextil en vez de concreto asfáltico. En ambos casos, la subrasante debe estar constituida por una capa de suelo compactado semipermeable eventualmente recubierta con un riego asfáltico. Estos sistemas no recolectan la totalidad de las filtraciones pero permiten detectarlas si son importantes y evitan el desarrollo de subpresiones bajo el revestimiento en caso de vaciado de la laguna.



**Figura 4.10 Subdrenaje en un sistema de doble impermeabilización**

Protección. Las membranas delgadas son sensibles a: la radiación solar, a daños mecánicos o al vandalismo por lo que deben recubrirse con una capa de suelo. En los taludes debe colocarse una capa de suelo permeable (grava) contra la erosión. Para poder mantener en su lugar tanto la membrana como los taludes de suelo y la capa de grava es necesario que la pendiente no sea mayor de 3:1. En taludes más pronunciadas puede usarse concreto para fines de protección.

Anclaje. El anclaje de la membrana en la parte superior del talud puede ser formal o rústico.

Un sistema formal de anclaje consta de remos de fijación de 12 mm separados de 15 a 30 cm y una barra de anclaje de 6.3 x 51 mm en sección transversal. Por lo regular, la barra es una aleación aluminio, aunque también se usa acero galvanizado y acero inoxidable. Estos productos no presentan problemas de corrosión galvánica. Los pernos se colocan en el concreto del deflector de olas (Figura 4.11, sección a) o, si no existe, se cuela en una trinchera una viga de por lo menos 15 cm de ancho, con una sola varilla de refuerzo contra el agrietamiento (Figura 4.11, sección b). En el quiebre de la corona con el talud es recomendable colocar una tira de protección de 30 cm de ancho aproximadamente entre el revestimiento y el concreto, como protección contra rasgaduras por los bordes afilados o por la propia de la viga.

El anclaje rustico se hace excavando una zanja adyacente a la corona del talud de sección transversal en forma de V. La profundidad de la zanja varia entre 30 y 40 cm. que es suficiente para soportar cualquiera de los sistemas de revestimiento (Figura 4.11, sección c y d). Después de colocar la membrana se rellena la zanja con el suelo excavado compactándolo ligeramente

Sellos. En las estructuras de toma y de descarga y en otros puntos donde se tenga que atravesar el revestimiento, los sellos se consiguen de dos formas. La primera consiste, en hacer el sellado en el plano del revestimiento (Figura 4.12). La segunda, recurre a una funda para tubo (Figura 4.13), a la cual se fija una brida fabricada por uno de los métodos de junteo en planta. En el campo, esta brida se adhiere al material base del revestimiento en el punto donde el tubo sobresale del mismo. Los tubos de toma y/o descarga se introducen generalmente en el almacenamiento a través de una pequeña estructura de concreto. El sello entre el revestimiento y la estructura se efectúa en la parte superior del muro de la estructura en el plano del revestimiento: La estructuración sí no se reviste.



**NOTAS:**

1. LA SUPERFICIE DEL CONCRETO DEBE SER TERSA Y LIBRE DE TODO COMPUESTO DE CURADO
2. USAR UNA JUNTA DE (0.08x3.1 cm) COMO MÍN. (EL MATERIAL DEBERÁ SER COMPATIBLE CON EL REVESTIMIENTO) ENTRE LA BARRA Y EL REVESTIMIENTO; NO SE NECESITAN JUNTAS ENTRE PANELES ASFÁLTICOS Y EN OTROS TIPOS DE REVESTIMIENTOS DE MÁS DE 1 mm DE ESPESOR



**NOTAS:**

1. TODAS LAS SUPERFICIES DE CONCRETO EN LOS SELLOS DEBEN ESTAR TERSA Y LIBRES DE TODO COMPUESTO DE CURADO
2. USAR UN ADHESIVO ENTRE EL REVESTIMIENTO DEL TALUD Y LA BOTA ELASTOMÉRICA, ASÍ COMO UN ANCHO MÍNIMO DE 7.5 cm DE ADHESIVO COMPATIBLE ENTRE EL REVESTIMIENTO DEL TALUD Y EL CONCRETO

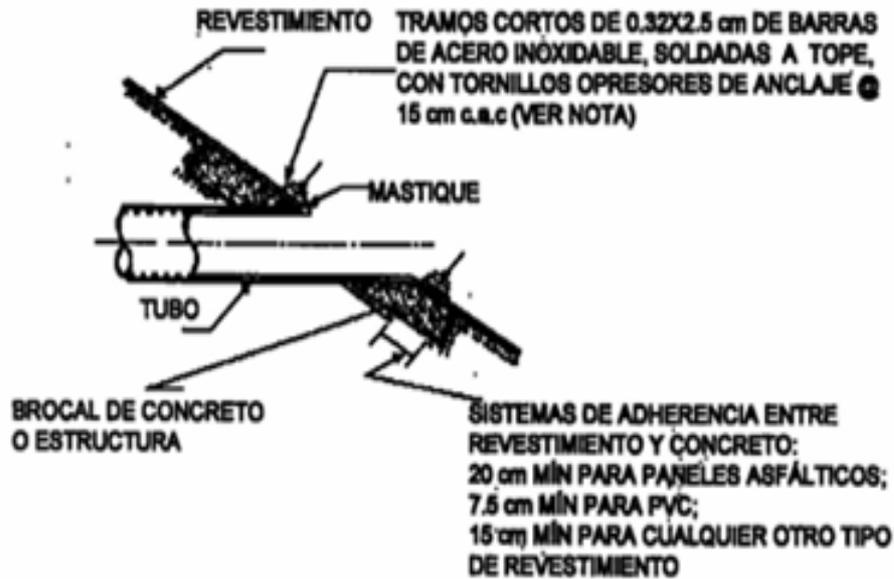


**NOTA:**

LA SUPERFICIE DE CONCRETO DEBE SER TERSA Y LIBRE DE TODO COMPUESTO CURADO. USAR UNA JUNTA DE 0.8 mm DE UN MATERIAL COMPATIBLE CON EL REVESTIMIENTO, ENTRE LA BARRA Y EL REVESTIMIENTO; NO SE NECESITAN JUNTAS EN PANELES ASFÁLTICOS NI EN OTROS TIPOS DE REVESTIMIENTO DE MÁS DE 0.040" (1 mm) DE ESPESOR.

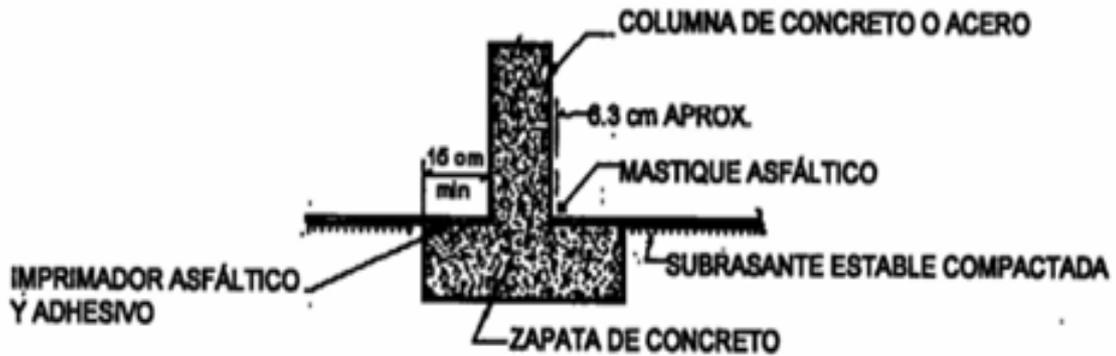


Figura 4.11 Esquemas típicos de anclaje de recubrimientos sintético



NOTA:  
 EN LUGAR DEL ANCLAJE MOSTRADO, EN EL CASO DE REVESTIMIENTOS A BASE DE PANELES ASFÁLTICOS SE PUEDEN USAR PERNOS HINCADOS A GOLPES ATRAVESANDO DISCOS METÁLICOS DE 5 cm DE DIÁMETRO MÍN. X 0.16 cm DE ESPESOR DE ACERO GALVANIZADO, SEPARADOS @ 15 cm c.a.c Y SELLADOS CON MASTIQUE

(a)

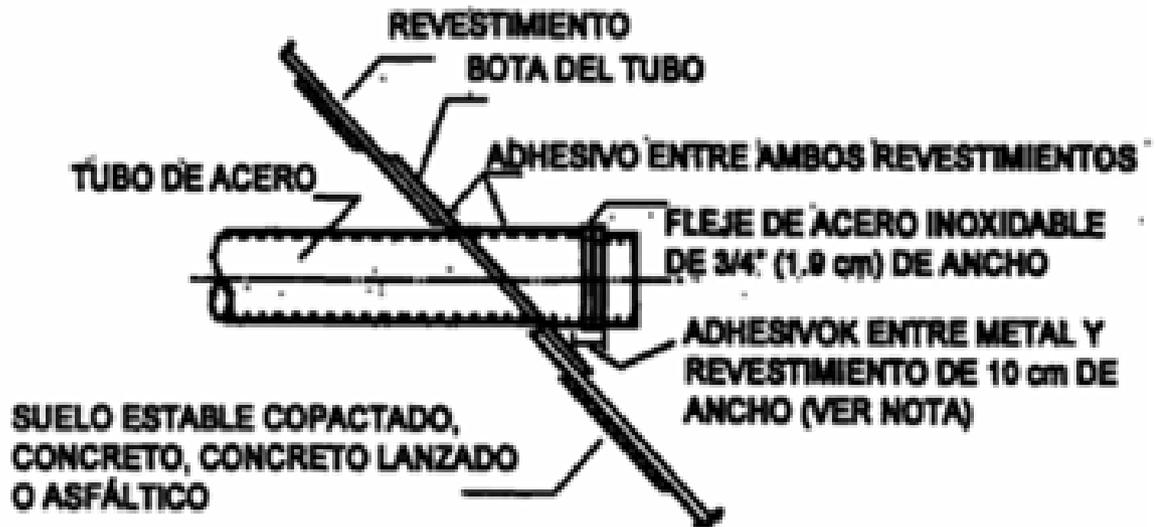


NOTA:  
 NO SE NECESITAN SUJETADORES MECÁNICOS .

(b)

Figura 4.12 a) Sello en tubería atravesado taludes, para todo tipo de revestimiento; b) Sello en columna de piso para revestimiento a base de paneles asfálticos y columnas.

Principales fallas. Las lagunas impermeabilizadas son obras vulnerables y sujetas a numerosos mecanismos de falla parcial o total. En la Tabla 4.6 se presenta una clasificación resumida de, dichos mecanismos. Esta Tabla muestra que son muchos los aspectos que hay que cuidar para lograr una instalación exitosa.



**NOTA:**

**EL TUBO SE DEBERÁ LIMPIAR PERFECTAMENTE EN LA ZONA DE APLICACIÓN DEL ADHESIVO**

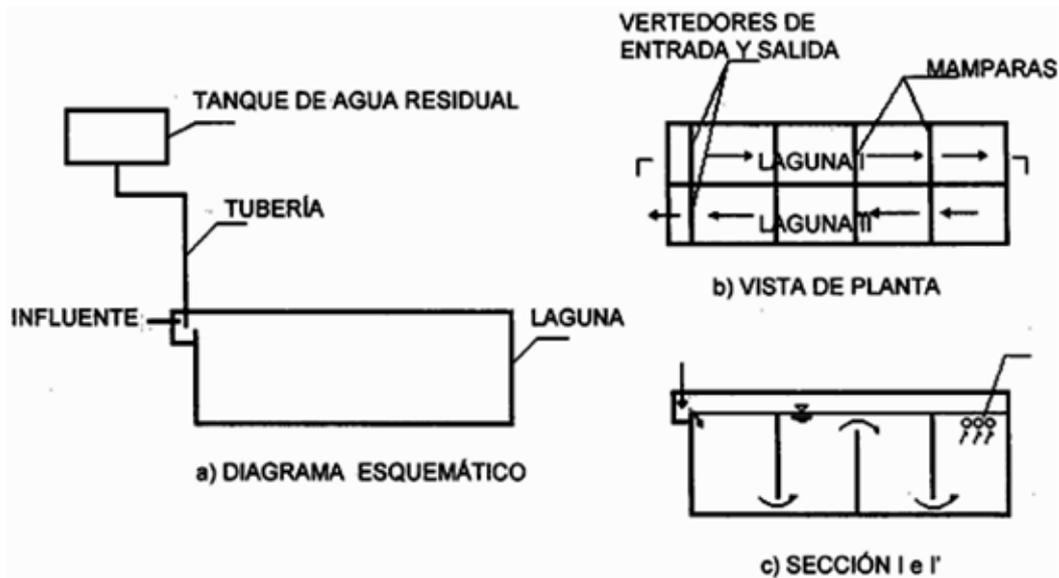
**Figura 4.13 Detalle de la bota del tubo para todo tipo de revestimiento, excepto paneles asfálticos**

**Tabla 4.6 Principales aspectos a cuidar durante la instalación**

a) PROBLEMAS EN LAS ESTRUCTURAS DE APOYO	c) PROBLEMAS EN LOS REVESTIMIENTOS
<p><u>Subdrenes :</u> Taponamiento, rupturas</p> <p>Sustrato : Compactación Textura Oquedades Asentamientos Huecos y grietas Agua freática Arcillas expansivas Gases Bombeo por oleaje Estabilidad de anclajes Lodo Obras complementarias</p>	<p><u>Dificultades Mecánicas</u> Juntas de sellado de campo Bocas de pescados Sellos con la estructura Punteo de la membrana Porosidades Agujeros Agujeros microscopicos Resistencias al desgarramiento Resistencias a la tensión Roedores, otros animales Insectos Crecimientos de algas</p>
<p>b) PROBLEMAS DE OPERACIÓN</p> <p>Cavitación Impacto Mantenimiento de limpieza Subpresión <u>Vandalismo</u></p>	<p><u>Clima:</u> Intemperismo en general Viento Contaminación por oxidantes Erosión por oleaje Actividad sísmica</p>

#### 4.2.3. Forma y número de las lagunas

Aun cuando la forma superficial de la laguna puede ser cualquiera, lo común es que sea de una geometría simple (rectangular o cuadrada), con las esquinas redondeadas para permitir el uso de maquinaria pesada y facilitar la construcción. Lo ideal es que la relación ancho/largo de la laguna sea lo mayor posible para asegurar que el funcionamiento hidráulico corresponda a un régimen de flujo tipo pistón o "j" reactores en serie, además de evitar los cortos circuitos o las zonas muertas. La forma rectangular con una relación de 2:3 es la más común, debido a la dificultad que existe para construir una laguna muy larga. Para imitar el flujo pistón, se usa dividir el área en varias secciones por medio, de mamparas (Figura 4.14). Las lagunas se deben construir con su mayor dimensión paralela a la dirección del viento predominante, de tal forma que se aproveche el mezclado.



**Figura 4.14 Modelo de una laguna de estabilización (en serie y con mamparas)**

Con respecto al número de lagunas, éste se puede aumentar de manera que sea más efectiva la depuración y se tenga una aproximación del flujo pistón. En promedio, los sistemas lagunares tienen de 3 a 4 lagunas en serie.

#### 4.2.4. Diseño de bordos

El aspecto más relevante para la construcción de las lagunas de estabilización es la formación de bordos que suelen diseñarse con éstas técnicas para presas pequeñas. Los principales aspectos del diseño son:

- ↗ Selección del material
- ↗ Estabilización de taludes
- ↗ Bordo libre
- ↗ Ancho de la corona
- ↗ Cimentación
- ↗ Filtros y drenes
- ↗ Geometría de los bordos
- ↗ Protección contra oleaje y, erosión

##### 4.2.4.1 Selección del material

El bordo puede construirse, con muy diversos materiales. Si el suelo excavado es de calidad adecuada, el material extraído puede emplearse. Cuando no, es el caso, se debe usar material de bancos de préstamo lo que incrementa el costo de la obra. Si la laguna va a ser impermeabilizada con un revestimiento continuo el material puede ser incluso permeable. Para bordos sin revestimiento impermeable, los materiales deben seleccionarse tomando en cuenta su clasificación dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Marshal y

Reséndiz, 1975) y su correspondiente susceptibilidad a diferentes procesos que pueden afectar el comportamiento del bordo en particular la erosión y el agrietamiento. Es conveniente evitar el uso de materiales orgánicos, erosionables o demasiado plásticos.

#### 4.2.4.2 Ancho de la corona

La corona de los bordos no debe tener un ancho menor que el requerido para que el equipo de compactación pueda trabajar en buenas condiciones (generalmente más de 3 m). Además, debe ajustarse a las necesidades de tránsito para la operación de las lagunas. El ancho fútil no incluye los sobre espesores de material sin compactar que suelen agregarse a la sección de proyecto, ni la protección contra oleaje. Conviene ser generoso en la selección del ancho para evitar accidentes, durante y después de la construcción.

En cuanto al asentamiento de la corona, éste depende del tipo de material empleado para la cimentación y para la construcción del bordo y es función de la posibilidad de llegar a la saturación de los mismos. El asentamiento se estima con las técnicas usuales de mecánicas de suelos o mediante relaciones empíricas.

#### 4.2.4.3 Bordo libre

El bordo libre es la distancia vertical entre el nivel de la corona y el nivel máximo normal del líquido. Con excepción del caso de los vasos reguladores, la definición del bordo libre no depende de eventuales avenidas máximas puesto que la alimentación de la laguna es función de la capacidad hidráulica del sistema de drenaje que sirve, y que se alimentan, en gran número de casos, por bombeo. Por otra parte, las lluvias, por abundantes y prolongadas que sean, solamente pueden provocar una elevación de nivel del orden de algunos centímetros. Generalmente, es suficiente tomar en cuenta los conceptos siguientes:

Sobre elevación del agua causada por el viento al actuar sobre el área de almacenamiento. Depende de la dimensión del área expuesta en dirección del viento hacia el bordo (fetch) y de la profundidad media de la laguna. En las lagunas artificiales, la definición del fetch se enfrenta a la dificultad de evaluar la protección contra el viento que proporciona el bordo perimetral. Es conveniente ser conservador en este aspecto y, salvo estudios especiales, considerar como fetch la longitud total de la laguna en la dirección del viento. Por lo general, las lagunas menores a 2 ha no están expuestas a la acción del viento.

- Altura de rodamiento de las olas sobre el talud arriba del nivel de agua de referencia. Esta altura es del orden de la ola máxima (cresta a valle) para bordos con protección pétreo y con taludes de 2 a 3 horizontal por 1 vertical, pero puede alcanzar el doble para superficies lisas, en particular, con revestimientos sintéticos.
- Margen de seguridad En el caso de lagunas, artificiales el margen de seguridad puede ser menor que para bordos tradicionales sometidos a

avenidas de difícil predicción; sin embargo, debe tomarse en cuenta la profundidad de agrietamiento por secado. Generalmente, un valor del orden de 50 cm es el mínimo margen de seguridad aceptable.

El bordo libre respecto a la altura máxima de operación de la laguna debe ser igual a la suma de las cuatro magnitudes, anteriores. Si, el valor obtenido, conduce a grandes volúmenes de terracer las, es conveniente evaluar las ventajas ecofirnicas que puede presentar emplear un deflector de olas, por lo menos en las zonas más expuestas.

#### 4.2.4.4 Estabilidad de taludes

La estabilidad de los taludes de los bordos perimetrales no plantea generalmente problemas serios puesto que los terraplenes son de poca altura. Además, la pendiente de los taludes queda frecuentemente definida por el tipo de cimentación o de revestimiento con el que se recubren más que por consideraciones de estabilidad del bordo. Es conveniente que, en todos los casos, se revise el factor de seguridad de los taludes para las condiciones más críticas previsibles y en particular para la condición de vaciado rápido que podría presentarse en caso de emergencia. Lo anterior es particularmente cierto si se usan materiales blandos con alto grado de saturación para la construcción, lo que aders no es recomendable por la posibilidad de agrietamiento y asentamientos excesivos.

#### 4.2.4.5 Cimentación

Es importante verificar la posibilidad de falla por deslizamiento a lo largo de una superficie que pase, por un estrato de material de baja resistencia de la cimentación. Conviene tomar en cuenta que la presencia de un almacenamiento, del agua puede reblandecer (por saturación) materiales que, en estado seco, presentan una alta resistencia. Es necesario revisar adernfis la posibilidad de falla por tubificación del suelo de cimentación.

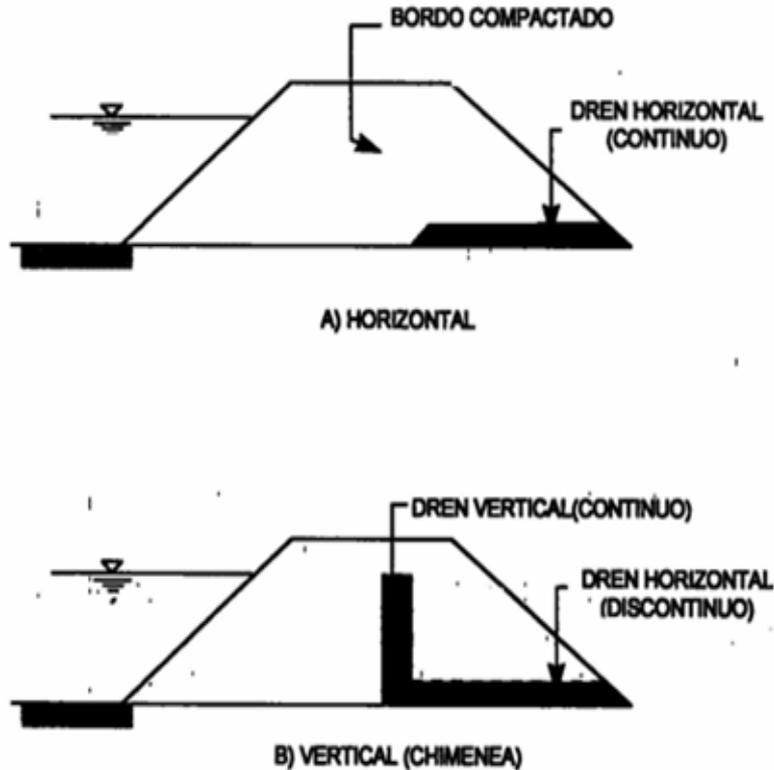
#### 4.2.4.6 Filtros y drenes

La incorporación de un filtro dentro del cuerpo del terraplén es una precaución costosa, pero justificada en los siguientes casos:

- Si existe peligro de agrietamiento vertical por asentamientos diferenciales debidos a la compresibilidad y heterogeneidad de la cimentación.
- Si los materiales constitutivos del bordo son erosionables o dispersivos.

En ambos casos, la función del filtro es evitar que el agua infiltrada alcance a salir por el talud seco del bordo y se inicie un proceso de erosión directa o regresiva (tubificación). El material empleado para el filtro puede ser una arena para concreto (ASTM C 33) si el cuerpo del bordo es de arcilla; o una arena para asfalto si el material es limoso. Los tipos de filtros más comunes son los que se presentan en la Figura 4.15, donde el (A) es el mds económico y fácil de construir;

pero su eficiencia para abatir la línea superior de flujo depende de la relación entre permeabilidad horizontal y vertical obtenida en el cuerpo del bordo, la que puede ser muy sensible a defectos en el procedimiento constructivo y en particular, a una deficiente liga entre capas compactadas.



**Figura 4.15 Filtros usuales en bordos de lagunas de estabilización**

La chimenea vertical (Figura 4.15, B) presenta mayor probabilidad de un buen comportamiento puesto que interrumpe, necesariamente, el flujo del agua. Para que pueda ser construida en buenas condiciones, su ancho debe ser mayor a 60 cm. Es necesario evitar la contaminación de la arena con el material más fino del terraplén. Generalmente, la arena se compacta por vibración en seco o en estado totalmente saturado. La chimenea de arena debe combinarse con un sistema de drenaje que conduzca el agua infiltrada hacia el exterior. Este sistema puede consistir en tramos de filtros horizontales ligados a la chimenea o en tubos de concreto perforados. Esta última solución debe evitarse si se cuenta con suficiente material granular, debido al peligro de ruptura de los tubos enterrados.

#### 4.2.4.7 Protección contra oleaje y erosión

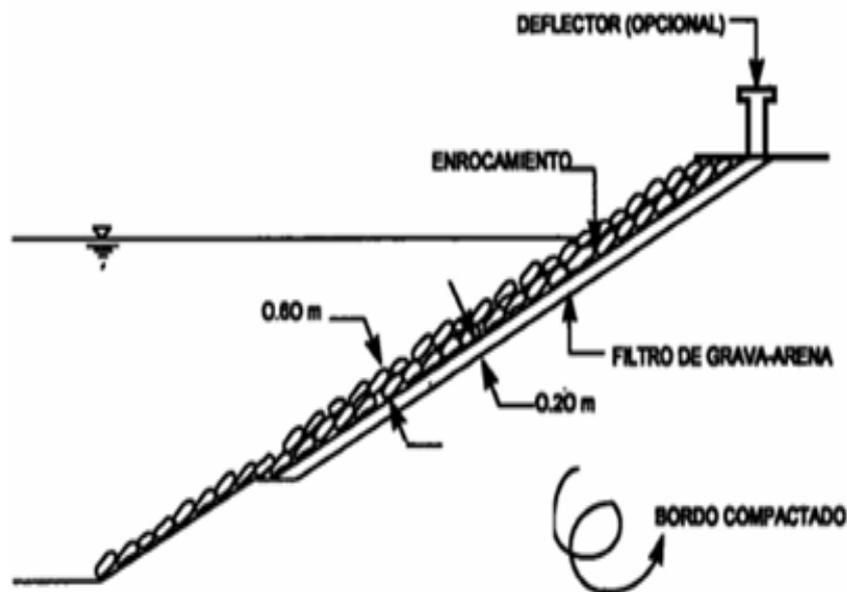
La protección contra la erosión debe ser considerada en todas las pendientes y dar un mayor énfasis a las áreas donde se tiene los vientos dominantes y que por tanto, reciben además la fuerza del oleaje. La protección debe abarcar por lo menos 0.3 m por debajo del nivel mínimo del agua y 0.3 m por arriba del nivel máximo del agua. Para el control de la erosión es necesario:

- ↗ Minimizar la energía de las ondas
- ↗ Reducir el impacto de las gotas de lluvia en el suelo compactado
- ↗ Incrementar la resistencia a la erosión del suelo compactado

Las técnicas comunes para controlar la erosión incluyen:

- Cubrir con vegetación, se debe considerar el tipo de plantas, la pendiente del suelo y el espesor de suelo superficial
- Emplear revestimientos, pueden ser de asfalto, concreto ó membranas sintéticas
- Usar rompeolas,

La protección con enrocamiento es la más común en el caso de bordos no revestidos, aunque generan roedores y crecimiento excesivo de vegetación. La dimensión de las rocas y el espesor de la protección dependen de la pendiente del talud y de la altura de la ola máxima, esperada. Generalmente, la protección pétreo se coloca sobre un filtro de material granular más fino que retiene el suelo compactado del bordo y queda a su vez retenido por el enrocamiento (Figura 4.16).



**Figura 4.16 Ejemplo de protección contra oleaje por enrocamiento**

Los bordos pueden también protegerse contra la erosión con suelo-cemento. Se usan generalmente suelos arenosos con 10 a 25 % de finos en espesores no menores de 60 cm perpendicularmente al talud. Se han construido inclusive bordos completos con suelo-cemento. También es posible emplear protecciones a base de concreto hidráulico o asfáltico semejantes a las usadas para revestimiento de canales.

Algunos bordos, recubiertos con una membrana sintética impermeable, se encuentran parcialmente protegidos contra erosión y oleaje. Este último puede llegar a maltratar mecánicamente, las membranas delgadas, y contribuir a romperlas junto con los agentes ambientales (radiación solar, viento, etc.) y los residuos sólidos flotantes. En general, es conveniente prever en el diseño una: protección complementaria a base de material granular (grava o enrocamiento), concreto hidráulico o asfáltico.

Como ejemplo, podemos citar la experiencia en el lago Nabor Carrillo. Este lago, de 900 ha, fue desarrollado provocando un asentamiento de la superficie del terreno por bombeo y construyendo un bordo perimetral para complementar el almacenamiento requerido. En la Figura 4.17, se presenta la sección transversal del bordo perimetral y una vista en planta del mismo, destacando los aspectos siguientes:

- El bordo es de sección homogénea modificada
- Se incluyó en la sección un filtro vertical de arena de 60 cm. de ancho. Esta chimenea se considero necesaria debido. a la baja plasticidad de algunos de los materiales usados para la construcción del terraplón y sobre todo, previendo la posibilidad, de, asentamientos diferenciales que pudieran inducir el agrietamiento del bordo.
- El drenaje del filtro vertical se libra con filtros horizontales de grava de 0.50 m de ancho y 0.80 m de espesor, espaciados a cada 20 m.
- La protección contra oleaje se diseño combinando una capa de enrocamiento, un filtro de grava y, debido a la escasez de arena, una malla filtrante de poliéster.

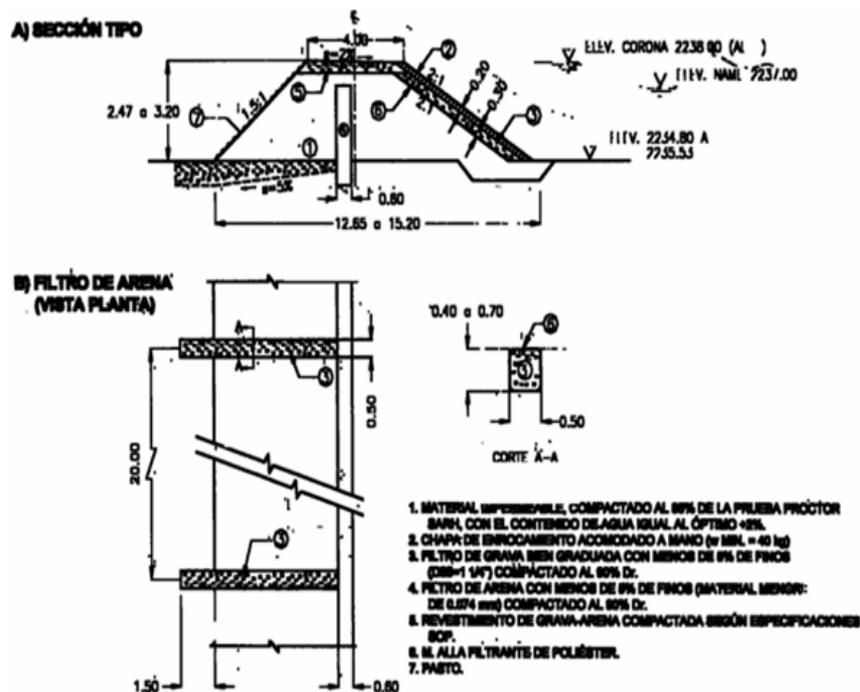


Figura 4.17 Bordo del Lago Nabor Carrillo, 900 ha

#### 4.2.4.8 Geometría de los bordos

Por lo general, las pendientes de los taludes de los bordos se definen en función de la naturaleza del suelo y del tamaño de la instalación. La selección de la pendiente depende del material del bordo y la protección contra la erosión del agua.

Los bordos deben tener una pendiente no mayor de 1 sobre la horizontal y 3 sobre la vertical cuando el suelo es estable y pueden ser altamente compactados para evitar fallas. En ocasiones, se especifican pendientes de 1:5 para instalaciones de gran tamaño.

#### 4.3. OBRAS DE DETALLE

Las lagunas cuentan con diversas obras auxiliares que garantizan su adecuado funcionamiento, como obras de entrada, interconexiones hidráulicas, obras de salida, aliviadero general (by-pass) y, en ocasiones, cárcamos de bombeo. En el capítulo 5 se ilustra estas obras con mayor detalle.

##### 4.3.1. Estructura de entrada

La mayoría de las lagunas son construidas con una sola entrada, localizada cerca del centro del tanque. A pesar de ello, se ha demostrado que los arreglos con múltiples entradas permiten alcanzar una mejor distribución hidráulica y, por tanto, una mejor operación. Sobretudo en las lagunas facultativas, ya que distribuyen los sólidos sedimentables sobre un área mayor (Figura 4.18). Para aumentar la flexibilidad, las entradas pueden ser móviles.

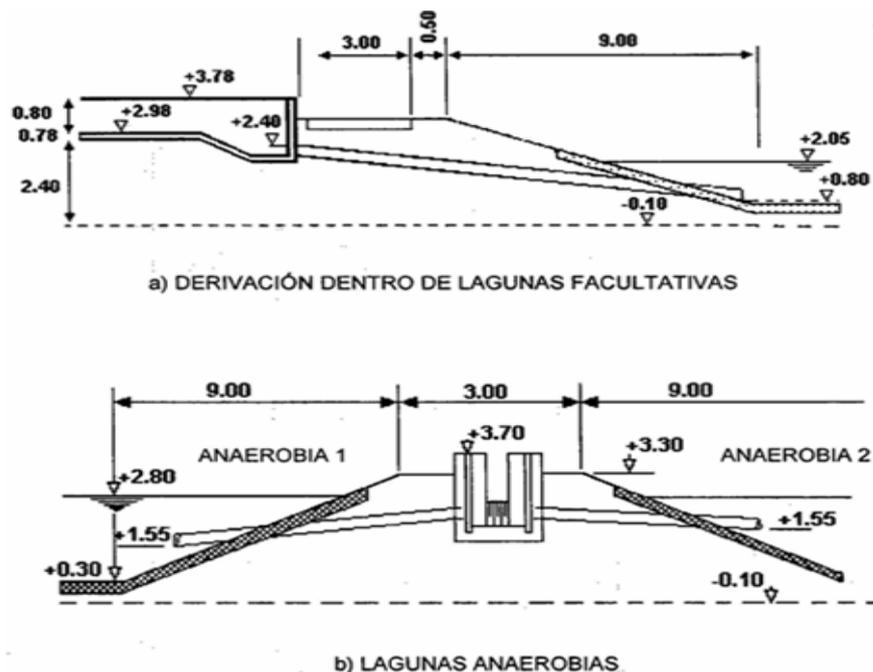


Figura 4.18 Estructuras de entrada

Para la la alimentación es conveniente construir una pequeña estructura cuya función es impedir la erosión de los bordos o del fondo de la laguna bajo el efecto del chorro de la descarga. Esta estructura puede ser desde una simple protección local, de enrocamiento o concreto, hasta un cárcamo con vertedor que permita mantener constante el nivel de descarga y con ello haga posible, que las bombas trabajen en condiciones constantes de carga hidráulica.

#### 4.3.2. Cárcamo de bombeo

Es preferible que las tuberías del sistema de bombeo no pasen a través del bordo perimetral abajo del nivel del almacenamiento. Numerosas fallas han sido registradas debido a filtraciones y erosión en el contacto entre tubería y terraplón.

#### 4.3.3. Estructuras de salida

La salida se debe colocar lo más alejado posible, de la entrada y debe estar por debajo del nivel del agua fluyendo, a una velocidad menor de 0.3 m/s (Figura 4.19). Debe construirse de tal manera que sea fácil el mantenimiento. Durante el invierno, la descarga debe estar justo por debajo del nivel del agua.

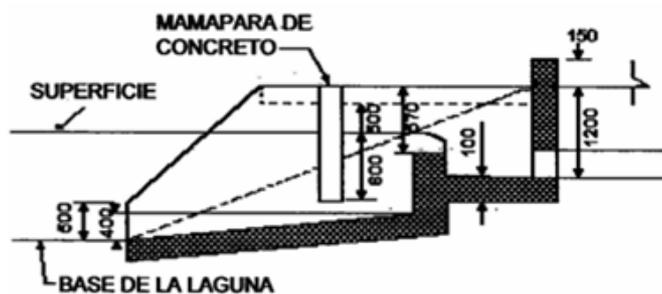


Figura 4.19 Estructura de salida

#### 4.3.4. Obra de purga

Las lagunas de cierta importancia deben contar con una obra de vaciado, que permita purgarlas para, su mantenimiento y/o para evacuar rápidamente el fluido almacenado en condiciones controladas en caso de falla de un bordo, o de otro tipo de emergencia. El gasto que debe poder pasar por esta obra es el máximo compatible con la capacidad de absorción del sistema hacia el cual se descarga el fluido (drenaje, río, etc.). Siempre debe analizarse con cuidado las consecuencias que tendría un vaciado de emergencia, en particular el impacto humano y ecológico (inundación, contaminación, etc.). Para evitar la posibilidad de derrames incontrolados, es necesario prever canales o tuberías para canalizar el flujo hacia el sistema receptor. Las lagunas impermeabilizadas con una membrana sintética cuentan generalmente con una válvula de fondo para, extracción de sedimentos que se pueden usar como purga.

Las estructuras de sobre flujo se comparan con los aliviaderos de las alcantarillas. Es fácil mantener el nivel de operación seleccionado para la laguna empleando



## 5.EJEMPLO DE DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Este capítulo se divide en dos partes. La primera, describe las bases bajo las cuales se hará el diseño de un sistema lagunar para el tratamiento del agua residual, mientras que la segunda presenta el empleo de los datos de la primera parte, las ecuaciones de diseño vistas en el Capítulo 3 y los requerimientos constructivos analizados en el Capítulo 4.

### 5.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se requiere diseñar un sistema de tratamiento para una ciudad de 18,750 habitantes para los próximos 20 años. El efluente debe cumplir con las normas de descarga a un cuerpo receptor que se usa para riego. Con estos datos defina lo siguiente:

- a) Información requerida (datos de diseño y restricciones).
- b) Diseño del tratamiento considerando al menos 3 opciones de sistemas lagunares.
- c) Comparación del diseño para la remoción de coliformes fecales obtenido al emplear los métodos de Yáñez y el de Marais.
- d) Comparación de los resultados obtenidos con las tres opciones de sistemas.
- e) Elaboración de planos base.

### 5.2.INFORMACIÓN REQUERIDA

#### 5.2.1.Datos de diseño

##### 5.2.1.1Número de habitantes

Con el objeto de que la planta cumpla con la vida útil establecida, se calcula el crecimiento de la población para los próximos 20 años. Para ello se empleó la tasa anual de crecimiento que de acuerdo con el INEGI es de 2.8 % anual. Como es una población en desarrollo se supone que esta tasa será mantenida por 20 años. La población anual calculada se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Proyección de la población en desarrollo con una tabla de 2.80%**

AÑO	FECHA	NÚMERO DE HABITANTES
0	1996	18,765
1	1997	19,290
2	1998	19,831
3	1999	20,386
4	2000	20,957
5	2001	21,543
6	2002	22,147
7	2003	22,767
8	2004	23,404
9	2005	24,060
10	2006	24,733
11	2007	25,426
12	2008	26,138
13	2009	26,869
14	2010	27,622
15	2011	28,395
16	2012	29,190
17	2013	30,008
18	2014	30,848
19	2015	31,712
20	2016	32,599

Por tanto, la planta de tratamiento se debe diseñar para una población de 32,599 habitantes.

#### 5.2.1.2 Cálculo del agua por tratar

Tomando en cuenta que la dotación de agua para la población es de 200 l/hab.d y que de ello se capta el 80 %, que es una estimación alta, el gasto por tratar para la población proyectada se muestra en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2 Gasto a tratar para la población estimada**

AÑO	FECHA	NÚMERO DE HABITANTES	DOTACIÓN		Q	APORTACIÓN
			Q	Q		
			l/s	MI/S	Us	MI/S
0	1996	18,765	49.87	0.050	34.75	0.035
1	1997	19,290	51.27	0.051	35.72	0A36
2	1998	19,831	52.70	0.053	36.72	0.037
3	1999	20,386	54.18	0.054	37.75	0.038
4	2000	20,957	55.69	0.056	38.81	0.039
5	2001	21,543	43.44	0.043	39.89	0.040
6	2002	22,147	44.65	0.045	41.01	0.041
7	2003	22,767	45.90	0.046	42.16	0.042
8	2004	23,404	47.19	0.047	43.34	0.043
9	2005	24,060	48.51	0.049	44.56	0.045
10	2006	24,733	57.25	0.057	45.80	0.046
11	2007	25,426	58.86	0.059	47.09	0.047
12	2008	26,138	60.50	0.061	48.40	0.048
13	2009	26,869	62.13	0.062	49.76	0.050
14	2010	27,622	63.94	0.064	51.15	0.051
15	2011	28,395	65.73	0.066	52.58	0.053
16	2012	29,190	67.57	0.068	54.06	0.054
17	2013	30,008	69.46	0.076	55.57	0.056
18	2014	30,848.	71.40	0.071	57.13	0.057
19	2015	31,712	73.41	0.073	58.73	0.059
20	2016	32,599	75.46	0.076	60.37	0.060

De esta manera, el gasto de diseño resulta de 60 l/s. Para establecer el gasto máximo se emplea un factor pico de 2.45, por lo que el caudal máximo a tratar será de 147 l/s.

### 5.2.1.3 Calidad del agua

Se decidió efectuar cuatro muestreos: dos en época de lluvias y dos en época de estiaje. Todos en el colector principal de la población encontrando los valores de la Tabla 5.3. Observe que para este caso se tuvo la suerte de que en un solo colector saliese el total del agua generada. Si esto no hubiese ocurrido se debería haber muestreado en varios puntos considerando el gasto en cada uno para obtener con, un promedio ponderado la calidad del agua que se tendría a la entrada de la planta.

En la Tabla 5.3 se muestra la calidad típica del agua residual doméstica. En comparación con ella el agua del ejemplo resulta similar con una concentración de sólidos sedimentables inferior. Adicionalmente, se pudo comprobar que la concentración de metales es tal que no habrá inhibición del proceso biológico y que la relación DQO:N:P de 100:5:1 necesaria para procesos biológicos se cumple. Se puede observar, además, que la relación entre la DQO y la DBO es

del orden de 1.5, lo que indica que se trata de un agua típicamente doméstica y biodegradable.

**Tabla 5.3 Caracterización del agua residual**

PARAMETROS	UNIDAD	AGUA RESIDUAL	AGUA RESIDUAL TÍPICA DE FUERZA MEDIA <sup>(1)</sup>
PH		7.28	
Conductividad	μS/cm	1,167	
DBO <sub>5</sub>	mg/l	254	220
DBO total	mg/l	300	
DBO <sub>5</sub>	mg/l	381	
DQO total	mg/l	450	500
ST	mg/l		720
SDT	mg/l		
SST	mg/l	208	300
Sólidos sedimentables	ml/l	10	10
Nitrógeno total	mg/l	35	40
Fósforo total,	mg/l	9	8
Aluminio	mg/l	1.91	
Arsénico	mg/l	0.0005	
Boro	mg/l	0.670	
Cadmio	mg/l	<0.01	< 0.02
Cianuros	mg/l	0.008	
Cobre	mg/l	0.063	0.10
Cromo total	mg/l	0.001	< 0.05
Fierro	mg/l	3.74	
Fluoruro	mg/l	0.365	
Manganeso	mg/l	1.300	
Níquel	mg/l	0.036	< 0.10
Plomo	mg/l	0.093	< 0.02
Selenio	mg/l	<0.1	
Zinc	mg/l	0.133	0.12
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1.82E+07	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
Huevos de helmintos	H/l	600	

(1) Metcalf y Eddy, 1991

El costo de efectuar los análisis requeridos para la caracterización anterior se muestra en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.4 Costo de la caracterización del agua residual**

PARAMETROS	NO. DE DETERMINACIONES	COSTO UNITARIO \$/MUESTRA <sup>(1)</sup>	COSTO TOTAL
Ph	4	25	100
Conductividad	4	35	140
DBO	4	75	300
SST	4	60	240
Aluminio*	4	60	240
Arsénico*	4	85	340
Boro*	4	\$0	320
Cadmio*	4	85	340
Cianuros*	4	95	380
Cobre*	4		
Cromo total*	4	60	240
Fierró*	4	60	240
Fluoruro*.	4	70	280
Manganeso*	4	60	240
Niquel*	4	60	240
Plomo*	4	60	240
Selenio*	4	85	340
Zinc*	4	60	240
Coliformes fecales.	4	110	440
Huevos de helmintos	4	750	3000
			6,880

\* Sólo se muestrean en la caracterización inicial y en caso de digestión el doble. Se debe muestrear en la caracterización inicial y una vez que opere normalmente el sistema.

(1) Precios a enero del, 1996

### Información climatológica

A partir de datos del INEGI se obtiene la siguiente información para la población en estudio,

Evaporación total anual	2,023.5 mm
Precipitación total anual	529.5 mm
Temperatura del mes más frío	14.9 °C

#### 5.2.2. Restricciones al diseño

##### 5.2.2.1 Factibilidad técnica

Se dispone de terreno suficiente; sin embargo, éste tiene un valor productivo alto como área agrícola por lo que es necesario analizar varias opciones de sistemas

de lagunas para determinar la de menor requerimiento de área. Además, se desea recuperar el agua para riego de la zona.

#### 5.2.2.2 Esquema de construcción

Debido a la situación financiera del país, no es conveniente obligar a la población al pago de infraestructura ociosa, por lo que se recomienda se diseñe el sistema para la población estimada en el año 2016, pero que la construcción sea por módulos. Esto permite además, que en este caso de que la tasa de crecimiento de población varíe (recuerde que se empleó un valor constante), se efectúen los ajustes necesarios.

Para el esquema de construcción de la planta de tratamiento se consideran dos opciones: 3 módulos de 20 l/s ó 4 de 15 l/s. En ambos casos se construirán dos módulos iniciales para tener flexibilidad de operación y los restantes cada que se requieran hasta alcanzar la capacidad de proyecto, a los 20 años. Estas opciones se presentan en la Tabla 5.5 y la Figura 5.1.

**Tabla 5.7 Construcción de módulos con base en el incremento de la población**

AÑO	NÚMERO DE HABITANTES	PRODUCCIÓN DE AGUAS RESIDUALES, LPS	3 MODULOS DE 20 LPS C/U	4 MÓDULOS DE 15 LPS C/U
1996	18,765	35	40	45
1997	19,290	36	40	45
1998	19,831	37	40	45
1999	20,386	38	40	45
2000	20,957	39	40	45
2001	21,543	40	40	45
2002	22,147	41	40	45
2003	22,767	42	40	45
2004	23,404	43	60	45
2005	24,060	45	60	43
2006	24,733	46	60	45
2007	25,426	47	60	45
2008	26,138	48	60	60
2009	26,869	50	60	60
2010	27,622	51	60	60
2011	28,395	53	60	60
2012	29,190	54	60	60
2013	30,008	56	60	60
2014	30,848	57	60	60
2015	31,712	59	60	60
2016	32,599	60	60	60

Se escoge la modulación de 20 l/s ya que es la que requiere menor inversión de capital al disminuir los requerimientos por obra civil.

En resumen, se construirán tres módulos de 20 l/s cada uno y con una capacidad total de 60 l/s.

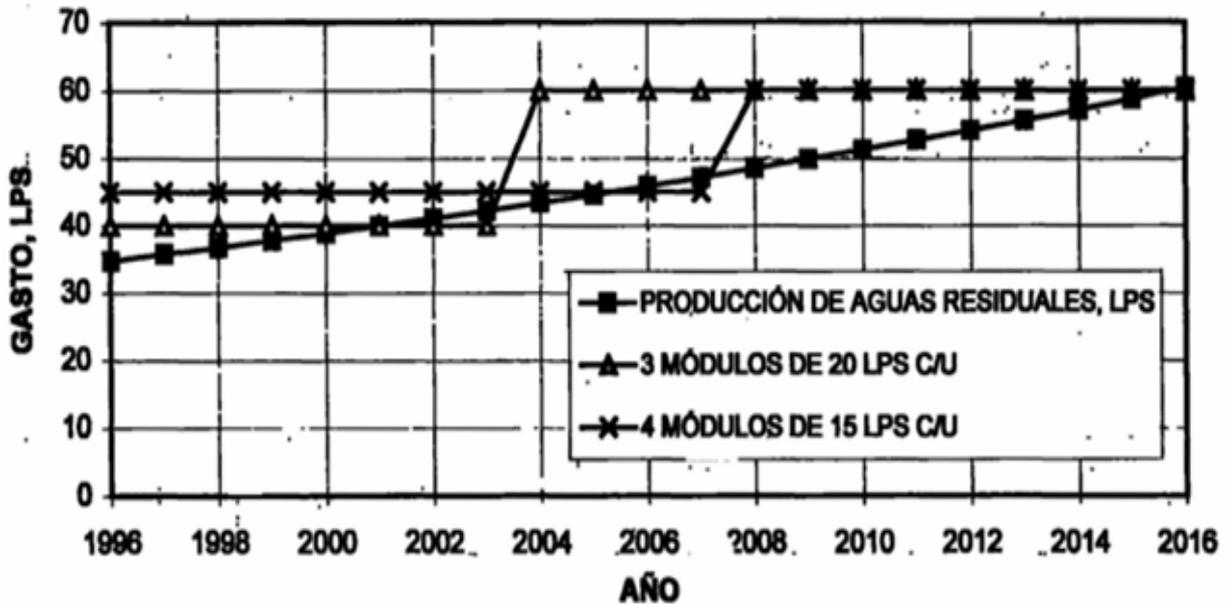


Figura 5.1 Producción de agua residual por su tratamiento mediante módulos

### 5.2.2.3 Legislación

La calidad del agua que se debe obtener es función de la legislación vigente, para ello se aplica la NOM-CCA-032-ECOL/1993 y la NOM-CCA-033-ECOL/1993 por lo que se hará una comparación con ellas. Además, debido a que está por entrar en vigor la NOM-001-ECOL/1996, resulta conveniente introducir también la evaluación de ésta.

- ⇒ NOM-CCA-032-ECOL/1993.-Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su, disposición mediante riego agrícola. LA Tabla 5.6 muestra dichos parámetros y los compara con los del ejemplo.

**Tabla 5.6 Comparación entre el agua residual por tratar y la norma para disposición mediante riego**

PARAMETRO	UNIDAD	NORMA-CCA-032ECOL/93	AGUA RESIDUAL (ejemplo)
pH		6.5 A 8.5	7.28
Conductividad	μS/cm	2,000	1,167
DBOT	mg/l	120	254*
SST	mg/l	120	208*
Aluminio	mg/l	5.0	1.91
Arsénico	mg/l	0.1	0.0005
Boro	mg/l	1.5	0.670
Cadmio	mg/l	0.01	<0.01
Cianuros	mg/l	0.02	0.008
Cobre	mg/l	0.2	0.063
Cromo total	mg/l	0.1	0.001
Fierro	mg/l	5.0	3.74
Fluoruro	mg/l	3.0	0.365
Manganeso	mg/l	0.2	0.130
Níquel	mg/l	0.2	0.036
Plomo	mg/l	5.0	0.093
Selenio	mg/l	0.02	<0.1
Zinc	mg/l	2.0	0.133

\* valores que exceden la norma

Para cumplir esta norma sólo se requiere eliminar la DBO en 52 % y los SST en 42 %. La presencia de metales no implica ningún problema de inhibición del sistema biológico ya que se encuentra entre los límites establecidos por la normatividad.

↪ NOM-CCA-033-ECOL/1993. Con respecto a esta norma se elige la situación más drástica con el objeto de encontrar las condiciones bacteriológicas para emplear el agua residual tratada para riego de hortalizas y productos hortofrutícolas, que son los de mayor rendimiento económico. La Tabla 5.7 muestra esta comparación.

**Tabla 5.7 Agua tipo 2 para control de riego agrícola**

PARAMETRO	UNIDAD	NOM-CCA-033-ECOL/1993	AGUA RESIDUAL
Coliformes fecales	NMP/100 ml	< 1,000	1.82E+07
Huevos de helmintos	H/L	<1	600

De esta Tabla se infiere que las eficiencias requeridas son de 99.995 % para coliformes fecales y de 99.83 % para huevos de helmintos.

⇒ NOM-001-ECOL-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales para la protección de su calidad y posibilitar sus usos. La Tabla 5.8 muestra los parámetros requeridos para riego agrícola.

**Tabla 5.8 Parámetros considerados para la descarga en riego agrícola**

PARAMETROS mg/l excepto donde se indique	NOM-001-ECOL-1996		AGUA RESIDUAL (ejemplo)
	SUELO		
	P.M.	P.D.	
Temperatura, °C	NA	NA	
Grasas y aceites	15	25	
Materia Flotante	Ausente	ausente	
Sólidos sedimentables, ml/L	1	2	
Sólidos suspendidos totales	NA	NA	208
DQO,	NA	NA	450
NTK	NA	NA	35
Fósforo total	NA	NA	10
Arsénico	0.2	0.4	0.0005
Cadmio	0.2	0.4	<0.01
Cianuro	2.0	3.0	0.008
Cobre	4.0	6.0	0.063
Cromo	0.5	1.0	0.001
Mercurio	0.005	0.01	
Niquel	2.0	4.0	0.036
Plomo	0.2	0.4	0.093
Zinc	10	20	0.133
Coliformes fecales, NMP/100 ml	1000	2000	1.82E+07
Hums de helmintos, H/L	Riego restringido: 5 Riego irrestricto: 1		600

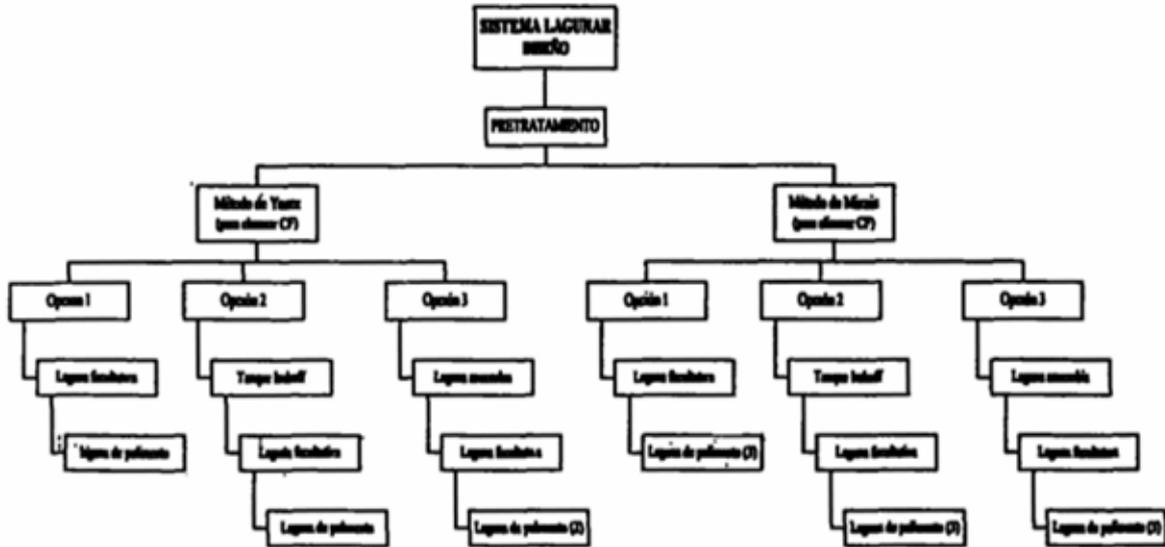
En conclusión de esta futura norma, el agua debe ser tratada con fines de desinfección (remoción de coliformes fecales y de huevos de helmintos) físicamente ya que no hay interferencia por metales, materia orgánica ó sólidos.

### 5.3.CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Se decide comparar tres trenes de proceso, Todos ellos cuentan con un sistema de, pretratamiento consistente en rejillas y desarenador. Los trenes son:

- Opción 1 Laguna facultativa + lagunas de pulimento
- Opción 2 Tanque Imhoff + laguna facultativa + lagunas de pulimento
- Opción 3 Laguna anaerobia + laguna facultativa + lagunas de pulimento

La Figura 5.2, presenta el diagrama de flujo de la manera en la que se abordará el ejemplo.



**Figura 5.2 Diagrama de flujo de la metodología que se empleará para diseño de las tres opciones**

### 5.3.1. Dimensionamiento del sistema común de pretratamiento

El pretratamiento consiste de un sistema de rejillas gruesas y un desarenador de control de velocidad con tres canales y es igual para las tres opciones que se analizarán.

#### 5.3.1.1 Rejillas

Se usarán de tipo de barras construidas en acero galvanizado y con pintura epóxica. Las características de, acuerdo con lo visto en el Capítulo 4 son las siguientes.

Ancho, mm	10
Espesor, mm	50
Espacio entre barras, mm	37.5
Inclinación, grados	45
Velocidad en el canal, m/s	0.45
Cantidad de material retenido, ml/m <sup>3</sup>	9.0
Pérdida de, carga máxima permisible, m	0.15
Area del canal	
Area, al 50% del gasto máximo	0.16 m <sup>2</sup>
Considere rando	6 barras
Ancho necesario	0.32 m
Tirante resultante	0.50 m
Bordo libre	0.25 m
Altura total del canal de rejillas	0.75 m
Largo total	2.26 m

## Subproductos

En las rejillas se retendrá diariamente un volumen de material de  $0.02 \text{ m}^3/\text{d}$  por módulo, el cual se dispondrá en el relleno sanitario de la localidad.

### 5.3.1.2 Desarenador

Se construirán tres canales adyacentes para tener uno de reserva. Dos canales trabajarán en paralelo y tendrán la capacidad de pasar el gasto máximo. Las características de acuerdo con el Capítulo 4 son las siguientes:

Tiempo de retención, s	60
Velocidad horizontal, m/s	0.3
Velocidad de sedimentación del material, m/s	0.0125
Longitud en exceso para la turbulencia	2 veces el tirante a 0.5 la longitud teórica
Producción de arena, $\text{mL}/\text{m}^3$	15
Ancho del canal a 50%, del gasto máximo	0.32 m
Área	$0.24 \text{ m}^2$
Tirante	0.76 m
Bordo libre	0.25 m
Altura total del desarenador	1.01 m
Tiempo de retención, s	60.57
Longitud	18.17 m
Longitud en exceso	9.09 m
Longitud total	27.26 m

## Subproductos

La producción de arena es de  $0.03 \text{ m}^3/\text{d}$  por módulo y se dispondrá en el relleno sanitario de la localidad; en caso de no existir un relleno se dispone cerca de la laguna en un terreno acondicionado para tal caso (impermeabilizado).

### 5.3.2. Datos físicos para el diseño de lagunas

La Tabla 5.9 resume los datos de diseño establecidos en las secciones anteriores para facilitar su manejo ya que se emplearán en el cálculo de, las tres opciones de tratamiento aplicando los métodos de Yáñez y Marais para la remoción de coliformes fecales.

**Tabla 5.9 Datos de diseño para los sistemas lagunares**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Número de módulos	3
Gasto del módulo, Q	20 L/s (1,728 m <sup>3</sup> /d)
Concentración de DBO, S <sub>i</sub>	254 mg/l (254 g/ m <sup>3</sup> )
Concentración de SST, X <sub>v</sub>	208 mg/l (208 g/ m <sup>3</sup> )
Coliformes fecales	1. 82E + 07 NMP/ 100ml
Huevos de helmintos	600 H/L
Evaporación anual	2023.5 mm
Precipitación anual	529.5 mm,
Temperatura del mes más frío	14.4 °C

#### 5.4.DIMENSIONAMIENTO DE LAS OPCIONES DE TRATAMIENTO EMPLEANDO EL MÉTODO DE YÁNEZ

##### 5.4.1.Opción 1 con el método de Yánez

A. Laguna facultativa Opción 1

La carga de diseño está dada por, la ecuación 54

$$C_s = 250 \cdot (1.085)^{T-20} = 250 \cdot (1.085)^{(14.4-20)} = 165 \text{ kgDBO} / \text{ha} \cdot \text{d}$$

Para estimar la carga removida de la laguna se emplean las correlaciones para lagunas facultativas primarias (ecuación 58)

$$C_{sr} = 0.8063 \cdot C_s + 7.67 = 0.8063 \cdot 165 + 7.67 = 140.6 \text{ kgDBO} / \text{ha} \cdot \text{d}$$

El área de la laguna se obtiene con la ecuación 55

$$A = \frac{S_i \cdot Q}{C_s \cdot (1000)} = \frac{254 \cdot 1728}{165 \cdot (1000)} = 2.66 \text{ ha}$$

Si se considera una profundidad de 2 m, el volumen de la laguna es

$$V = A \times h = 26600 \times 2 = 53200 \text{ m}^3$$

y, con una relación largo/ancho de 5, se tiene

$$L/W = X = \text{largo} / \text{ancho} = 5$$

de donde:

$$W = \sqrt{\frac{A}{X}} = \sqrt{\frac{26600}{5}} = 73.0m$$

y, por tanto

$$L = W \times X = 73.0 \times 5 = 365m$$

El tiempo de retención,  $\tau$ , se calcula a partir de la tasa de evaporación neta,  $e$ , de 4.09 mm/d

$$\tau = \frac{2 \cdot A \cdot h}{2 \cdot Q - 0.001 \cdot A \cdot e} = \frac{2(26600)2}{2(1728) - 0.001(26600)4.09} = 31.81d$$

### Remoción de coliformes fecales

El método de Yáñez toma en cuenta la forma de la laguna. Como en este caso las lagunas son alargadas, el diseño resultará en lagunas más pequeñas. La constante de remoción de coliformes fecales,  $k_{CF}$ , se calcula con ayuda de la ecuación 33.

$$k_{CF} = 0.841(1.07)^{(T-20)} = 0.841(1.07)^{(14.4-20)} = 0.60d^{-1}$$

La concentración de coliformes fecales a la salida de la laguna facultativa, está dada por la ecuación (34), considerando la relación (35) para la determinación del coeficiente de dispersión (Yáñez, 1993):

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392 \cdot X + 1.01460 \cdot X^2} = \frac{5}{-0.26118 + 0.25392(5) + 1.01460(5)^2} = 0.19$$

Este valor se sustituye en la ecuación 36 para obtener  $a$

$$a = \sqrt{1 + 4k_{CF}\tau d} = \sqrt{1 + 4(0.6)(31.81)(0.19)} = 3.92$$

y, con la ecuación 34 se tiene

$$CF_e = \frac{CF_i \times 4ae^{(1/2d)}}{(1+a)^2 \cdot e^{(a/2d)} - (1-a)^2 \cdot e^{(-a/2d)}} = 5 \times 10^3 \text{ NMP} / 100mL$$

## Condiciones del efluente

Finalmente, se evalúa la DBO soluble y total en el efluente, así como los sólidos y los coliformes a la salida de la laguna.

$$S_{es} = 1000 \cdot \frac{C_s \cdot A}{Q} = 1000 \cdot \frac{165 \cdot 26600}{1728} = 37.4 \text{ mg DBO} / L$$

$$S_{Te} = 2 \cdot C_{ss} = 2 \cdot (37.4) = 74.8 \text{ mg} / L$$

$$SST = 48.4 \text{ mg} / L$$

$$CF_e = 5 \times 10^3 \text{ NMP} / 100 \text{ ml}$$

La Tabla 5.10 muestra el resumen de los parámetros calculados para el diseño de la laguna facultativa.

**Tabla 5.10 Diseño de la laguna facultativa con el método de Yáñez**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga orgánica superficial, Carga removida en la laguna, Tiempo de retención, t	165 kg DBO/ha.d 140.64 kg DBO/ha.d 31.81 d
Area de la laguna Profundidad media, h Volumen de la laguna, V Ancho, W Largo, L Relación largo/ancho, X	2.66 ha 2m 53230 m <sup>3</sup> 73.00 m 365 m 5
Carga orgánica superficial soluble, C <sub>SS</sub> Carga orgánica superficial remanente, C <sub>SR</sub> Sólidos suspendidos totales, SST Coliformes fecales, CF <sub>e</sub>	37.4 mg/l 74.8 mg/l 48.14 mg/l 5 x 10 <sup>3</sup> NMP/100 ml
Tasa de evaporación neta, e Tiempo de retención, t	4.09 mm/d 31.81 d

### B. Laguna de pulimento

Para la laguna de pulimento se considera un tiempo de retención hidráulica de 9.5 d y una profundidad de 1.5 m a partir de la Tabla 3.15. De esta forma, se calcula el área de la laguna con la ecuación (4)

$$A_m = \frac{Q \cdot \tau}{h} = \frac{1728 \cdot 9.5}{1.5} = 1.09 \text{ ha}$$

Considerando una relación largo/ancho igual a 2, se calcula la longitud de la laguna tomando como base el ancho de la laguna facultativa, para formar un muro común y abatir los costos de obra

$$L = W \cdot X = 73 \cdot (2) = 146m$$

Se revisa la carga sobre la laguna de pulimento para evitar una sobrecarga

$$C_s = \frac{S_i \cdot Q}{Am} = \frac{0.0748 \cdot 1728}{1.090} = 118.6 \text{ kgDBO} / \text{ha} \cdot d$$

valor que resulta menor en un 75 % a la carga de la primer laguna, por lo que se asegura una buena operación.

### Remoción de coliformes fecales

Siguiendo el procedimiento empleado en el cálculo de remoción de coliformes fecales en la laguna facultativa se tiene:

Constante de remoción de coliformes fecales, $k_{CF}$	0.22
Coefficiente de dispersión hidraulica, $d$	0.45
Coefficiente $a$	6.02
Concentración de coliformes fecales, $CF_e$	10 NMP/100 ml

### Condiciones del efluente

La calidad del efluente para esta laguna es de:

$$C_{sr} = 0.765 \cdot C_s - 0.8 = 0.765 \cdot (118.06) - 0.8 = 89.52 \text{ kgDBO} / \text{ha} \cdot d$$

$$S_{se} = 1000 \cdot \frac{C_s \cdot Am}{Q} = 1000 \cdot \frac{118.06 \cdot (10900)}{1728} = 18.08 \text{ mgDBO} / L$$

$$S_{Te} = 2.3C_{ss} = 2.318.08 = 41.58 \text{ mg} / L$$

$$SST_e = 37.44 \text{ mg} / L$$

$$CF_e = 10 \text{ NMP} / 100 \text{ ml}$$

La Tabla 5.11 resume los valores de los parámetros de diseño de la laguna de pulimento.

**Tabla 5.11 Diseño de la laguna de pulimento con el método de Yáñez**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Tiempo de retención hidráulica, t	9.5 d
Concentración de DBO influente, S <sub>i</sub>	74.8 g/m <sup>3</sup>
Area de la laguna, A <sub>m</sub>	1.09 ha
Profundidad, h	1.5 m
Longitud, L	146 m
Ancho, W	73 m
Carga superficial corregida, C <sub>S</sub>	118.06 kgDBO/ha/d
Carga removida en la laguna C <sub>Sr</sub>	89.52 kg DBO/ha/d
Carga remanente soluble, C <sub>SS</sub>	18.08 mg/l
Carga remanente total, C <sub>SR</sub>	41.58 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	37.44 mg/l
Concentración de coliformes fecales, CF <sub>e</sub>	10 NMP/100 ml

Observe que en este caso, el tamaño de la laguna está regido por la carga máxima que puede aceptar la laguna sin haber sobrecarga ya que por el valor obtenido de 10 coliformes fecales por 100 ml. la laguna podría ser considerablemente menor para cumplir con la norma.

#### 5.4.1.1 Remoción de huevos de helmintos

Para la remoción de huevos de helmintos, el cálculo se basa en la ecuación de Yáñez (30) y se calcula para el efluente de la laguna facultativa y de pulimento (ver Tabla 3.15).

$$R_{HH} = 100 \left[ 1 - 0.4 \left( -0.38 \cdot \tau + 0.0085 \cdot \tau^2 \right) \right]$$

**Tabla 5.12 Concentración de huevos de helmintos para las lagunas de la opción 1**

LAGUNA	TIEMPO DE RETENCIÓN d	PORCENTAJE DE REMOCIÓN %	No. DE HUEVOS EN EL EFLUENTE H/L
Influente			600.00
Facultativa	31.81	100	0.00
Maduración	9.50	99	0.00

#### 5.4.1.2 Análisis de la Opción 1

La Tabla 5.13 muestra un resumen de los parámetros calculados para el diseño del sistema de tratamiento para la Opción 1.

**Tabla 5.13 Resumen del cálculo de los parámetros de diseño de la opción 1**

CONCEPTO	FACULTATIVA	PULIMENTO	TOTAL POR MÓDULO	TOTAL DE LA PLANTA
Número	1	1	2	6
Ancho, m	73.00	73.00		
Largo, m	364.59	149.92	514.51	
Profundidad, m	2.00	1.50		
Area neta, ha	2.66	1.09	3.76	11.27
Volumen, m <sup>3</sup>	53,230	16,416	69,646	208,939
Tiempo de retención, d	31.81	9.50	41.31	41.31
DBO soluble, mg/l	34.7	18.08		18.08
DBO total, mg/l	75	41.58		41.58
SST, mg/l	48.4	37.44		37.441
Coliformes fecales efluente, NMP/100 ml	5.37E+03	10		10
Huevos de helmintos, H/L	0.0	0.0		0.0

Este tren de tratamiento resulta en una concentración de coliformes fecales muy por debajo del valor de las normas. Asimismo, cumple con los límites establecidos para la DBO y SST.

#### 5.4.2.Opción 2 con el método de Yáñez

##### A. Dimensionamiento del tanque Imhoff, Opción 2

Los criterios de diseño para un tanque Imhoff son

Profundidad, m	3.5
Tasa superficial bruta, m/d	32
Relación largo/ancho	3:1 a 5:1
Concentración de sólidos en la purga de lodos, %	2.5
Remoción de DBO	32%
Remoción de SST	52%

La Tabla 5.14 muestra los datos de diseño para el tanque Imhoff

**Tabla 5.14 Diseño del tanque imhoff de la opción 2**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Area requerida	53 m <sup>2</sup>
Ancho	4.00 m
Largo	13.25 m
Relación largo/ancho	3.31
DBO remanente	173 mg/l
SST remanentes	100 mg/l

B. Laguna facultativa, Opción 2

Con base en el, cálculo de la sección 5.4.1, A, y para la concentración proveniente del tanque Imhoff, se tienen los resultados de la Tabla 5.15.

Al emplear el método de Yánez para la remoción de coliformes fecales, se tienen los siguientes resultados

Constante de remoción de coliformes fecales, $k_{CF}$	0.58
Coefficiente de dispersión hidráulica, $d$	0.27
Coefficiente $a$	3.83
Concentración de coliformes fecales en el efluente $CF_e$	58,348 NMP/100 ml

**Tabla 5.15 Diseño de la laguna facultativa de la opción 2 con el método de Yánez**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Concentración de la DBO a la laguna, $S_i$	173 mg/l
Concentración de los sólidos suspendidos, a la laguna, SST	100 mg/l
Carga orgánica superficial,	158 kg DBO/ha.d
Carga removida en la laguna,	135.32 kg DBO/ha.d
Tiempo de retención, $t$	22.32 d
Area de la laguna	1.89 ha
Profundidad media, $h$	2m
Volumen de la laguna, $V$	37704 m <sup>3</sup>
Ancho, $W$	73.00 m
Largo, $L$	258.24 m
Relación largo/ancho, $X$	3.5
Carga orgánica superficial soluble, $C_{SS}$	25.09 mg/l
Carga orgánica superficial remanente, $C_{SR}$	50.18 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	32.48 mg/l
Coliformes fecales, $CF_e$	5.8X 10 <sup>4</sup> NMP/100 ml

C. Laguna de pulimento.

Considerando un tiempo de retención de 14 días, el cual se encuentra en el intervalo de la Tabla 5.15 para este tipo de lagunas y siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 5.4.2, B, se obtienen los datos de la Tabla 5.16. En cuanto a la remoción de coliformes fecales por el método de Yánez se tiene los siguientes resultados

Constante de remoción de coliformes fecales, $k_{CF}$	0.58
Coefficiente de dispersión hidráulica, $d$	0.31
Coefficiente $a$	3.31
Concentración de coliformes fecales en el efluente, $CF_e$	988 NMP/100 ml

**Tabla 5.16 Diseño de la laguna de pulimento de la opción 2 con el método de Yáñez**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Area de la laguna, $A_m$	1.61 ha
Longitud, $L$	220.93 m
Ancho, $W$	73 m
Carga superficial corregida, $C_s$	53.76 kgDBO/ha/d
Carga removida en la laguna, $C_{sr}$	40.33 kg DB0/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{SS}$	12.154 mg/l
Carga remanente total, $C_{SR}$	28.84 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	25,97 mg/l
Concentración de coliformes fecales $CF_e$	988 NMP/100 ml

Observe que en este caso, la remoción de coliformes es la que domina el diseño de la laguna de pulimento.

#### 5.4.2.1 Remoción de huevos de helmintos

Empleando la ecuación (30) de Yáñez, se calcularon los valores de la Tabla 5.17.

**Tabla 5.17 Remoción de huevos de helmintos para la opción 2 con el método de Yáñez**

LAGUNA	TIEMPO DE RETENCIÓN $d$	PORCENTAJE DE REMOCIÓN	No. DE HUEVOS EN EL EFLUENTE H/L
Influyente			600.00
Facultativa	22.32	100 %	0.00
Maduración	14.00	100%	0.00

#### 5.4.2.2 Análisis de la Opción 2

La Tabla 5.18 muestra las características de diseño de la Opción 2 empleando el método de Yáñez para la remoción de coliformes fecales

**Tabla 5.18 Muestra las características de diseño para la opción 2 con el método de Yánez**

CONCEPTO	FACULTATIVA	PULIMENTO	TOTAL POR MODULO	TOTAL DE LA PLANTA
Número	1	1	2	6
Ancho, m	73.00	73.00		
Largo, m	258.24	220.93	479.18	
Profundidad, m,	2.00	1.50		
Area neta, ha	1.89	1.61	3.50	10.49
Volumen, m <sup>3</sup>	37,704	24,192	61,896	185,687
Tiempo de Retención, d	22.32	14.00	36.32	36.32
DBO total, mg/l	25.09	12.54		12.54
DBO soluble, mg/l	50	28.84		28.84
Sólidos suspendidos totales, SST	32.5	26		26
Coliformes fecales efluente, NMP/100 ml	5.83E+04	988		988
Hums de helmintos, H/L	0.0	0.00		0.00

Como puede observarse, en este caso el diseño se, rige por la eliminación de los coliformes fecales, la cual estd en el limite de la concentración establecida por la normatividad vigente.

#### 5.4.3.Opción 3 con el método de Yánez

##### A. Laguna anaerobia, Opción 3

Para estimar la carga orgánica volumétrica, se aplica la ecuación de Mara y Pearson

$$C_v = 20 \cdot T - 100 = 20 \cdot (14.4) - 100 = 188 \frac{g}{m^3 \cdot d}$$

mientras que el volumen se calcula mediante la ecuación 44

$$V = \frac{S_i \cdot Q}{C_v} = \frac{254 \cdot 1728}{188} = 2334 m^3$$

Si se considera una profundidad de 4 m (ver Tabla 3.15), se tiene

$$A_{an} = \frac{V}{h} = \frac{2334}{4} = 584 m^2$$

Pero, como además se debe considerar un volumen adicional por la acumulación de lodos generados por la población proyectada (40 L/hab/año) para los 20 años de vida útil. Por lo que se tiene

$$V_L = 40 \frac{L}{\text{hab/año}} \times 32599 \text{ hab/año} = 1303960L = 1303.96m^3$$

Así, considerando una profundidad adicional para el lodo de 0.78 m, el área total es de:

$$A_T = \frac{V}{h} = \frac{3638}{4.78} = 761m^2$$

Si X es igual a 3, entonces:

$$W = \sqrt{\frac{A_T}{X}} = \sqrt{\frac{761}{3}} = 15.92m$$

$$L = W \cdot X = 3(15.92) = 47.78m$$

La Tabla 5.19 muestra un resumen de los parámetros de diseño determinados para la construcción de la laguna anaerobia.

**Tabla 5.19 Diseño para la laguna anaerobia de la opción 3**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga volumétrica, $C_v$	188 g/m <sup>3</sup> d
Volumen total de la laguna, V	3638 m <sup>3</sup>
Area total de la laguna	761 m <sup>2</sup>
Profundidad, h	4.78
Relación largo/ancho, X	3
Ancho, W	15.92
Largo, L	47.78

#### B. Laguna facultativa

Para el cálculo de ésta laguna, se sigue el procedimiento de la sección 5.4.1, A, con la corrección de la carga orgánica renovada, ya que se trata de una laguna secundaria.

$$\text{Carga renovada en la laguna} \quad C_{sr} = 0.765 \cdot C_s - 0.8$$

La Tabla 5.20 presenta un resumen de los datos de diseño calculados para la construcción de la laguna facultativa. Con respecto a la remoción de coliformes fecales por el método de Yáñez, se tiene:

Constante de remoción de coliformes fecales, $k_{CF}$	0.60
Coefficiente de dispersión hidráulica, d	0.37
Coefficiente a	3.86
Concentración de coliformes fecales en el efluente, $CF_e$	2.5E+5
	NW/100ml

**Tala 5.20 Parametros de diseno de la laguna facultativa**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga orgánica superficial,	165 kg DBO/ha.d
Carga removida. en la laguna,	125 kg DBO/ha.d
Tiempo de retención, T	15.71 d
Area de la laguna	1.34 ha
Profundidad media, h	2 m
Volumen de la laguna, V	26,772 m <sup>3</sup>
Ancho, W	73.00 m
Largo, L	183.02 m
Relación largo/ancho, X	2.5
Carga orgánica superficial soluble, C <sub>SS</sub>	30.58 mg/l
Carga orgánica superficial remanente, C <sub>SR</sub>	61.17 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	39.60 mg/l
Coliformes fecales, CF <sub>e</sub>	2.5X10 <sup>5</sup> NMP/100 ml

C. Laguna de pulimento, Opción 3

Se considera la construcción de dos lagunas de pulimento de iguales dimensiones conectadas en serie:

Area, Am	1.04 ha
Profundidad, h	1.5 m
Ancho, W	73.00 m
Largo, L	142.03 m
Relación largo/ancho, X	2m

**Primera laguna de pulimento**

Considerando un tiempo de retención de 9 días, el cual se encuentra en el intervalo de la. Tabla 3.15 para este tipo de lagunas y siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 5.4.1, B, se tiene la Tabla 5.21

**Tabla 5.21 Diseño de la primer laguna de pulimento de la opción 3 con el método de Yáñez**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga superficial corregida, C <sub>S</sub>	101.94 kgDBOha/d
Carga removida en la laguna, C <sub>Sr</sub>	77.19 kg DBO/ha/d
Carga remanente soluble, C <sub>SS</sub>	14.85 mg/l
Carga remanente total, C <sub>SR</sub>	34.16 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	30.77 mg/l
Concentración de coliformes fecales, CF <sub>e</sub>	1.5E+04 NW/100 ml

La remoción de coliformes fecales por el método de Yáñez está dada por

Constante de remoción de coliformes fecales, $k_{CF}$	0.60
Coefficiente de dispersión hidráulica, $d$	0.48
Coefficiente $a$	3.35
Concentración de coliformes fecales en el efluente, $CF_e$	1.5E+04 NW1/100ml

### Segunda laguna de pulimento

Considerando un tiempo de retención de 9 días (igual que el de la primera laguna de pulimento) y siguiendo el mismo procedimiento que en la sección precedente para el cálculo del área (la geometría de la laguna es similar a la primera sólo cambia la carga orgánica que es de 34.16, gDBO/m<sup>3</sup>), se tienen los valores de la Tabla 5.22.

Para el cálculo de la remoción de coliformes fecales se obtuvieron los siguientes datos

Constante de remoción de coliformes fecales $k_{CF}$	0.60
Coefficiente de dispersión hidráulica, $d$	0.48
Coefficiente $a$	3.35
Concentración de coliformes fecales en el efluente, $CF_e$	92 NMP/100 ml

**Tabla 5.22 Datos de diseño para la construcción de la primera laguna de pulimento**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga superficial corregida, $C_s$	54.96 kgDBO/ha/d
Carga removida en la laguna, $C_{Sr}$	42.76 kg DBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{SS}$	8.51 mg/l
Carga remanente total, $C_{sR}$	19.57 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	17.62mg/l
Concentración de coliformes fecales, $CF_e$	92 NMP/100 ml

#### 5.4.3.1 Remoción de huevos de helmintos

Empleando la ecuación (30) de Yáñez y siguiendo el procedimiento del apartado 5.4.1.1, se construye la Tabla 5.23.

**Tabla 5.23 Remoción de huevos de helmintos en el sistema de la opción 3**

LAGUNA	TIEMPO DE RETENCIÓN $d$	PORCENTAJE DE REMOCIÓN	No. DE HUEVOS EN EL EFLUENTE H/L
Influyente			600.00
Facultativa	15.71	100%	0.10
Maduración 1	9.00	99%	0.00
Maduración 2,	9.00	99%	0.00

Como se observa, la concentración de huevos de helmintos está en el límite establecido por las normas para disposición en riego agrícola.

#### 5.4.3.2 Análisis de la Opción 3

La Tabla 5.24 muestra el resumen de los datos de diseño para la Opción 3.

**Tabla 5.24 Resumen de los datos de diseño para la opción 3**

CONCEPTO	ANAEROBIA	FACULTATIVA	PULIMENTO	TOTAL POR MODULO	TOTAL DE LA PLANTA
Número	1	1	2	4	12
Ancho, m	13.59	73.00	73.00		
Largo, m	40.77	183.02	142.03	507.85	
Profundidad, m	4.78	2.00	1.50		
Area neta, ha	0.06	1.34	1.04	3.47	10.40
Volumen, m <sup>3</sup>	2,217	26,722	15,552	60,042	180,127
Tiempo de retención, d	1.28	15.71	9A0	35.00	35.00
DBO total, mg/l	48.80	30.58	8.51		8.51
DBO soluble, mg/l	128	61.17	19.57		19.57
Sólidos suspendidos totales, mg/l	87.36	39.60	17.62		17.62
Coliformes fecales efluente, NW/100 ml	1.82E+07	253,390	923		923
Hums de helmintos, H/L		0.0	0.0		0.0

Es importante resaltar que la operación en serie de las lagunas de pulimento favorecen considerablemente la remoción de la materia orgánica biodegradable (DBO) y de los SST; observe que, pese a cumplir con los lineamientos para la concentración de coliformes fecales en el efluente, la eficiencia están sólo del 99.6 %, valor que podría esperarse mayor por la operación en serie.

#### 5.4.4. Conclusión del dimensionamiento con el método de Yáñez para remoción de coliformes fecales

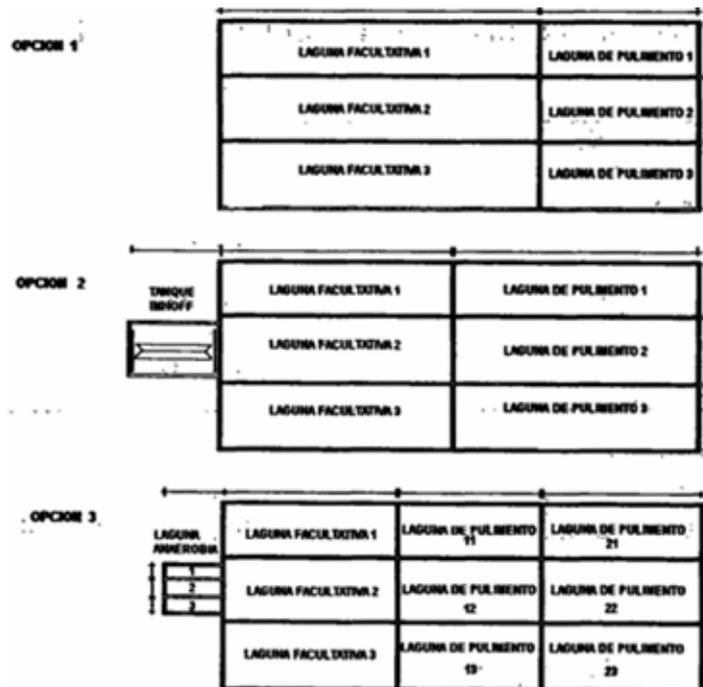
La Tabla 5.25 muestra los parámetros de mayor relevancia para el diseño de las lagunas para cada una de las tres opciones empleando el método de Yáñez para la remoción de coliformes.

**Tabla 5.25 Comparacion de los sistemas de tratamiento analizados en las opciones 1, 2 y 3 co el método de, Yáñez**

SISTEMA DE TRATAMIENTO	DBO, mg/l	SST, mg/l	CF <sub>e</sub> , NMP/100ml	AREA TOTAL, ha
OPCIÓN 1 Facultativa + Pulimento	41.58	37.44	10	11.27
OPCIÓN 2 Imhoff + Facultativa + Pulimento	28.84	26	988	10.49
OPCIÓN 3 Anaerobia+Facultativa+2Pulimento	19.57	17.62	923	10.40

De la Tabla 5.25 se concluye que la mejor Opción es el número 3 ya que implica una menor generación de lodos (favorecida por la laguna anaerobia) y una mayor remoción de la materia biodegradable.

La Figura 5.3 muestra los trenes correspondientes a las opciones 1, 2 y 3 por el método de Yáñez.



**Figura 5.3 Trenes de tratamiento de las opciones 1, 2 y3 empleando el método de Yáñez**

## 5.5.DIMENSIONAMIENTO DE LAS OPCIONES DE TRATAMIENTO EMPLEANDO EL METODO DE MARAIS

### 5.5.1.Opción 1 con el método de Marais

#### A. Laguna facultativa, Opción 1

Empleando las mismas consideraciones que en el apartado 5.4.1 se calcula los valores para el diseño de la laguna facultativa la Tabla 5.26 muestra un resumen de dichos valores, donde para la remoción de coliformes fecales se empleó el método de Marais, en el cual a partir de la ecuación 31 se calcula  $K_{CF}$

$$k_{CF} = 2.6 \cdot (1.085)^{T-20} = 2.6 \cdot (1.085)^{14.4-20} = 1.07 d^{-1}$$

Por lo que, la concentración de coliformes fecales en el efluente ésta dada por

$$CF_e = \frac{CF_i}{1 + k_{CF} \cdot \tau} = \frac{1.82E + 07}{1 + 1.07 \cdot (31.81)} = 5.2E + 05 \text{ NMP} / 100 \text{ ml}$$

**Tabla 5.26 Datos de diseños para la laguna facultativa para la opción 1 con el metodo de Marais**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga orgánica superficial,	165 kg DBO/ha.d
Carga removida en la laguna,	140.64 kg DBO/ha.d
Tiempo de retención, t	1131.81 d
Area de la laguna	2.66. ha.
Profundidad media, h	2m
Volumen de la laguna, V	53230 m <sup>3</sup>
Ancho, W	73.00 m
Largo, L	364.59 m
Relación largo/ancho, X	5
Carga remanente soluble, $C_{SS}$	37.39 mg/l
Carga remanente total, $C_{SR}$	74.77 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST.	48.40 mg/l
Concentración de de coliformes fecales, $CF_e$	5.2E + 05 NMP/ 100 ml

#### B. Lagunas de pulimento, Opción 1

Se instalarán tres lagunas de pulimento para las cuales el tiempo de retención hidráulica, t, se obtiene despejando la ecuación de Marais (ec. 31) para una concentración de coliformes fecales a la salida de 1000 NMP/100 ml. Se tiene

NÚMERO	TIEMPO INDIVIDUAL	TIEMPO TOTAL	COLIFORMES FECALES
1	9.50	9.50	46,517
2	5.50	15.00	6,752
3	5.50	20.50	980

Siguiendo el mismo procedimiento que en el apartado 5.4.1, C, y considerando las características físicas constantes para las tres lagunas, se tienen los datos de diseño de las Tablas 5.27 y 5.28.

**Tabla 5.27 Diseño de las lagunas de pulimento, opción 1 por el método de Marais**

PARAMÉTROS	VALORES CALCULADOS
Area, $A_m$	0.63 ha
Profundidad, h	1.5 m
Ancho, W	73.00 m
Largo, L	149.92 m
Relación largo/ancho, X	2

**Tabla 5.28 Datos de diseño para cada una de las lagunas de pulimento con el método de Marais para la opción 1**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Primera laguna de pulimento	
Carga superficial corregida, $C_s$	118.06 kgDBO/ha/d
Carga removida en la laguna, $C_{Sr}$	89.52 kg DBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{SS}$	18.08 mg/l
Carga remanente total, $C_{SR}$	41.58 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	37.44 mg/l
Segunda laguna de Mimento	
Carga removida en la laguna, $C_{Sr}$	10.39 kg DBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{SS}$	13.56 mg/l
Carga remanente total, $C_{SR}$	31.18 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	28.08 mg/l
Tercera laguna de pulimento	
Carga removida en la laguna, $C_{Sr}$	7.80 kg DBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{SS}$	10.17 mg/l
Carga remanente total, $C_{SR}$	23.39 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	21.06 mg/l

De la Tabla 5.28 se observa que, la operación en serie genera mejores resultados para la remoción de la materia orgánica que la operación en sistemas con una sola laguna de pulimento.

#### 5.5.1.1 Remoción de huevos de helmintos

Par la remoción de huevos de helmintos, el cálculo se basa en la ecuación de Yáñez: (30) y se calcula para el efluente de la laguna facultativa y de pulimento. LA Tabla 5.29 muestra un resumen al aplicar dicha ecuación.

**Tabla 5.29 Remocion de huevos de helmintos para la opcion 1**

LAGUNA	TIEMPO DE RETENCIÓN d	PORCENTAJE DE REMOCIÓN	No. DE HUEVOS EN EL EFLUENTE H/L
Influente			600.00
Facultativa	31.81	100%	0.00
Maduración 1	9.50	99%	0.00
Maduración 2	5.50	93%	0.00
Maduración 3	5.50	93%	0.00

Aún cuando el porcentaje de remoción permanece constante en la segunda y tercera laguna de pulimento, los resultados indican una operación eficiente ya que no hay huevos de helmintos en el efluente.

#### 5.5.1.2 Análisis de la Opción 1

En la Tabla 5.30 se tiene un resumen de las Opción 1 la cual considera tres lagunas de maduración.

**Tabla 5.30 Resumen de los datos de disero para la opción 1**

CONCEPTO	FACULTATIVA	PULIMENTO 1	PULIMENTO 2 Y 3	TOTAL POR MÓDULO	TOTAL DE LA PLANTA
Número	1	1	2	4	12
Ancho, m	73.00	73,00	73.00		73.00
Largo, m	364.59	149.92	86.79	688.10	
Prolundidad, m	2.00	1.50	1.50		
Area neta, ha	2.66	1.09	0.63	5.02	115.07
Volumen, m'	53,230	16,416	9,504	89,654	265,963
Tiempo de Retención, d	31.81	9.50	5.50	52.31	52.31
DBO total, mg/l	37.39	18.08	10.17		10.17
DBO soluble, mg/l	75	41.58	23.39		23.39
SST, mg/l	48.40	137.44	21.06		21.06
Coniformes fecales efluente, NMP/100 ml	5.20E+05	46,517	980		980

El manejo de varias lagunas en serie permite obtener mejores condiciones del agua tratada, por lo que esta opción de tratamiento ofrece un efluente apto para el reúso deseado.

### 5.5.2. Opción 2 con el método de Marais

#### A. Dimensionamiento del tanque Imhoff

Se emplean los mismos parámetros de diseño que en la sección 5.4.2, A y los valores calculados son los siguientes

Área requerida	53 m <sup>2</sup>
Ancho	4.00 m
Largo	13.25 m
Relación largo/ancho	3.31
DBO total	173 mg/l
SST total	100 mg/l

#### B. Laguna facultativa, Opción 2

Con base en el cálculo del apartado 5.4.2, B y para la concentración proveniente del tanque Imhoff, se tienen los resultados de la Tabla 5.31.

**Tabla 5.31 Diseño de la laguna facultativa primaria para la opción 2 con el método de Marais**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Concentración de DBO en el influente de la laguna, S.	173 mg/l
Concentración de sólidos suspendidos, en el influente de la laguna, SST	100 mg/l
Carga orgánica superficial,	165 kg DBO/ha.d
Carga removida en la laguna,	140 kg DBO/ha.d
Tiempo de retención, t	21.41 d
Area de la laguna	1.81. ha
Profundidad media, h	2 m
Volumen de la laguna, V	36197 m <sup>3</sup>
Ancho, W	73.00 m
Largo, L	247.92 m
Relación largo/ancho, X	3.5
Carga remanente soluble, C <sub>SS</sub>	25.42 mg/l
Carga remanente total, C <sub>SR</sub>	50.85 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	32.91 mg/l
Concentración de coliformes fecales, CF <sub>e</sub>	7.62E+05 NMP/100 ml

Remoción de coliformes fecales método de Marais;

Se considera la ecuación 31 con un valor de k<sub>CF</sub> de 1.07 (corregido por temperatura) y se calcula la concentración final como se hizo en el apartado 5.5.1.

$$CF_e = 7.62E + 05NMP / 100ml$$

C. Laguna pulimento, Opción 2

Se instalarán tres lagunas de pulimento para las cuales el tiempo de retención hidráulica,  $t$ , se obtiene despejando la ecuación de Marais y considerando una concentración de coliformes fecales a la salida de 1000 NMP/100 ml.

NÚMERO	TIEMPO INDIVIDUAL	TIEMPO TOTAL	COLIFORMES FECALES
1	7.60	7.60	83,354
2	7.60	15.20	9,122
3	7.60	22.80	998

Siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 5.5.1, B, y considerando los aspectos constructivos constantes, se desarrollaron a manera de resumen las Tabla 5.32 y 5.33.

**Tabla 5.32 Datos de diseño para las tres lagunas de pulimento**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Area, Am	0.88 ha
Profundidad, h	1.5 m
Anchb, W	73.00 m
Largo, L	119.93 m
Relación largo/ancho, X	2

**Tabla 5.33 Datos de diseño para las lagunas de pulimento**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Primera laguna de pulimento	
Carga superficial corregida, $C_s$	100.35 kgDBO/ha/d
Carga removida en la laguna, $C_{sr}$	75.97 kgDBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{ss}$	12.35 mg/l
Carga remanente total, $C_{sR}$	28.41 mg/l
Solidos suspendidos totales, SST	25.59 mg/l
Segunda laguna depulimento	
Carga removida en la laguna, $C_{sr}$	7.10 kgDBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{ss}$	9.27 mg/l
Carga remanente total, $C_{sR}$	21.31 mg/l
Solidos suspendidos totales, SST	19.19 mg/l
Tercera laguna de pulimento	
Carga removida en la laguna, $C_{sr}$	5.33 kgDBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{ss}$	6.95 mg/l
Carga remanente total, $C_{sR}$	15.98 mg/l
Solidos suspendidos totales, SST	14.39 mg/l

### Remoción de coliformes fecales (Metodo de Marais)

A partir de la ecuación 5.32 se obtienen los resultados de la Tabla 5.34.

**Tabla 5.34 Resultados al emplear el método de marais para la remoción de coliformes fecales**

NÚMERO	TIEMPO INDIVIDUAL	TIEMPO TOTAL	COLIFORMES FECALES
1	8.50	8.50	101,191
2	8.50	17.00	10,018
3	8.50	25.50	992

#### 5.5.2.1 Remoción de huevos de helmintos

Para la remoción de huevos de helmintos, el cálculo se basa en la ecuación de Yáñez (30), y se calcula para el efluente de la laguna facultativa y la de pulimento, los valores se muestran en la Tabla 5.35.

**Tabla 5.35 Concentración de huevos de helmintos para la opción 2**

LAGUNA	TIEMPO DE RETENCIÓN d	PORCENTAJE DE REMOCIÓN %	No. DE HUEVOS DE HELMINTOS EN EL EFLUENTE H/L
Influyente			600.00
Facultativa	21.41	100	0.00
Maduración 1	7.60	98	0.00
Maduración 2	7.60	98	0.00
Maduración 3	7.60	98	0.00

En el caso de las lagunas de pulimento no, se observa cambio ya que en la laguna facultativa se obtiene una eliminación total de huevos de helmintos.

#### 5.5.2.2 Analisis de la Opción 2

La Tabla 5.36 muestra el resumen de los parámetros calculados para el diseño del sistema de tratamiento de la opción 2.

**Tabla 5.36 Diseño del sistema de tratamiento de la opción 2**

CONCEPTO	FACULTATIVA	PULIMENTO 1, 2 Y 3	TOTAL POR MÓDULO	TOTAL DE LA PLANTA
Número	1	3	4	12
Ancho, m	73.00	73.00		73.00
Largo, m	247.92	119.93	607.72	
Profundidad, m	2.00	1.50		
Area neta, ha	1.81	0.88	4.44	13.31
Volumen, m <sup>3</sup>	36,197	13,133	75,595	226,785
Tiempo de retención, d	21.41	7.60		44.21
DBO soluble, mg/l	25.42	6.95		6,95
DBO total, mg/l	51	15.98		15.98
SST, mg/l	32.91	14.39		14.39
Coliformes fecales efluente, NMP/100 M1	7.62E + 05	992		992

En esta opción no mejora mucho el colocar otra laguna de pulimento, lo cual sólo impacta en el costo de la obra civil.

### 5.5.3.Opción 3 con el método de Marais

#### A. Laguna anaerobia, Opción 3

Siguiendo el procedimiento empleado, en la sección 5.4.3, A, Se tiene la Tabla 5.37 con los resultados para el diseño de la laguna.

**Tabla 5.37 Datos de diseño para la laguna anaerobia**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga volumétrica, C <sub>v</sub>	198 g/m <sup>3</sup> .d
Tiempo de retención hidráulica, T	1.28 d
Volumen total de la laguna, V	2652 m <sup>3</sup>
Area total de la laguna	554 m <sup>2</sup>
Relación largo/ancho, X	3
Ancho, W	13.59
Largo, L	40.77
Profundidad, h	4.78 m

#### B. Laguna facultativa, Opción 3

Para el cálculo de esta laguna se sigue el procedimiento del apartado 5.4.2, B, con la corrección en la carga orgánica removida ya que se trata de una laguna secundaria.

Con respecto a la remoción de coliformes fecales (Método de Marais), ésta se calcula con la ecuación 31. El valor de la,  $k_{CF}$  es de  $1.07 \text{ d}^{-1}$  debido a la corrección por temperatura, por lo que la concentración de coliformes fecales en el efluente es de

$$CF_e = 1.02E + 06NMP / 100ml$$

La Tabla 5.38 60 muestra los valores de los parámetros de diseño para la laguna facultativa.

**Tabla 5.38 Diseño de la laguna facultativa con el método de marais para la opción 3**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Carga orgánica superficial,	165 kg DBO/ha.d
Carga removida en la laguna,	125 kg DBO/ha.d
Tiempo de retención, T	15.71 d
Area de la laguna	1.34 ha
Profundidad media, h	2m
Volumen de la laguna, V	26772 m <sup>3</sup>
Ancho, W	73.00 m
Largo, L	183.02 m
Relación largo/ancho, X	2.5,
Carga remanente soluble, $C_{SS}$	30.58 mg/l
Carga remanente total, $C_{SR}$	61.17 mg/l
Sólidos suspendidos totales, SST	39.60 mg/l

C. Lagunas de pulimento, Opción 3

Se diseñarán tres lagunas de, pulimento en serie Con un tiempo de retención de 8.5 días (ver Tabla 3.15). Siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 5.4.2, C, se obtiene las Tabla 5.39 y 5.40.

**Tabla 5.39 Valores comunes para el diseño de las lagunas de pulimento**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Area, $A_{ml}$	0.98 ha
Profundidad, h	1.5 m
Ancho, W	73.00 m
Largo, L	134.14 m
Relación largo/ancho, X	2

**Tabla 5.40 Diseño de las lagunas de pulimento para la opción 3 con el método de Marais**

PARAMETROS	VALORES CALCULADOS
Primera laguna de pulimento	
Carga superficial corregida, $C_s$	107.94 kgDBO/ha/d
Carga removida en la laguna, $C_{sr}$	81.77 kgDBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{ss}$	14.83 mg/l
Carga remanente total, $C_{sR}$	34.10 mg/l
Solidos suspendidos totales, SST	30.71 mg/l
Segunda laguna depulimento	
Carga removida en la laguna, $C_{sr}$	8.53 kgDBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{ss}$	11.12 mg/l
Carga remanente total, $C_{sR}$	25.56 mg/l
Solidos suspendidos totales, SST	23.03 mg/l
Tercera laguna de pulimento	
Carga removida en la laguna, $C_{sr}$	6.39 kgDBO/ha/d
Carga remanente soluble, $C_{ss}$	8.34 mg/l
Carga remanente total, $C_{sR}$	19.18 mg/l
Solidos suspendidos totales, SST	17.27 mg/l

### Remoción de coliformes fecales (Método de Marais)

Se considera la ecuación 31 y los resultados se pueden observar en la Tabla 5.41.

**Tabla 5.41 Resultados al emplear el método de marais para la remoción de coliformes fecales en la opción 3**

NÚMERO	TIEMPO INDIVIDUAL	TIEMPO TOTAL	COLIFORMES FECALES.
1	8.50	8.50	101,191
2	8.50	17.00	10,018
3	8.50	25.50	992

#### 5.5.3.1 Remoción de huevos helmintos

Para la remoción de huevos de helmintos, el cálculo se basa en la ecuación de Yáñez (30) y se calcula para el efluente de la laguna facultativa y la de pulimento. La Tabla 5.42 muestra los datos obtenidos.

**Tabla 5.42 Remocion de huevos de helmintos de la opción 3**

LAGUNA	TIEMPO DE RETENCIÓN d	PORCENTAJE DE REMOCION	No. DE HUEVOS DE HELMINTOS EN EL EFLUENTE H/L
Influente			600.00
Facultativa	15.71	100%	0.10
Maduración 1	8.50	99%	0.00
Maduración 2	8.50	99%	0.00
Maduración 3	8.50	99%	0.00

Como se puede observar el empleo de lagunas de pulimento favorece la eliminación de huevos de helmintos; la cual, no mejora en un tratamiento en serie.

#### 5.5.3.2 Análisis de la, Opción 3

La Tabla 5.43 muestra un resumen del sistema de tratamiento correspondiente a la Opción 3.

**Tabla 5.43 Diseño del sistema de tratamiento con el método de marais para la opción 3**

CONCEPTO	ANAEROBIA	FACULTATIVA	PULIMENTO 1, 2 Y 3	TOTAL POR MÓDULO	TOTAL DE LA PLANTA
Número			3	5	15
Ancho, m	13.59	73.00	73.00		73.00
Largo, m	40.77	183.02	134.14	626.21	
Profundidad, m	4.78	2.00	1.50		
Area neta, ha	0.06	1.34	0.98	4.33	12.99
Volumen, m <sup>3</sup>	2,217	26,722	14,688	73,002	219,007
Tiempo de Retención, d	1.28	15.71	8.50	42.50	42.50
DBO, efluente, mg/l	61	34.10	25.58		25.58
SST, mg/l		39.60	17.27		17.27
Coliformes fecales efluente, NMP/100 ml	1.02E+06	101,191	99		992

#### 5.5.4. Conclusiones del dimensionamiento con el Método de Marais para la remoción de coliformes fecales

La Tabla 5.44 muestra los parámetros de mayor relevancia para una adecuada Operación de las lagunas y el área total requerida para las tres opciones empleando el método de Marais para la remoción de coliformes.

**Tabla 5.44 Comparacion de las tres opciones de tratamiento con, el metodo de marais**

SISTEMA DE TRATAMIENTO	DBO,mg/l	SST,mg/l	CF <sub>e</sub> , NMP/100ml	AREA TOTAL, ha
OPCIÓN 1 Facultativa+3Pulimento	10.17	21.06	980	15.07
OPCIÓN 2 Imhoff+Facultativa+3Pulimento	15.98	14.39	992	13.31
OPCIÓN 3 Anaerobia+Facultativa+3Pulimento	61	17.27	992	12.9

De la Tabla 5.44 se escoge la segunda opción ya que ofrece la mejor remoción de DBO, y SST y queda en los límites permisibles de CF<sub>e</sub> para el Uso del efluente en riego.

La Figura 5.4 muestra los trenes correspondientes a las tres opciones analizadas calculadas con el método de Marais.

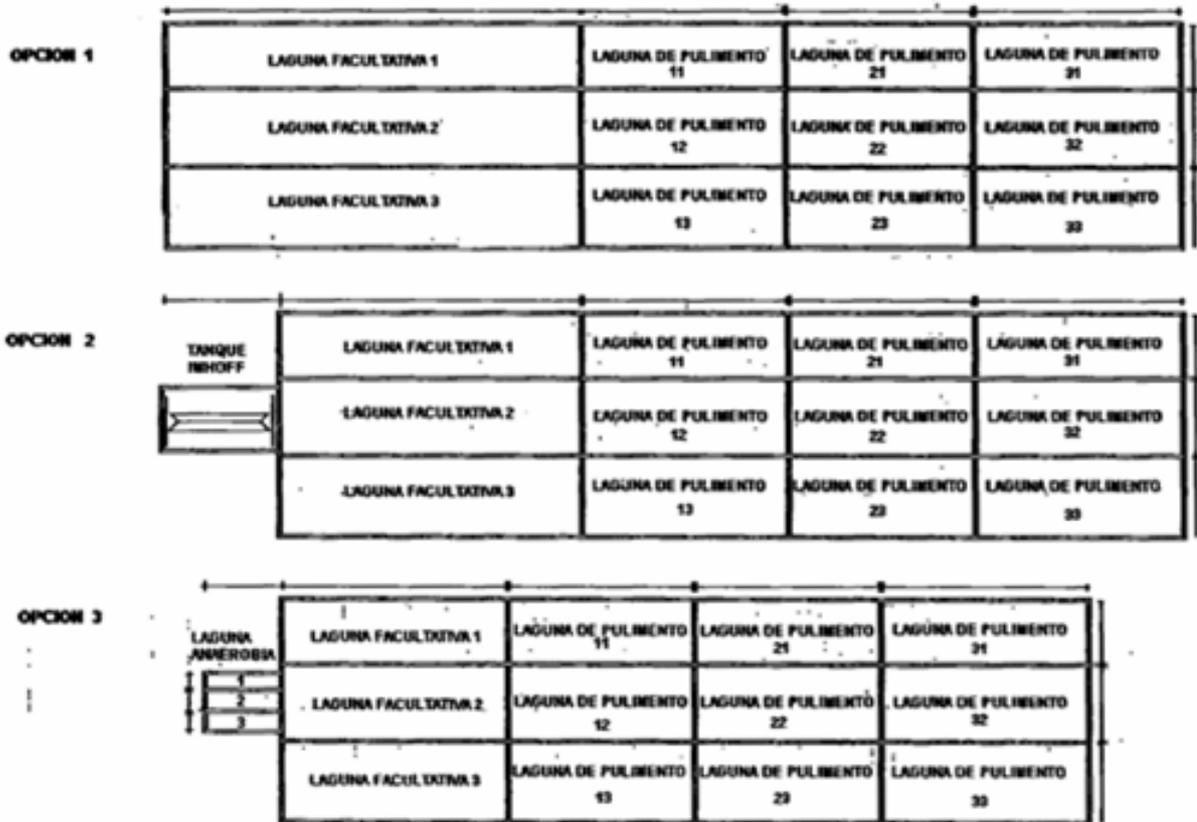


Figura 5.4 Trenes de tratamiento de las opciones 1, 2 y 3 empleando el método de Marais

## 5.6.COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE YÁNEZ Y DE MARAIS PARA EL DISEÑO DE LAGUNAS

Utilizando el método de Yánez, que aprovecha la forma de las lagunas, se tiene como resultado un menor número de ellas y un menor tiempo de retención total. Sin embargo, mediante el método de Marais se obtienen las mejores eficiencias de remoción de materia orgánica y un valor constante (en el límite) para los coliformes fecales (ver Tabla 5.45)

Tabla 5.45 Comparación de los sistemas de tratamiento analizados en las opciones

SISTEMA DE TRATAMIENTO	Método de Yánez				
	DBO, mg/l	SST, mg/l	CF <sub>e</sub> , NMP/100ml	TIEMPO DE RETENCIÓN, d	AREA TOTAL, ha
OPCIÓN 1 Facultativa + Flulimento	41.58	37.44	10	41.31	11.27
OPCIÓN 2 1mhoff +Facultativa+Pulimento	28.84	26.00	988	36.32	10.49
OPCION 3 Anaerobia + Facultativa + 2Pulimento	19.57	17.62	923	35.00	10.40

**Tabla 5.45 Comparacion de los sistemas de tratamiento: analizados en las opciones (continuación)**

Método de Marais					
SISTEMA DE TRATAMIENTO	DBO, mg/l	SST, m /L	CF <sub>e</sub> NMP/100ml	TIEMPO DE RETENCION, d	AREA TOTAL, ha
OPCIÓN 1 Facultativa+3Pulimento	10.17	21.06	980	52.31	15.07
OPCIÓN 2 Imhoff +Facultativa+3Pulimento	15.08	14.39	992	44.21	13,31
OPCION 3 Anaerobia+Facultativa+3Pulimento	19.57	17.27	992	42.50	12.99

Finalmente, de las opciones analizadas en este capítulo se, puede concluir que pese a que ambos métodos garantizan una calidad idónea para el riego agrícola la mejor opción es la número 3 y en segundo término la 2 empleando el método de Yáñez para el cálculo de la remoción de coliformes fecales, por los menores requerimientos de obra civil.

#### 5.7.ELABORACIÓN DE PLANOS BASE

Los planos siguientes muestran a manera de resumen los requerimientos básicos analizados en el capítulo 4 y en el presente. Se debe señalar que para la integración de un proyecto ejecutivo no son suficientes los planos que se muestran pero constituyen un buen ejemplo, de las necesidades de detalle que implican los sistemas lagunares.

## **6. OPERACION Y MANTENIMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN**

El objetivo principal de este manual es el diseño de las lagunas por lo que este capítulo es breve. Para mayor información recurra al Manual de Operación y Mantenimiento de Sistemas Lagunares del IWA, CNA y TA CSA, (1994).

La operación y mantenimiento de las lagunas son acciones relativamente sencillas pero que se deben realizar para producir un buen efluente. Este capítulo trata sobre los procedimientos adecuados de operación, la vigilancia cualitativa y cuantitativa del proceso y la identificación y solución de los principales problemas de operación. Finalmente, se describen los requereffinientos de personal y se presenta un resumen de medidas para facilitar la operación y el mantenimiento de las lagunas.

### **6.1. ARRANQUE DEL SISTEMA**

Como cualquier proceso biológico, ninguna laguna funciona en el momento de su arranque con la eficiencia de diseño. Se requiere un periodo de pulimento que depende de la temperatura, características del agua residual y, sobre todo, del buen desarrollo de la población biológica, entre otros factores. Este proceso puede llevar de semanas a meses y la habilidad del operador consiste en tratar de reducirlo al mínimo. También debe establecerse un equilibrio hidráulico, dependiendo del gasto, la permeabilidad del fondo, la evaporación, etc.

#### **6.1.1. Lagunas aeradas**

Lo siguiente se aplica tanto para lagunas con mezcla completa o parcial.

Antes de introducir el agua, todo el equipo mecánico debe ser lubricado y probado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. También, se debe verificar que las válvulas de control o de intercomunicación giren libremente en toda la carrera del vástago y, que los canales y tuberías están libres de escombros y objetos extraños.

Para verificar el adecuado funcionamiento de los motores se observan las cargas eléctricas correspondientes: altas cargas generalmente indican problemas en los motores eléctricos, atascamiento u otras causas de frenado, que deben ser revisadas inmediatamente. Por el contrario, bajas cargas indican condiciones de funcionamiento deficientes, generalmente, ocasionadas por una inadecuada surnergencia.

Así mismo, se debe observar y evitar la acumulación de materiales flotantes en el equipo. En caso de identificar este problema se debe revisar el equipo de pretratamiento. Si hay persistencia de grasas y aceites se debe incluir algún dispositivo para su remoción.

En cuanto a la laguna ésta debe ser probada contra fugas, para lo cual se requiere llenarla con agua residual hasta el nivel que alcanzará en operación normal y observar durante varios días si desciende. Al mismo tiempo que se realiza la prueba de fugas es aconsejable que se prueben los aeradores para evitar problemas de operación. Una vez lista la planta se ponen en operación y durante la primer semana se llevan a cabo las siguientes actividades:

**PRIMER DIA.** Una vez realizado el llenado de la laguna y pasadas 16 horas de operación, se verifica el contenido de oxígeno disuelto para conocer si el equipo proporciona la cantidad suficiente. El oxígeno, disuelto debe ser mayor a 3 mg/l en toda la laguna debido a que la cantidad de microorganismos es muy pequeña. Si la concentración es menor de 1 mg/l, indica que el número de aeradores es insuficiente y deberá aumentar. A medida que el número de microorganismos se incrementa, la laguna aerada va adquiriendo el nivel de oxígeno de operación normal.

**DEL SEGUADO AL QUINTO DÍA.** Durante este periodo, el control de operación debe enfocarse a mantener la concentración de oxígeno disuelto. Es en esta etapa es cuando, se inicia el programa de muestreo con el fin de registrar los datos requeridos para el control futuro de la planta. El lograr mantener una cantidad de oxígeno disuelto constante en la laguna aerada requiriendo cierto, tiempo, que por lo común para aguas municipales es de 3 veces el tiempo de retención hidráulica.

**DEL SEXTO DIA EN ADELANTE.** A partir del sexto día de operación la mejora en el efluente debe ser notable. La observación cuidadosa de la formación de sólidos suspendidos y la prueba de sedimentabilidad en 60 minutos indican la velocidad de crecimiento y la condición de los sólidos en la laguna.

Diariamente las variaciones de flujo producirán diferentes demandas de oxígeno hasta que se establezca el sistema. Durante los primeros días de operación se forman grandes cantidades de espuma debido al contenido de detergente en el agua residual municipal y a la escasez de población bacteriana, si es necesario se pueden aplicar antiespumantes comerciales en dosis de 10 a 20 mg/l.

### 6.1.2.Lagunas facultativas

En una laguna facultativa, el crecimiento de las algas no se establece tan rápidamente como la población de bacterias de las lagunas aeradas, por lo que el periodo, de aclimatación es mayor. Por su gran área se recomienda dividir temporalmente la laguna en secciones mediante la construcción de uno o dos diques de tierra con una altura no mayor de 50 cm, los cuales se colocan a lo ancho. Se llena la primera sección en pocos días y el agua residual se derrama sobre el dique permitiendo que se llene la siguiente sección hasta su altura de diseño. Esta medida permite que el fondo de la laguna selle, más rápido y previene el crecimiento de plantas acuáticas.

En caso de que se cuente con más de una laguna, se llena la primera y se cierra la alimentación desviando el agua residual a una segunda para su llenado, por secciones. Se debe permitir la aclimatación de la primera laguna durante un tiempo aproximado de 10 a 20 días, mientras que la segunda se está llenando. Un indicio de aclimatación se tiene cuando la laguna se torna color verdoso. En ningún caso se debe permitir la entrada de agua residual nueva (fresca) antes de que se logre la aclimatación de la laguna.

Una vez llenada la segunda laguna se para su alimentación y se conecta la entrada del agua a la primera laguna. La misma operación se realiza aun cuando operen en paralelo dos lagunas (Figura 6.1).

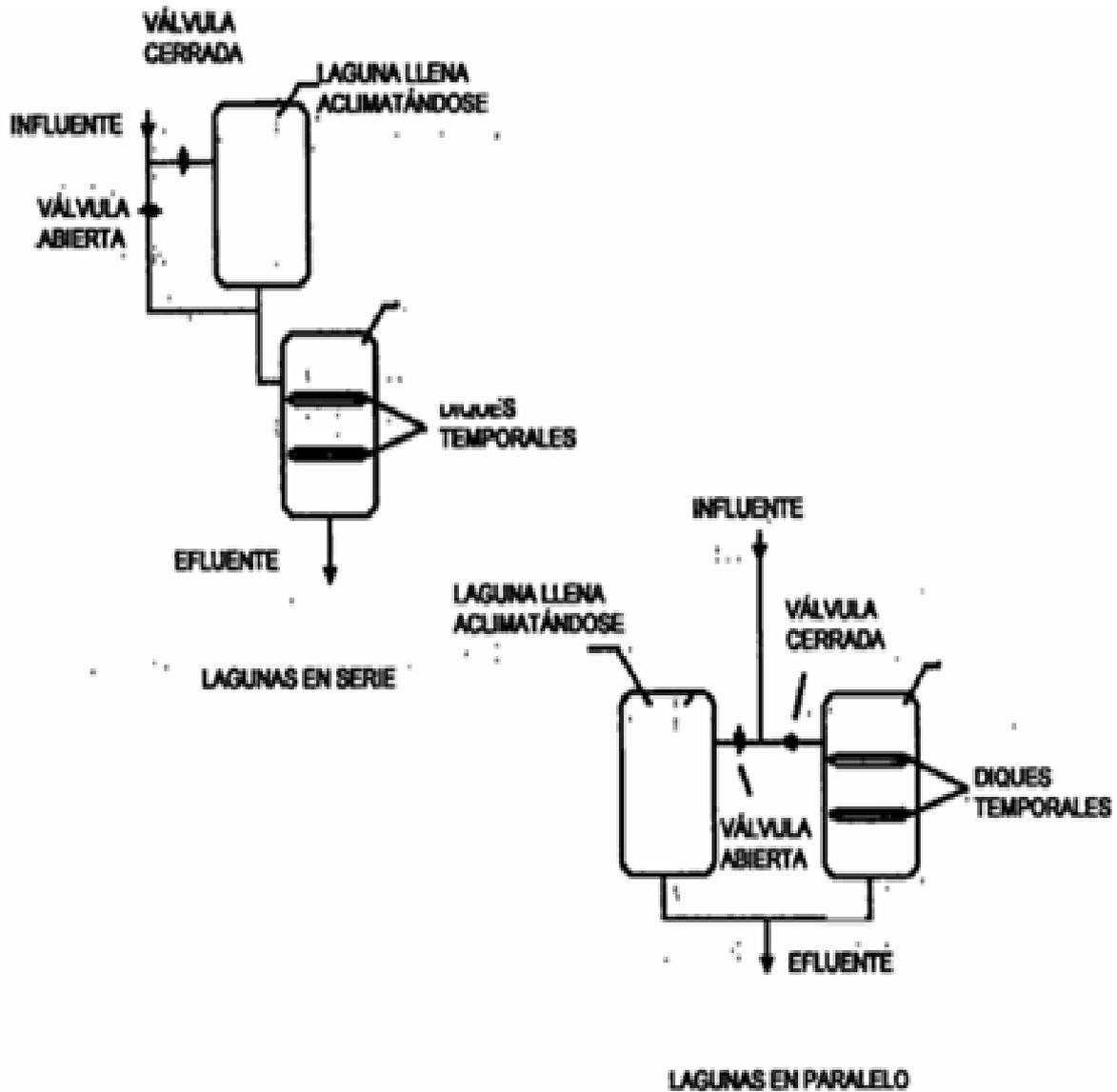


Figura 6.1 Arranque de lagunas de estabilización

### 6.1.3.Lagunas anaerobias

En el caso de lagunas anaerobias, se llena la laguna hasta la altura de diseño. Se adiciona cal para, mantener el, pH hasta un valor entre 6.5 y 7.0 y, se opera sin alimentación por unos días (5 a 10) antes de, iniciar la alimentación en forma gradual.

### 6.1.4.Lagunas de pulimento

El arranque de las lagunas de pulimento es similar al de las lagunas facultativas, llenándose gradualmente con la construcción de diques temporales cada una de las lagunas que formen el sistema.

## 6.2.INDICADORES DE OPERACIÓN

La inspeccion visual, de los sistemas lagunares proporciona, información relativa a la forma en que estdn operando. El color y la observación al microscopio de los organismos presentes indica el grado de estabilidad del sistema. El olor es otro indicador cualitativo importante del funcionamiento.

### 6.2.1.Cualitativos

#### 6.2.1.1Color

En los sistemas lagunares la observación de la coloración y apariencia del agua proporcionan datos importantes sobre las condiciones generales del proceso y ayudan a pronosticar un cambio en el comportamiento del sistema. Las posibles causas de la variación en la coloración y apariencia del agua en las lagunas son debidas a la presencia de diferentes tipos de microorganismos, picos de carga orgánica, temperatura, pH, intensidad de la luz y volumen del liquido, entre otros (INITA, CNA y TACSA, 1994).

Los colores que comúnmente se encuentran son los siguientes:

- Verde oscuro. Indica que la laguna está operando normalmente.
- Verde denso. Indica un crecimiento excesivo de algas que puede ser resultado de una reducción de la capa aerobia. Se pueden tener entonces condiciones anaerobias en las zonas profundas de la laguna.
- Verde lechoso. Usualmente, indica que ha comenzado el proceso de autofloculación. Esto sucede cuando el pH y la temperatura de la laguna se han elevado hasta, un punto que se produce la precipitación, de los hidróxidos de calcio, o de magnesio, acarreado consigo a las algas y otros microorganismos. Este fenómeno regularmente se presenta en lagunas poco profundas.
- Azul-verde. Una coloración azul-verdosa con aspecto oleoso es una indicación de la presencia de algas cianofitas. Algunas de éstas son

formadoras de natas que impiden el paso de la luz solar y otras producen toxinas. En ambos casos el funcionamiento de la laguna no es normal.

- Verde-amarillento o blanquecino. Indica que inició el proceso de acidificación de la laguna y si llega a condiciones extremas puede detener el proceso biológico.
- Café-amarillento o pardo. Es causado por el crecimiento excesivo de rotíferos o de crustáceos microscópicos como la pulga de agua, las cuales se alimentan de algas y pueden acabar con la población en pocos días. Como consecuencia el oxígeno disuelto, disminuye, se modifica el pH y probablemente hay generación de malos olores.
- Rosada. Se presenta ocasionalmente en las lagunas de pulimento debido a las mismas causas que el color café-amarillento. Es el resultado de la falta de un manejo adecuado en las lagunas anteriores.
- Rojizo, Puede indicar la presencia de bacterias reductoras de azufre y, por lo tanto, condiciones anaerobias.
- Gris. Generalmente, se presenta cuando la laguna ha sido sobrecargada con materia orgánica y/o el tiempo de retención es tan corto que no se obtiene la completa estabilización de la materia orgánica
- Negro con presencia de materia flotante. Indica una rápida degradación de los lodos del fondo provocado por cambios en la composición del agua, residual o por sobrecarga. Generalmente se acompaña de mal olor.

#### 6.2.1.2 Transparencia

La transparencia ofrece una excelente indicación de las concentraciones de algas y por tanto, del oxígeno disuelto en la laguna. La transparencia se mide a través del Disco de Secchi.

#### 6.2.1.3 Olor

La emisión de malos olores normalmente es causada por sobrecarga de la laguna, el aumento repentino en la carga orgánica, los cambios en la composición del agua residual o el desarrollo de condiciones anaerobias. Generalmente, provienen de los depósitos de lodo flotante y de la vegetación en putrefacción de la propia laguna.

En los sistemas parcialmente mezclados, en donde se limita la agitación del medio, se desarrollan condiciones anaerobias en los lodos del fondo y su aspecto común es cercano al séptico con un color gris oscuro. La zona superficial que se trata de mantener bajo condiciones aerobias permite la oxidación de algunos compuestos mal olientes pero algunas llegan a escapar. Por ello es recomendable que todos los equipos de aeración se encuentren siempre funcionando en continuo.

#### 6.2.1.4 Observaciones microscópicas

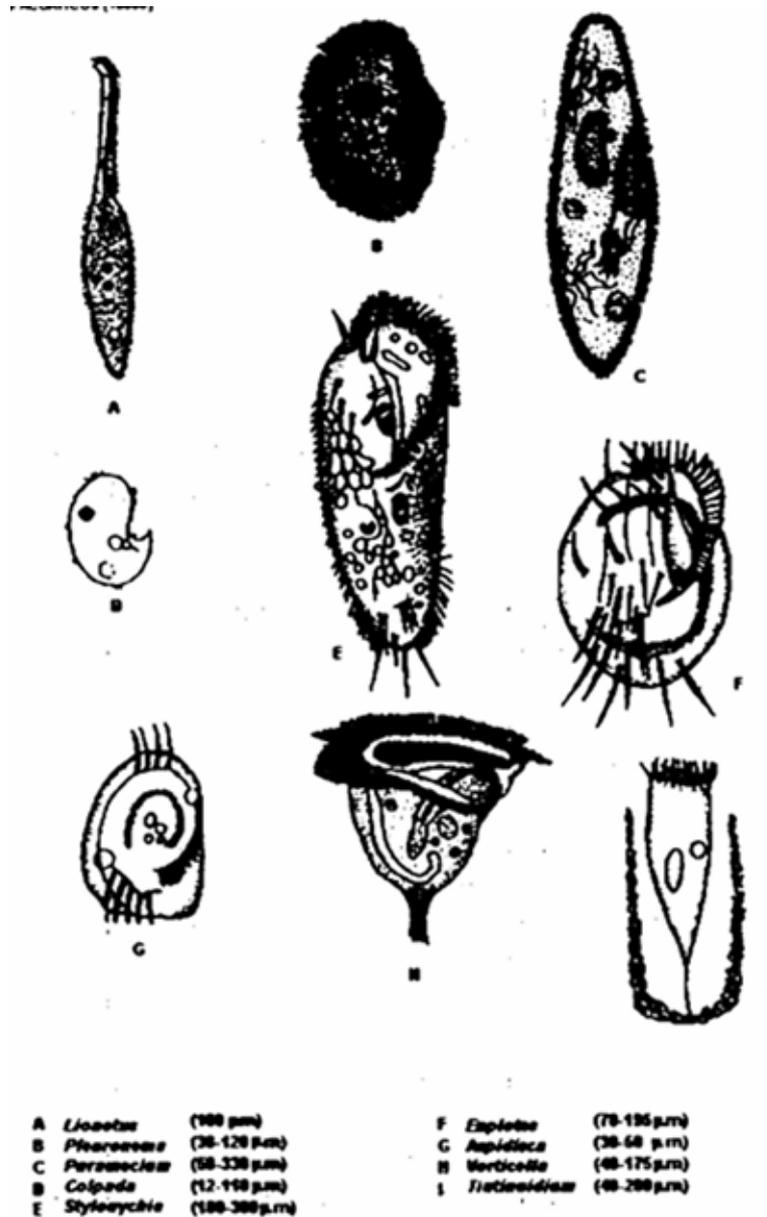
Las observaciones microscópicas del licor mezclado proporcionan información importante acerca de las condiciones operativas del proceso. El tipo, especie y número de los principales organismos que integran la dinámica de la población biológica permiten determinar las condiciones de aeración, inhibición, carga, etc., sin tener que recurrir a complejas determinaciones analíticas.

Los protozoarios nadadores libres y ciliados anclados (Figura 6.2), se alimentan de bacterias y viven en condiciones estrictamente aerobias con niveles de oxígeno disuelto mayores a 0.5 mg/l; por lo tanto, una población elevada de éstos indica un incremento en la población de bacterias y la presencia de condiciones aerobias apropiadas. La presencia de esta población indica en las lagunas aerobias y facultativas que el proceso está operando en forma adecuada.

Se considera conveniente destacar que los ciliados anclados pueden, bajo condiciones especiales, indicar la presencia de elementos tóxicos o inhibidores de la actividad biológica. En estos casos, se aprecia que los cuerpos se desprenden de su tallo, tratando de nadar hacia zonas libres de éstas sustancias. En caso de encontrarlas, desarrolla su tallo nuevamente y continúan su actividad normal en caso contrario mueren y se observa al microscopio cuerpos inertes.

La presencia de rotíferos y/o crustáceos son indicadores de altas eficiencias. Estos organismos se presentan en aguas depuradas y con concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 1.5 mg/l. Sin embargo, estos organismos mayores deben estar acompañados de flóculos de bacterias, permitiendo en un momento dado, el desarrollo de rotíferos y crustáceos.

Otros organismos que pueden ser observados en el licor mezclado, son los nematodos, cuya característica principal es, que se desarrollan cuando hay oxígeno disuelto. Su presencia en número es reducida y se encuentran inmersos en los flóculos bacterianos, sin representar un problema especial.



**Figura 6.2 Tipos de ciliados presentes en agua residual**

Para el caso de las lagunas parcialmente mezcladas, bajo condiciones anaerobias, la población microbiana se limita exclusivamente a bacterias. Los flóculos son por lo común de tamaño pequeño, muy densos y de color gris oscuro a negro.

En el caso de la Figura 6.3, se muestran algunas algas comunes de lagunas de estabilización.

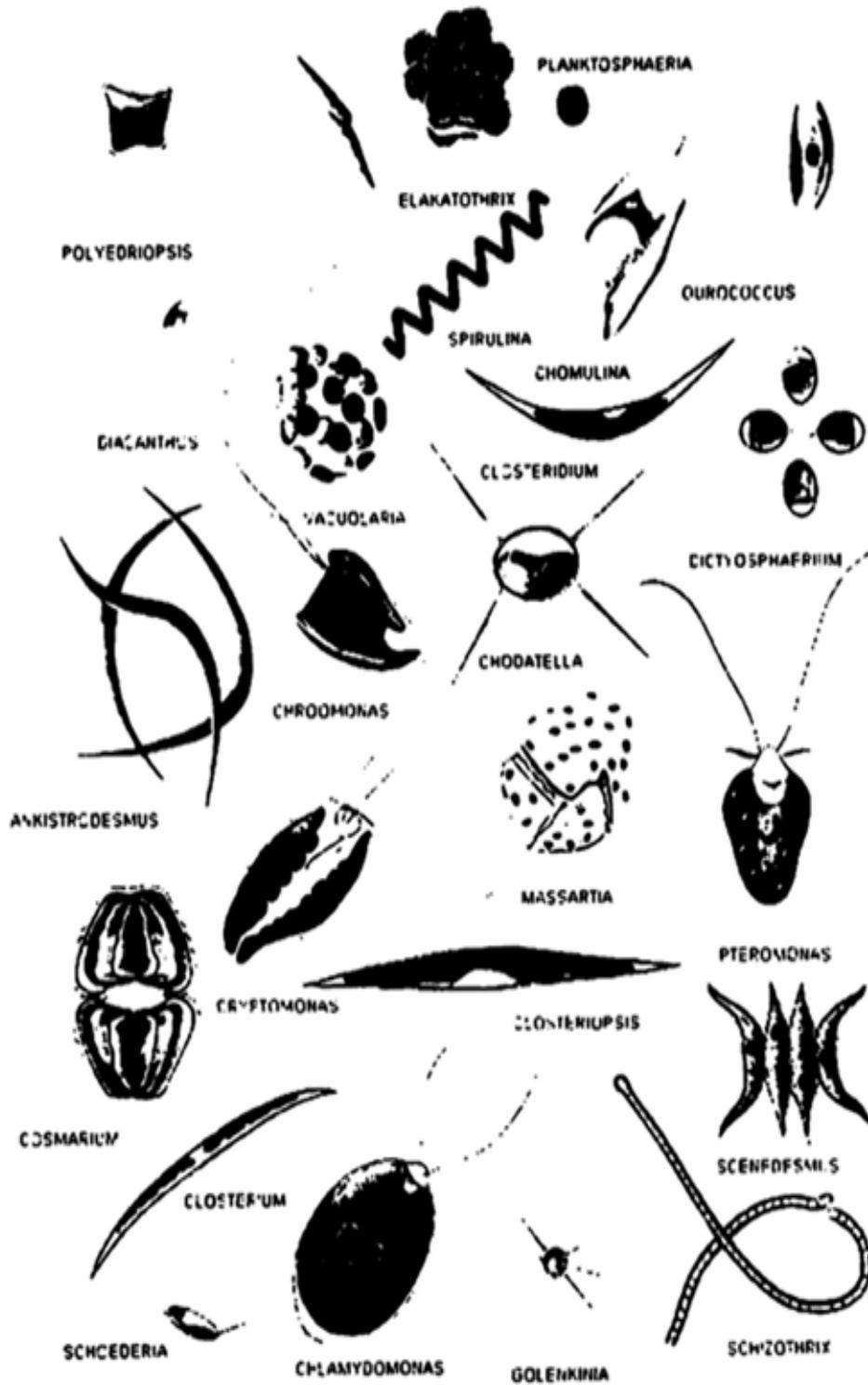


Figura 6.3 Población de algas presente en lagunas de estabilización

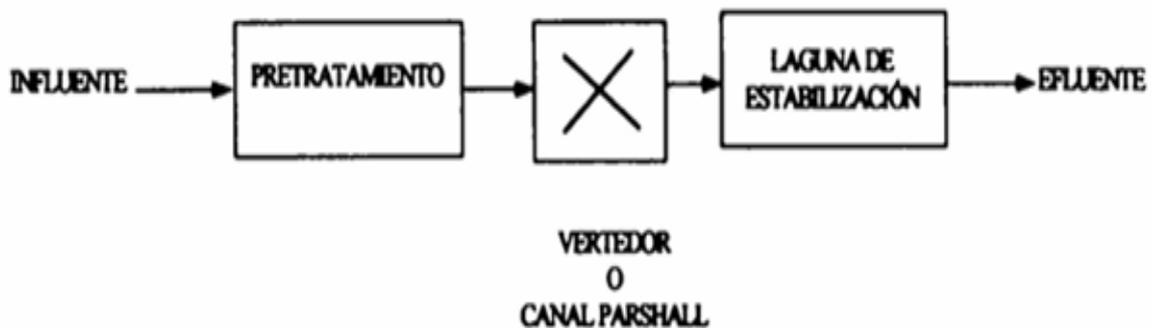
### 6.2.2. Cuatitativo

El número de muestras a coleccionar, el tipo de análisis y la ubicación de los puntos de muestreo son los aspectos relevantes para obtener la información cuantitativa sobre la operación. Esta información junto con la cualitativa sirven para ejecutar una evaluación completa y el correcto control de la operación de las lagunas.

#### 6.2.2.1 Localización de la toma de muestras

El control de un proceso de tratamiento se basa en la medición de parámetros de calidad del agua. Los más significativos para este sistema son. pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites (G y A), coliformes fecales (CF), nitritos (N-NO<sub>2</sub>), nitratos (N-NO<sub>3</sub>), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>4</sub>), nitrógeno protelco (N-Norg), fosfatos totales (P-PT) y ortofosfatos (P-PO<sub>4</sub>)

Para tomar la muestra del influente se recomienda hacerlo en la estructura anterior a la entrada de la laguna, como se muestra en la Figura 6.4.



**Figura 6.4 Localización de la toma de muestra del influente de la laguna**

Debido a que el agua en las lagunas de estabilización se encuentra prácticamente en reposo, ésta, presenta diferentes características dependiendo de la profundidad a la que se tome la muestra. En las lagunas facultativas la mayor concentración de algas se presenta en los primeros 15 cm, de profundidad pero el agua tratada se encuentra a más de 30 cm de la superficie, por lo que es conveniente tomar la muestra a 50 cm. En las lagunas anaerobias se recomienda tomarla a una profundidad de 20 a 30 cm. Para las lagunas de pulimento la toma de muestra debe ser a 50 cm de la superficie. Las Figuras 6.5 a 6.7 se muestran las distancias recomendadas para la toma de muestra en los diferentes tipos de lagunas.



Figura 6.5 Localización de la toma de muestra en una laguna anaerobia

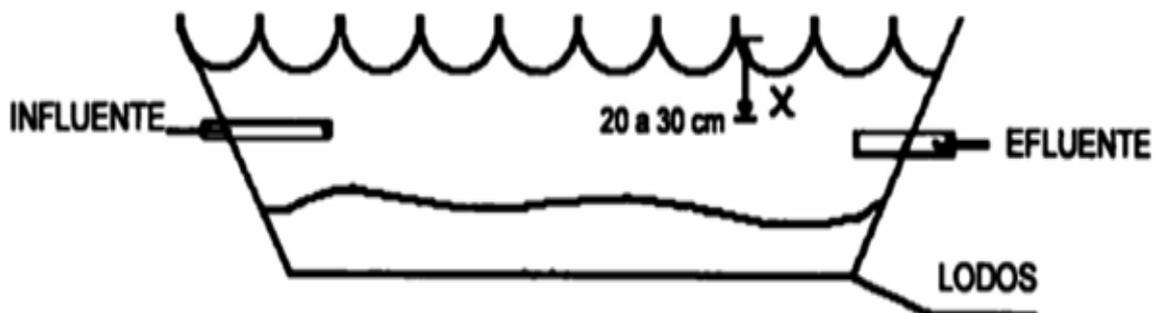


Figura 6.6 Localización de la toma de muestra en una laguna facultativa

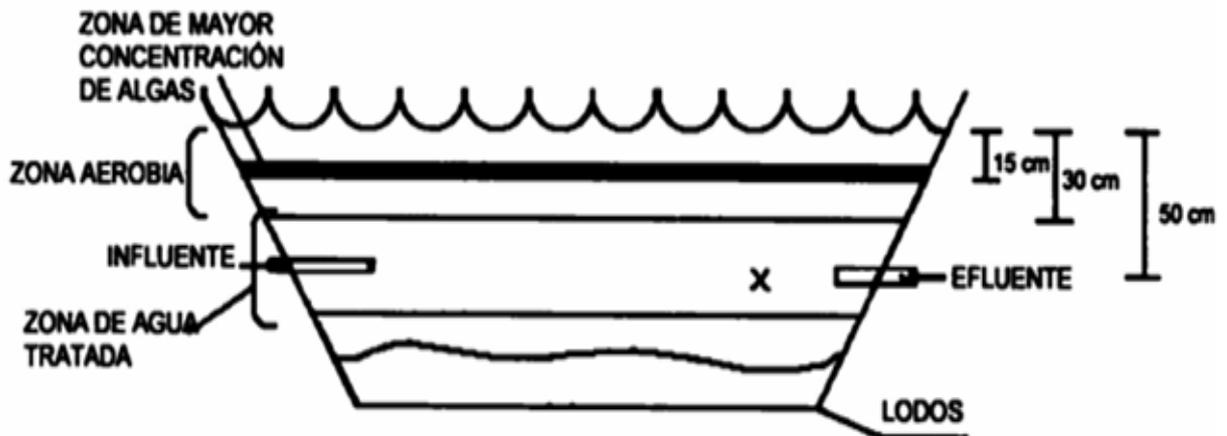
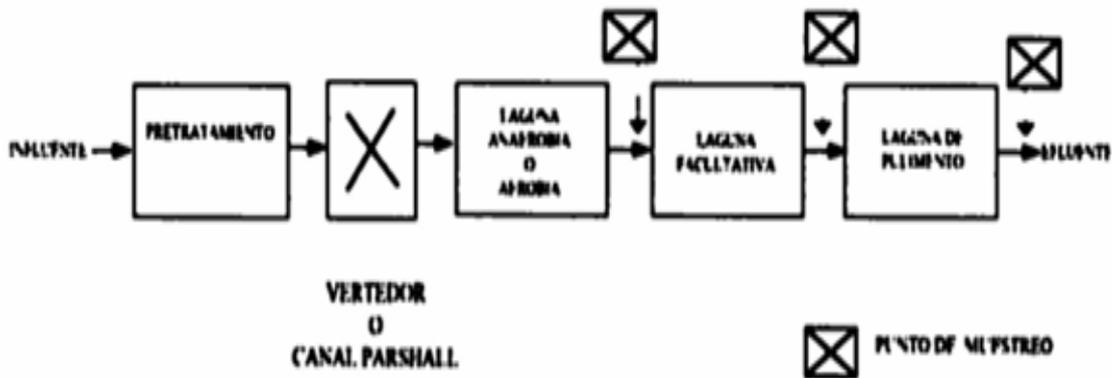


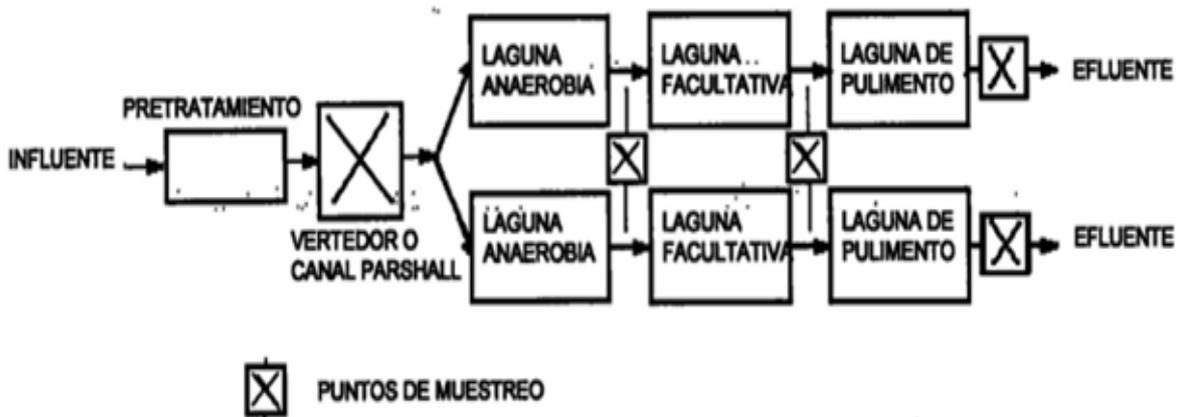
Figura 6.7 Localización de la toma de muestra en una laguna de pulimento

En los sistemas lagunares operados en serie se sugiere que la toma de muestra se realice en los puntos señalados en la Figura 6.8. Esto permite determinar la eficiencia de remoción de cada elemento y detectar si alguno de ellos funciona incorrectamente.



**Figura 6.8 Localización de la toma de muestras en un sistema lagunar operado en serie**

Para un sistema lagunar operado en paralelo la toma de muestra se realiza de acuerdo con la Figura 6.9. En estos sistemas para realizar el cálculo de la eficiencia del proceso se considera la muestra de salida de la última laguna.



**Figura 6.9 Localización de la toma de muestra en un sistema lagunar operado en paralelo**

Toda persona encargada del muestreo debe estar familiarizada con las técnicas de preservación y los materiales empleados para, el mismo según sean las determinaciones

- Fisico-químicas (sólidos en todas sus formas, DBO, oxígeno disuelto, etc.). Se usan garrafones de plástico inerte de aproximadamente 5 litros de capacidad, provistos de tapa con rosca. Se sugiere que sean de color oscuro y están debidamente identificados.
- Bacteriológicas (coliformes: fecales). Se usan frascos de vidrio neutro esterilizado de 1,20 ml a 300 ml de capacidad, con tapa esmerilada, cubierta con doble envoltura: una de papel aluminio y otra de, papel café (Kraft), debidamente identificados.

- Huevos de helmintos. Se emplean tanques de plástico de, al menos 200 L de capacidad para el efluente y 5 L para el influente. No requiere refrigeración.

Para la determinación de los parámetros de campo deberán tomarse muestras puntuales, de preferencia en las horas en que tradicionalmente se tiene los mayores gastos.

La frecuencia sugerida para la toma de muestras se indica en la Tabla 6.1; la cual, debe ser ajustada al tamaño y complejidad del sistema lagunar las condiciones económicas del organismo operador y las condiciones de operación.

**Tabla 6.1 Frecuencia de muestreo**

PARÁMETRO	No. DE VECESIMES
Transparencia	8
PH	8
Temperatura	8
Conductividad eléctrica	8
Oxígeno disuelto	8
DBO	4
DQO	4
Sólidos suspendidos (9 formas)	4
Grasas y aceites	2
Observación microscópica	2
Nitrógeno amoniacal	1
Nitratos	1
Nitritos	1
Nitrógeno protelco	1
Fosfatos totales	1
Ortofosfatos	1
Coliformes fecales	1
Huevos de helmintos	1 vez/año

Si el sitio de análisis (laboratorio) se encuentra a cierta distancia las muestras deberán ser almacenados y preservadas como se indica en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2 Volumen y preservación de muestras**

Análisis	Material del recipiente	Volumen mínimo de muestra ml	Preservación	Tiempo máximo de almacenamiento	
				Recomendado	Reglamentario
PH	Plástico-vidrio	50	Inmediatamente	2h	ninguno
Temperatura	Vidrio	50	Inmediatamente	ninguno	

**Tabla 6.2 Volumen y preservacion de muestras (continuación)**

Análisis	Material del recipiente	Volumen mínimo de muestra ml	Preservación	Almacenamiento	
				Recomendado	Reglamentario
Turbiedad	Plástico-vidrio	50	Inmediatamente o Refrigerere en oscuridad por 24 h	24 h	48 h
Conductividad	Plástico-vidrio	500	Refrigerere a 4 °C	28 d	28 d
Alcalinidad	Plástico-vidrio	100	Refrigerere a 4 °C	24 h	14 d
Oxigeno disuelto - electrodo - método Winkler	Vidrio	300	- Inmediatamente - Inmediatamente o Acidificación	0.5 h 8 h	No establecida 8 h
DBO	Plástico-vidrio	1,000	Refrigeración a 4°C	6 h	48 h
DQO	Plástico-vidrio	100	Inmediatamente, añada H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH < 2 y Refrigerere a 4°C	7 d	28 d
Sólidos	Plástico-vidrio	300	Refrigerere a 4 °C	7 d	2-7 d
Grasa y aceites	Vidrio	1,000	Añada H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH < 2 y refrigerere a 4 °C	28 d	28 d
Metales pesados	Plástico  Vidrio,  Enjuagado con HNO <sub>3</sub>		Metales disueltos. -  Filtre inmediatamente, HNO <sub>3</sub> hasta pH < 2  40C	6 meses	6 meses
Amonio (N-NH <sub>4</sub> )	Plástico-vidrio	500	Ninguna o Añada H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH < 2 y Refrigererese	7 d	28 d
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> )	Plástico-vidrio	100	Ninguna o refrigerere	48 h	48 h
Nitrito (N-NO <sub>2</sub> )	Plástico-vidrio	100	Ninguna o refrigerere	ninguno	48 h
Nitrogeno proteico y Kjeldahl (NTK)	Plástico-vidrio	500	Refrigerere y añada H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH < 2	7 d	28 d
Fosfatos (P-PO <sub>4</sub> y P-PT)	Vidrio, enjuagado con HNO <sub>3</sub>	100	Fosfato disuelto filtre Inmediatamente y Refrigerere	48 h	---
Coliformes fecales	Vidrio neutro (esteril)	100	Refrigerere a 4 °C	6 h	Ninguno
Huevos de helmintos	Plastico	200	Influente Efluente	1 semana	---

ADAPTADO:IMTA, CNA y TACSA, 1994

## 6.3. OPERACIÓN

### 6.3.1. Frecuencia de monitoreo

#### 6.3.1.1 Influyente

En el influente de la planta de tratamiento se deben analizar en forma rutinaria los parámetros de la Tabla 6.1. La periodicidad señalada es la ideal, y, su aplicación depende de la disponibilidad de la infraestructura para llevarla a cabo.

Para las lagunas de aeración, se recomienda determinar: DBO, DQO y coliformes fecales en una muestra directa y otra sedimentada.

#### 6.3.1.2 Efluente

El efluente del proceso de tratamiento será aquel que salga de la estructura que permite la sedimentación de los sólidos suspendidos. En función de su calidad y la del influente se define la eficiencia global. Se determinan prácticamente los mismos parámetros y con la misma periodicidad que para el influente.

El parámetro que mejor, refleja la variación de las condiciones del proceso de tratamiento es la concentración de oxígeno disuelto, ya que a mayor concentración de materia orgánica corresponde, un incremento en la actividad biológica y un mayor consumo de oxígeno.

#### 6.3.1.3 Cuerpo de la laguna

Los principales parámetros que deben ser evaluados en el cuerpo de una laguna son la concentración de sólidos suspendidos en el licor mezclado (sólidos suspendidos totales), las condiciones ambientales (pH, temperatura y oxígeno disuelto), la identificación de zonas muertas bajo oxígeno disuelto y la posible acumulación de lodos dentro de la laguna. En cada uno de los sitios de muestreo se toman dos alícuotas del contenido, una a 50 cm de la superficie y la segunda a las 2/3 partes de la profundidad del agua. En cada uno de estos sitios se determinarán los parámetros de campo.

Para la determinación de la acumulación de los lodos dentro de la laguna es necesario medir en sitios específicos del fondo. No existe una técnica determinada para establecer los sitios de medición; pero es conveniente que se cubra el mayor número posible de puntos y que éstos correspondan principalmente a las zonas que, por la posición de los aeradores, líneas de corriente, la entrada o la salida están sujetas a las condiciones mínimas de agitación.

En general, en las lagunas aeradas los aeradores se sitúan espaciados de tal forma que sus radios de acción de mezcla se traslapen lo menos posible y en algunos casos, particularmente en las lagunas de mezclado parcial, se

establezcan zonas muertas para permitir la acumulación de los lodos y su degradación bajo condiciones anaerobias. Estos últimos sitios junto con los de profundidades mayores a los 3 m que permite la acumulación de lodos a(In en la zona de influencia directa del sistema de agitación son los recomendados para el muestreo.

La forma práctica de identificar los sitios de muestreo es utilizando estacas con banderas colocadas en los taludes a distancias preestablecidas. El acceso a los sitios de medición podrá hacerse mediante balsas o lanchas que deberán ser guiadas y posicionadas por el personal sobre los taludes. El principal error de medición se origina si no es posible establecer la posición exacta del fondo de la laguna, ya que por sus condiciones de humedad éste tiene una consistencia sernejante a la de los lodos acumulados. Es recomendable por lo tanto, que en la estaca se identifique con un señalamiento la profundidad de diseño. La medición se hace con un paño o cedazo, el cual puede ser enjuagado directamente con el agua de la laguna. Se recomienda que cada 10 a 15 mediciones se reemplace el paño por uno totalmente limpio. En caso de ser factible se sugiere emplear muestreadores de lodos, que consisten esencialmente en un tubo de acrílico transparente con una válvula check en el extremo inferior.

#### 6.3.1.4 Evaluación de la eficiencia

Dado que esencialmente las lagunas de estabilización se utilizan para remover microorganismos patógenos y la demanda bioquímica de oxígeno los principales parámetros de control son el número más probable (NMP) de coliformes fecales y la concentración de DBO, convirtiéndose estos en análisis rutinarios que deben realizarse al influente y al agua tratada. Asimismo, es recomendable evaluar la eficiencia de las lagunas en función de la remoción de huevos de helmintos, grasas y aceites, nitrógeno y fósforo, parámetros que se evalúan periódicamente. Para identificar si las condiciones ambientales limitan la actividad biológica es necesario medir el pH, temperatura, oxígeno disuelto y concentración de salinidad (que puede ser determinada indirectamente por la conductividad eléctrica).

#### 6.3.2. Factores del proceso

##### 6.3.2.1 Gasto de entrada

Los factores que afectan la degradabilidad de la materia orgánica y, por lo tanto, la eficiencia de la laguna son las condiciones ambientales: temperatura, pH y presencia de sustancias tóxicas. Para fines prácticos, la única opción real para controlar el proceso es el aumento, disminución o interrupción por un periodo, del gasto de entrada.

### 6.3.2.2 Nutrientes

En caso de que se identifique deficiencia de nutrientes (N y/o P), éstos, deben ser agregados en forma proporcional para asegurar el buen funcionamiento del sistema biológico. La forma más económica y simple de hacerlo es mediante el empleo de estiércol o de fertilizantes comerciales. Se debe identificar el contenido de cada elemento en los productos comerciales para agregar las cantidades apropiadas del compuesto.

### 6.4. MANTENIMIENTO

Se entiende por mantenimiento la conservación en buen estado de las unidades construidas y del equipo colocado para asegurar un funcionamiento continuo en forma eficiente. Existen dos tipos de mantenimiento:

- Preventivo. Se realiza para conservar en buen estado las instalaciones y equipo de la planta asegurando su buen funcionamiento y alargando su vida útil. En este caso se establece la ejecución de rutinas de trabajo que se realizan con mayor, o menor frecuencia para prevenir desperfectos.
- Correctivo. Consiste en la reparación inmediata de cualquier que sufran los equipo e instalaciones

El mantenimiento de las lagunas, bordos y áreas exteriores requiere un mínimo de equipo: material de construcción, herramienta de albañilería, material de limpieza, ropa de trabajo y equipo de protección para todo el personal. Para el mantenimiento de la superficie de la laguna, cuando se tienen grandes extensiones, se requiere, una lancha con un pequeño motor fuera de borda y remos. La lancha deberá ser insumergible.

Los dispositivos que requieren, inspección y mantenimiento continuo (por lo menos una vez al día) son: rejas y rejillas, desarenadores, vertedores, compuertas, estructuras de interconexión, de entrada y salida; asimismo, se deben verificar las condiciones superficiales de la laguna.

Por otra parte, las actividades de mantenimiento que se realizan en periodos más largos, de tiempo, como pueden ser semanas, meses o años, incluyen la reparación de bombas, compuertas, cercas y señales, pintura de elementos afectados por la corrosión, revisión de la profundidad de los lodos de las lagunas y conservación de los taludes, entre otras.

La Tabla 6.3 muestra las principales actividades que se deben desarrollar, de acuerdo con el operador del sistema de tratamiento, para garantizar una operación adecuada obteniendo las máximas remociones posibles,

Tabla 6.3 Actividades que integran el mantenimiento preventivo en sistemas lagunares

ACTIVIDADES	FRECUENCIA			
	Diario	Semanal	Mensual	Tanto como sea necesario
<b>BORDOS Y ZONAS ADYACENTES</b>				
Remoción de maleza en bordos y caminos de acceso				X
Reparación de la erosión o asentamientos				X
Reparación de las fugas de los bordos				X
Eliminación de madrigueras				X
Revisión de las condiciones de los caminos de acceso a la planta				X
Reparación y pintura de las señales y cercas				X
<b>EQUIPO DE PRETRATAMIENTO</b>				
Limpieza de rejillas y rejillas	c/4 h			
Disposición de basura	X			
Pintura de rejillas y rejillas				X
Limpieza de desarenadores		X		
Disposición de la arena				X
Pintura de los canales desarenadores				X
<b>ESTACIÓN DE BOMBEO</b>				
Limpieza de cárcamo de bombeo				X
Pintura de cárcamo de bombeo				X
Operación de la planta de emergencia de energía eléctrica		X		
Verificar con los de diversos niveles operacionales de cárcamo de bombeo con limpieza de flotadores de control de niveles		X		
<b>MOTORES DE LA ESTACION DE BOMBEO</b>				
Verificar que no produzca ruidos extraños	X			
Verificar la temperatura de operación	X			
Seguir la rutina de mantenimiento indicada por el proveedor o fabricante				X
<b>OPERACION DE LAS BOMBAS</b>				
Verificar que no produzca ruidos extraños	X			
Verificar el sello de agua y prensa-estopa	X			
Operar las bombas alternamente (de no existir un alternador automático)		X		
Inspeccionar el cople de la bomba y el motor		X		
Inspeccionar la lubricación de la bomba			3 mes	
Verificar la temperatura de operación de los baleros			3 mes	
Revisar y dar servicio a las bombas			6 mes	
Drenar la bomba para su paro por tiempo prolongado				X
Cabar la bomba antes de ponerla a operar				X
<b>SISTEMA LAGUNAR (Actividades repetitivas para casa laguna)</b>				
Inspeccionar las estructuras de entrada	X			
Limpiar las estructuras de entrada				X
Verificar el nivel del agua	X			
Corregir el nivel de agua de operación				X
<b>REVISIÓN DE LAS CONDICIONES SUPERFICIALES DE LA LAGUNA</b>				
Inspeccionar del color de la laguna	X			
Remover natas y/o espumas				X
Remover lodos superficiales				X

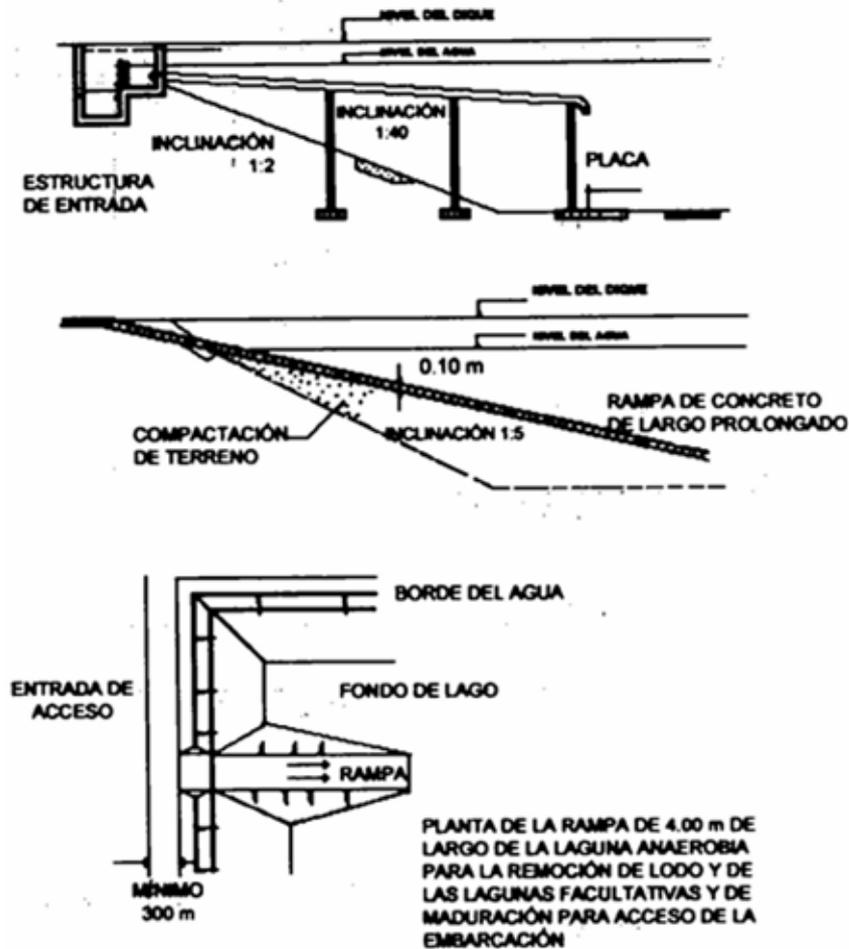
**Tabla 6.3 Actividades que integran el mantenimiento preventivo en sistemas lagunares (continuación)**

ACTIVIDADES	FRECUENCIA			
	Diario	Semanal	Mensual	Tanto como sea necesario
Remover vegetación del fondo				X
Remover vegetación suspendida				X
Controlar insectos, pulgas de agua y rotíferos				X
Inspeccionar las estructuras de interconexión	X			
Limpiar las estructuras de interconexión				X
Inspeccionar las estructuras de salida	X			
Limpiar las estructuras de salida				X
Calcular el gasto del efluente	X			
Calcular el tiempo de retención hidráulica (TRH)				X
Corregir el TRH				X
Calcular la carga orgánica			1	
<b>CONTROL DE CONDICIONES DE OPERACION</b>				
Sobrecargas				X
Evidencia de cortocircuitos				X
Condiciones anaerobias en lagunas facultativas				X
DBO alta en el efluente				X
Bajo oxígeno disuelto				X

FUENTE: IMTA, CNA y TACSA, 1994

En general, los problemas de mantenimiento pueden ser minimizados durante el diseño asegurando los siguientes puntos (Arthur, 1990):

- La entrada debe proporcionar una buena distribución del influente para evitar la sedimentación y acumulación de lodos cerca de la tubería de entrada. Para ello, se emplea un vertedor cerca de la entrada para retener el paso de las arenas. Si no se cuenta con un sistema de pretratamiento es conveniente usar varias tuberías de entrada.
- La salida puede localizarse a varias profundidades, o bien, proveer las salidas superficiales con un equipo de vaclo.
- En especial, las lagunas anaerobias pueden estar provistas de una rampa de acceso para la remoción de los lodos. En sistemas de grandes lagunas facultativas y de pulimento (> 2 ha) se puede colocar junto con el revestimiento un área de concreto como puerto para mantener una lancha que permita la remoción de natas y de malezas (Figura 6.10).



**Figura 6.10 Detalles de la rampa en lagunas anaerobias, facultativas y de pulimento**

La Tabla 6.4 presenta las actividades recomendadas para un mantenimiento preventivo.

Requerimientos de personal:

Los requerimientos de personal operativo para un adecuado control y mantenimiento del proceso, están dados en función de:

- Existencia de equipo auxiliar
- Tratamiento preliminar empleado
- Existencia de laboratorio
- Naturaleza del trabajo hecho en relación con el salario percibido
- Disponibilidad de equipo para mantenimiento mecánico
- Existencia de equipo auxiliar

La diversidad en número de la plantilla de trabajadores puede observarse en los siguientes ejemplos:

- ↗ Beer Sheva, Israel, trata 180 l/s en una laguna de 16 ha y requiere un trabajador de medio tiempo. La población servida es de 110,000 habitantes.
- ↗ Dandora, Nairobi, trata aproximadamente 690 l/s en una laguna de 95 ha y requiere una plantilla de 40 personas, de tiempo completo. La población servida es de 400,000 habitantes.

La recomendación para la plantilla de operadores de plantas que atienden a poblaciones de 10,000 a 250,000 habitantes, con áreas de trabajo relativamente pequeñas, se muestra en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5 Recomendación del numero de personal requerido en los sistema lagunares**

POBLACION SERVIDA	10,000	25,000	50,000	100,000	250,000
Superintendente/supervisor	-	-	1	1	1
Ingeniero mecánico <sup>a</sup>	-	-	-	1	1
Técnico analista <sup>b</sup>	-	1		1	2
Asistente del superintendente	-	1	2	2	2
Operadores	1	2	4	6	10
Chofer <sup>c</sup>	-	1	1	1	2
Personal de limpieza <sup>d</sup>	1	1	1	3	5
<b>TOTAL</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>is</b>	<b>25</b>

<sup>a</sup> Depende de la cantidad de equipo mecánico usado

<sup>b</sup> Depende de la existencia de un laboratorio

<sup>c</sup> Depende del uso de los vehículos especialmente de vaciado de lodos

<sup>d</sup> Depende de la localización y cantidad de equipo usado

Es recomendable que el supervisor esté presente durante la etapa de diseño, y puesta en servicio de manera, que se involucre en el proyecto, posea un mayor entendimiento del sistema. y entiendo la operación y mantenimiento del mismo.

## 6.5.PROBLEMAS OPERATIVOS

En, la Tabla 6.6 se enlistan los problemas operativos más comunes y sus soluciones.

**Tabla 6.4 Actividades recomendadas para el mantenimiento de los sistemas lagunares**

SECCIÓN	TIPO DE TRABAJO A REALIZAR
Mantenimiento del equipo e instalaciones de pretratamiento	
Rejas y rejillas	<p>Limpieza manual.- Se recomienda una limpieza cada 4 h mediante un rastrillo en donde los residuos acumulados son deslizados cuidadosamente hacia la plataforma de drenaje, evitando que pasen a través de las rejas y se introduzcan a la planta. Una vez que los residuos se han escurrido, se deben depositar en un recipiente metálico con tapa y se mandan, a disposición final (ej, rellenos sanitarios). Como las rejillas están en una atmósfera húmeda hay que protegerlas de la corrosión pintándolas cada 6 meses con pintura epóxica. Generalmente, las plantas de tratamiento poseen dos canales desarenadores con sendas rejillas lo cual permite su uso alterno.</p> <p>Limpieza automática.- Requiere</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Verificar que el rastrillo viaje libremente en todo el ciclo de operación.</li> <li>* Lubricar todas las partes móviles, como: baleros, cadena, etc., periódicamente, de acuerdo con el fabricante.</li> <li>* Pintar cada 6 meses toda la unidad o cuando sea requerido.</li> </ul>
Canales desarenadores	<p>Las instalaciones de tratamiento pueden incluir uno o dos canales desarenadores con remoción de la arena acumulada en el fondo por lo menos una vez por semana, efectuándose más frecuentemente su limpieza en épocas de lluvia y en caso de un aumento repentino del caudal. Los canales operan alternativamente por medio de compuertas de control manual, de tal forma que se pueda realizar la limpieza de uno de ellos en tanto se mantiene el otro en operación. Es recomendable que se revise semanalmente el nivel de arena sedimentada y que se realice la limpieza de los canales al llegar ésta a 5 o 6 cm de acumulación. Asimismo, es necesario este control después de lluvia abundante. La limpieza de los canales se realiza en la forma siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Con el agua residual aún circulando, se agita la arena del fondo con una pala para desprender la porción de materia orgánica depositada.</li> <li>• Después se drena el canal y se extraen los sedimentos con una pala y se disponen. Para evitar la corrosión se utiliza pintura epóxica una vez por año. En canales donde la remoción de arena se efectúa mediante colectores de gusanos (bombas de tornillo) o cadenas, hay que revisar su desgaste cada 6 meses y los baleros y pernos de anclaje cuando menos una vez al año. La lubricación de todas las partes móviles se hace de acuerdo al manual del fabricante.</li> </ul>

**Tabla 6.4 Actividades recomendadas para el mantenimiento de los sistemas lagunares (continuación)**

SECCIÓN	TIPO DE TRABAJO A REALIZAR
Estación de bombeo	
Carcámos	Los cárcamos de bombeo deben ser inspeccionados cuando menos cada año. Todas las partes de metal y concreto que están en contacto con el agua residual deberán tener una capa de pintura anticorrosiva, la cual debe aplicarse cuando sea necesario. Las estructuras en la estación de bombeo deben tener guardacables y se debe limpiar perfectamente el área. No se deben tener orificios en el cárcamo seco y las bombas de achique deben funcionar al nivel que se requiere.
Motores	Los motores deben ser lubricados después de 2000 horas de operación o el periodo marcado por el fabricante.
Bombas	Las bombas deben ser lubricadas estrictamente bajo las recomendaciones del fabricante. Se debe revisar el alineamiento de la flecha de la bomba con la flecha del motor periódicamente, esto alargará la vida de los baleros del motor y la misma bomba. Los baleros deben ser lubricados cada 500 horas de operación, dependiendo de las condiciones del servicio.
Mantenimiento de las lagunas	
Bordos y caminos de acceso	Los bordos, caminos de acceso y zonas adyacentes a la planta de tratamiento deben mantenerse libres de maleza ya que ésta favorece la proliferación de mosquitos y otros tipos de insectos. Para ello, es aconsejable tener una rampa de concreto en algunas de las esquinas de la laguna con el objeto de permitir el lanzamiento y retiro de los botes de remos. El uso de botes de motor se recomienda cuando las lagunas son mayores de 2.5 ha. Es importante mantener las cercas en buen estado para evitar la entrada de animales y personas ajenas a la planta.
Estructuras de entrada, salida, interconexión y para medición de flujo.	Todas las estructuras de entrada, salida e interconexión deben ser limpiadas diariamente. En caso de tuberías, se utiliza un equipo para desazolve manual, el cual tiene un tirabuzón que engancha el material que está tapando la tubería y permite que sea retirado. Los vertederos, canales, compuertas y estructuras especiales como son los deflectores de espuma y mallas deben ser limpiados con la ayuda de cepillos de mango largo. Para válvulas de 4 pulgadas en adelante se recomienda un mantenimiento preventivo cada 6 meses que consiste en cambiar los estoperos y verificar que el prensa-estopa no presente fugas.

**Tabla 6.4 Actividades recomendadas para el mantenimiento de los sistemas lagunares (continuación)**

SECCIÓN	TIPO DE TRABAJO A REALIZAR
Condiciones superficiales de la laguna	<p><i>Remoción de la matetia flotante.-</i> El crecimiento excesivo de algas, del manto de lodos, la formación de capas de nata y espuma, así como la acumulación de grasas, aceite, madera, papel, hojas y otro tipo de material flotante impide el paso de la luz solar, y por tanto reducen la fotosíntesis y la producción de oxígeno, provocando una <i>reducción en la eficiencia de la laguna</i>. Asimismo, esta clase de material puede obstruir las estructuras de entrada y salida por lo que debe ser removido de la superficie de la <i>laguna</i> mediante un cedazo. A su vez, cuando las algas contenidas en la nata mueren provocan malos olores por lo que es necesario removerlas, estruirlas o dispersarlas con la ayuda de un chorro de agua de una manguera o con cucharones de mango largo (cedazo).</p>
	<p><u><i>Control de la vegetación acuática.-</i></u> La vegetación superficial en las <i>lagunas</i> la constituyen la lenteja y las macrofitas el como el lirio acuático. Para remover esta vegetación es necesario emplear cribas y rastrillos o una lancha con un dispositivo para recolección colocado al frente para retirarla físicamente. La vegetación adherida al fondo de la <i>laguna</i> o a los taludes internos (en la porción que se encuentra inundada) causan problemas de zonas muertas, detienen la espuma formando un lugar apropiado para la proliferación de mosquitos y pueden constituir el alimento de animales que al hacer sus madrigueras perforan los bordos. La manera en que deba ser removida variará según su tipo y sitio de crecimiento y podría ser arrancada a mano, aumentar el nivel del agua hasta inundarla, o bien, disminuir el nivel hasta que quede expuesta y pueda ser destruida mediante quemadores especiales de gas.</p>
	<p><u><i>Control del nivel del agua de la laguna.-</i></u> El nivel normal de operación de la <i>laguna</i> es el especificado en la memoria de cálculo; también en este documento se encuentran los niveles mínimo y máximo. Se recomienda que la <i>laguna</i> nunca opere a su nivel máximo porque cualquier variación del caudal podría ocasionar desbordamientos y la destrucción de bordos e inundaciones.</p>
	<p><u><i>Control biológico.-</i></u> Consiste en sembrar y promover el desarrollo de otros organismos predadores, como son los peces, para que se alimenten con la flora o fauna nocivas para el proceso. Este método sólo puede aplicarse en lagunas facultativas con baja carga orgánica o en <i>lagunas</i> de pulimento que conserven cierto nivel mínimo de oxígeno disuelto y que haya estado en operación por algunos años. El uso de insecticidas o productos químicos, en general, no es recomendable porque provoca la contaminación del agua a tratar y/o de la tierra sobre la cual se está aplicando el producto.</p>

**Tabla 6.4 Actividades recomendadas para el mantenimiento de los sistemas lagunares (continuación)**

SECCIÓN	TIPO DE TRABAJO A REALIZAR
Control y eliminación de lodos	<p><u>Deterniinación de la profundidad de los lodos.</u>- Para conocer a que profundidad se encuentra el lodo, se utiliza una lancha posicionada cerca de la estructura de entrada de la laguna. Si la profundidad medida es mayor que un tercio de la profundidad de diseño de la <i>laguna</i>, se debe proceder al drenado y remoción de los lodos.</p>
	<p><u>Drenado de la laguna.</u>- Cuando el sistema lagunar está operando en serie se deriva el flujo de agua de la <i>laguna</i> que que va a ser drenada a la siguiente. Si las lagunas están operando en paralelo, el agua residual se desvia de la laguna que va hacer drenada a la <i>laguna</i> adyacente. Asimismo, se debe procurar que la laguna se vacíe completamente, modificand.o en paso de, ser posible, la altura de la estrutura de entrada a la misma. Cuando las <i>lagunas</i> comienzan a llenarse a la mitad de, su capacidad (cerca de dos años para primarias anaerobias y casi 20 años para primarias facultativas) deben ser desalzolvadas. Las <i>lagunas</i> facultativas secundarias no requieren desalzolves hasta cerca de los 40 años, y en ocasiones nunca durante su vida útil. La profundidad de los lodos puede ser determinada por muestreo en una columna transparente. Cuando se requiere constantemente el Desazolve (por ejemplo en las lagunas anaerobias o facultativas sin desarenador) o cuando se tienen largas épocas de sequía es deseable el secado del lodo y la remoción del mismo por excavación. Se deben considerar dos <i>lagunas</i> para estos casos.</p>
	<p><u>Retiro y disposición de lodos.</u> Existen dos métodos para retirar, los lodos: en seco y húmedo; La mejor forma de hacer es en seco, dejando que los lodos queden expuestos al sol. Una vez que los lodos están lo suficientemente deshidratados, se produce retirarlos por el medio, que se disponga: carretilla, carretas o mecánicamente. Se recomienda dejar una capa delgada de lodos en el fondo para ayudar al restablecimiento del proceso cuando la laguna nuevamente opere, conservando al mismo tiempo un colchón que proteja el fondo. Una vez al año se debe medir la profundidad delos lodos de las lagunas anaerobias.</p>
Aeradores superficiales	<p><u>Lubricación.</u>- Se recomienda seguir las instrucciones de los fabricantes de cada equipo, en su defecto se sugiere el mantenimiento preventivo basado, principalmente en la lubricación del motor. En los motores más grandes la lubricación es cada 4 meses.</p>
	<p><u>Inspección.</u>- Es aconsejable una inspección periódica de los cables. de sujeción y líneas de alimentación eléctrica, asi como la lectura del amperaje en el tablero de control para verificar que los motores no están sobrecargados.</p>

**Tabla 6.6 Problemas operativos comunes y su posible solución**

CONTROL DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA			
INDICADORES/OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
El exceso de vegetación acuática superficial es evidente así como la formación de natas, espumas e islotes en costados y esquinas.	Mala circulación, ausencia de mantenimiento, o poca profundidad Insuficiente del agua	Para la vegetación suspendida utilice rastrillos o un tablón en una lancha para empujarla a la orilla y retirarla físicamente.	Eficiencia baja Incumplimiento de las condiciones de descarga
La vegetación proporciona alimento a los animales que forman madrigueras en los bordos y es causa de cortos circuitos. Detiene la acción de las olas de manera que se junta la espuma, proporciona refugio que permite la proliferación de insectos y se desarrollan olores en la zona quieta. Además, impide la penetración de la luz y evita la acción del viento, por lo tanto, reduce el oxígeno disuelto en la Laguna. Por último, la penetración de las Raíces puede causar fugas en el sello, de la Laguna (si existe)	Exceso de nutrientes en el influente	En el caso de vegetación fija en el fondo, aumente el nivel de agua hasta tapar la vegetación; o bien, baje el nivel del agua hasta exponer la vegetación y luego quemelas con quemadores especiales de gas.	Proliferación de insectos Si hay infiltración se puede provocar la contaminación del manto freático

**Tabla 6.6 Problemas operativos comunes y su posible solución  
(continuación)**

CONTROL DE ANIMALES O HACEN MADRIGUERAS			
INDICADORES/OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
Los animales que hacen madrigueras tienen que ser controlados ya que debilitan los bordos de las lagunas. Los animales más frecuentes son ratas de campo y conejos silvestres	Un bordo sin chapeado atrae a los animales como, una alta población de estos en el área circunveciana a la planta de tratamiento.	Remueva cualquier indicio de comida en los alrededores de la planta. Las ratas de campo prefieren una madriguera parcialmente mojada. Si el operador sube el nivel del agua, la rata hará excavación hacia arriba. Algunas veces bajando y subiendo, el nivel del agua las ratas abandonan la madriguera. Use trampas con carnada envenenada. Ponga cercas alrededor de la planta.	Infiltraciones, deslaves y desbordamiento de las aguas residuales.

**Tabla 6.6 Problemas comunes y su posible solución fuente: imta, cna y tacsá, 1994 (continuación)**

CONTROL DE LA VEGETACIÓN DE LOS BORDOS Y ÁREAS LITORAL			
INDICADORES/ OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
<p>Crecimiento de vegetación, matorrales y otras plantas proporcionan lugares otras plantas proporcionan lugares propicios para la indicación de animales que pueden debilitar los bordos y dar mal aspecto. También reducen la acción del viento en la laguna. El area litoral poco profunda puede permitir el en raice y crecimiento de la vegetación.</p>	<p>Mal mantenimiento.</p>	<p>Se recomienda podar periódicamente la vegetación. Siembre en los bordos una mezcla de pasto que forme una buena cama de nos permita el crecimiento de plantas altas, de tal forma que apriete la tierra y gane la competencia a otras plantas. Ponga un zampeado en los bordos. Aumente el nivel del agua hasta tapar la vegetación, o bien, baje el nivel del agua para exponer la vegetación, y luego quemelas con un quemador de gas. Practique el pastoreo por rotación para evitar que se acaben las especies de pasto. Un ejemplo, es el Pastoreo de cada área por dos meses de cada semestre. Rocíe un producto químico para destruir la vegetación. Asegurese de consultar con las autoridades antes de aplicarlo.</p>	<p>Más aspectos. Desaprobación de la planta por la Comunidad</p>
<p>El control de natas se requiere para prevenir problemas de olores y eliminar los sitios de reproducción de los mosquitos. Además, masas flotantes reducen la penetración de la luz solar.</p>	<p>El material del fondo de la laguna se está levantando y el lodo está flotando en la superficie. Mala circulación y poca acción del viento. Grandes cantidades de grasas y aceites en el influente.</p>	<p>Utilice rastrillos, una bombas portátil para hacer, un chorro de agua o una lancha de motor para romper la nata. Una vez rota se hunde. Cualquier nata remanente debe retirarse y disponerse enterrandola o transportandola a un relleno sanitario. Elimine cargas industriales que tengan exceso de grasas y aceites. Coloque una unidad de flotación antes de la laguna</p>	<p>Bajas eficiencias. Incumplimiento de las condiciones de descarga. Mal aspecto. Deprobación de la planta por la comunidad.</p>

**Tabla 6.6 Problemas comunes y su posible solución fuente: imta, cna y tacsá, 1994 (continuación)**

CORRECCION DE SOBRECARGAS, ANAEROBIAS Y CONTROL DE MALOS OLORES			
INDICADORES/ OBSERVACIONES	CAUSAS PROBLEMAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
Alto nivel de olor	Corto circuitos, descarga de desechos tóxicos, previsión errónea de cargas orgánicas en el diseño, aumento en la carga orgánica de la población contribuyente, presencia de industrias, etc. Condiciones climáticas desfavorables. En el caso de lagunas facultativas puede deberse además a que la población de algas es escasa debido a la presencia de predadores.	Cambie de operación en serie a paralelo para dividir la carga. Investigue la posibilidad de corto circuitos y ejecute las medidas indicadas para el control de natas. Pc ser posible instale aeración suplementaria. De no existir construya una laguna aerobia. Construya lagunas adicionales. Elimine las fuentes de descargas tóxicas. En algunos casos se puede obtener alivio, temporal agregando nitrato de sodio (24 kg/1000 m <sup>3</sup> ).	Incumplimiento, de las condiciones de descarga. Problemas en el sitio de descarga de malos olores. Desaprobación de la planta por la comunidad.
El efluente presenta una alta concentración de DBO y sólidos suspendidos, pH y oxígeno disuelto bajos y color grisáceo. Presencia de natas en la superficie de la laguna.			

**Tabla 6.6 Problemas comunes y su posible solución fuente: imta, cna y tacsá, 1994 (continuación)**

CONTROL DE ALGAS AZUL-VERDE			
INDICADORES/ OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
<p>Ante la proliferación de algas azul-verdes, se debe identificar si la concentración de estas algas disminuyen la eficiencia, de lo contrario, déjelas. La presencia de. Estas algas puede provocar bajo pH (menor de 6.5) y oxígeno disuelto menor a 1 mg/l. Cuando las algas mueren provocan malos olores.</p>	<p>Tratamiento incompleto, sobrecarga y/o balance inadecuado de nutrientes.</p>	<p>Incorporación balanceada de nitrógeno en la forma más económica que se pueda identificar. Ej. desechos de establos, gallinas, etc. Rompa los crecimientos de algas con una lancha de motor o con una bomba portátil y una manguera. El motor de la lancha debe ser de enfriamiento por aire ya que las algas pueden apagar los motores enfriados por agua. Elimine desechos industriales en caso extremo, aplíquese tres veces al mes una solución de sulfato de cobre. Si la alcalinidad es &gt; 50 mg/l aplique 1.254 kg de sulfato de cobre por cada 1000 M<sup>3</sup>. Si la alcalinidades &lt; 50 mg/l aplique 0.6 kg de sulfato de cobre por cada 1000 m<sup>3</sup>. Se debé tener cuidado de no descargar el efluente a un cuerpo receptor con peces ya que 1 mg/l de sulfato de cobre, es tóxico.</p>	<p>La presencia de algas azul-verdes es indeseable ya que impiden el paso de la luz y algunas especies producen sustancias tóxicas para el resto de los microorganismos, afectando así el proceso de tratamiento. Bajas eficiencias. Incumplimiento de las condiciones de descarga.</p>

**Tabla 6.6 Problemas comunes y su posible solución fuente: imta, cna y tacsá, 1994 (continuación)**

CONTROL DE INSECTOS			
INDICADORES/ OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
Presencia de insectos en el área y de larvas e insectos en la laguna	Mala circulación. Mantenimiento insuficiente. Presencia de malezas y vegetación acuática, que provee refugio a las	Mantenga limpia de vegetación la laguna y el litoral. Mantenga la laguna libre de natas. Siembre la laguna con pez gambusia (pez mosquito). Controle el nivel de operación. Las perecen, por secado (bajo nivel de agua) o hundimiento (alto nivel de agua). Mantenga una profundidad máxima en la laguna para evitar la, vegetación emergente que es fuente de insectos. Se recomiendan profundidades mayores de 0.90 m.	Existe la posibilidad de fomentar, la proliferación de insectos que provoquen enfermedades en el hombre. Ej. el paludismo. Desaprobación de la planta por la comunidad.
REMOCION DE ALGAS EN EL EFLUENTE			
INDICADORES/ OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
La mayoría de los sólidos suspendidos presentes en el efluente de una laguna se deben a las algas y son difíciles de remover	Condiciones climáticas o de temperatura que favorecen a una población particular de algas	Extraiga el efluente de abajo de la superficie usando un buen arreglo de divisiones con mamparas. Use lagunas múltiples en serie. Use filtros intermitentes de arena o de filtros de roca sumergidos. En algunos casos se an usado dosis de 20 mg/l de sulfato de aluinhlio en las, lagunas finales para mejorar la calidad del efluente en descargas intermitentes.	Incumplimiento de las condiciones de descarga.

**Tabla 6.6 Problemas comunes y su posible solución fuente: imta, cna y tacsá, 1994 (continuación)**

CORRECCION DE BAJAS CONCENTRACIONES DE OXIGENO DISUELTO			
INDICADORES/OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
La tendencia de una disminución continua del oxígeno disuelto lleva a tener condiciones anaerobias lo que genera emisión de malos olores.	Muerte de algas, sobrecargas, penetración insuficiente de luz por la formación de natas o vegetación superficial y descargas de desechos tóxicos. El oxígeno disuelto durante el día no debe bajar de 3.0 mg/L durante los meses de calor.	Reduzca la carga orgánica en las lagunas primarias cambiando a operación en paralelo. Remueva la vegetación suspendida si ésta cubre más del 40% de la laguna. Utilice la recirculación usando, una, bomba portatil para regresar parte del efluente final al inicio, de la planta. Determine si la sobrecarga se debe a una, fuente industrial y elimínela	Bajas eficiencias. Incumplimiento de las condiciones de descarga. Posible, desarrollo de mal olor. Desaprobación de la planta por la comunidad.
CORRECCION DE LA TENDENCIA DECRECIENTE DEL pH			
INDICADORES/OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
El pH es uno de los factores que controlan la dinámica de población y las algas. Modifica el balance de carbonatos, lo que provoca que el pH presente valores alcalinos. Al no haber consumo de bióxido de carbono, el pH decrece y trae como resultado la muerte de las algas. Mida el pH a la misma hora cada día y haga una gráfica con los resultados para hacer evidentes los cambios anormales.	La principal causa es por la descarga de compuestos tóxicos, por la presencia de predadores como la Daphnia, o por un mal balance de nutrientes.	Use operación en paralelo. Investigue posible presencia de tóxicos y suprima la fuente De ser posible, aplique recirculación del efluente de la laguna. Elimine los predadores de algas. Analice el agua residual para verificar si el balance de nutrientes es adecuado.	Bajas eficiencias. Incumplimiento de las condiciones de descarga.

**Tabla 6.6 Problemas comunes y su posible solución fuente: imta, cna y tacsá, 1994 (continuación)**

CORRECCIÓN DE CORTO-CIRCUITOS			
INDICADORES/OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
Problemas de olor, bajo oxígeno disuelto en algunas partes de la laguna, condiciones anaerobias y bajo pH. Si al revisar estos parámetros se encuentran diferencias del 100 a 200% pueden indicar corto circuitos. Evidencia de áreas que no tienen buena Circulación.	Pobre acomodo de las estructuras de entrada y de salida. La forma de la laguna, el crecimiento de maleza o a la irregularidad del fondo modifican el escurrimiento.	Instale divisiones alrededor de la entrada para mejorar la distribución del influente. Coloque chicanas en todo el cuerpo de la laguna. Coloque nuevos puntos de entrada y salida incluyendo entradas múltiples. Elimine la maleza. Nivele el fondo.	Bajas eficiencias del proceso. Incumplimiento de las condiciones de descarga. Mal olor.
CORRECCION DE LA DBO ALTA EN EL EFLUENTE			
INDICADORES/OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
Concentraciones altas de DBO que están fuera de las condiciones particulares de descarga.	Tiempo de retención hidráulica insuficiente. Inadecuada localización de las estructuras de entrada y salida. Altas cargas, orgánicas o hidráulicas. Posiblemente existencia de compuestos tóxicos en el influente.	Revise el diseño de la planta e identifique, causas potenciales del problema. Aplique las medidas citadas para el caso de sobrecarga, condiciones anaerobias y malos olores. Utilice bombas portátiles para recircular el agua. Elimine las descargas industriales están por arriba de lo normal. Evite las descargas tóxicas.	Incumplimiento de las condiciones de descarga.
CONTROL DEL NIVEL DEL AGUA RESIDUAL			
INDICADORES/OBSERVACIONES	CAUSAS	SOLUCIONES	REPERCUSIONES
La laguna tiende a secarse fácilmente provocando olor desagradable, crecimiento de plantas y proliferación de insectos.	Infiltración a través del fondo o por los diques.	Cuando la infiltración es a través del fondo es necesario reponer la capa de arcilla o impermeabilizar por otros medios como con geomembranas	Puede contaminar el manto freático

## 7. TRATAMIENTOS COMPLEMENTARIOS Y SISTEMAS CON LAGUNAS

Es común que las lagunas se construyan en combinación con otros procesos ya sea para:

- Mejorar la calidad de su efluente.
- Producir junto con otros procesos, un sistema flexible

### 7.1. TRATAMIENTOS COMPLEMENTARIOS

Las lagunas producen efluentes de nivel secundario los cuales son compatibles con diversos reúsos y aceptables para descargar en varios cuerpos de agua. En caso de requerir una calidad más elevada, existen opciones entre las que se encuentran:

- Los filtros de roca y los filtros rápidos de arena (poco usados)
- La filtración intermitente con arena (una técnica muy empleada y documentada)
- La acuicultura
- Los humedales
- El suelo como método de tratamiento

Por desgracia, la mayoría de los datos que se disponen de estos procesos son generahmente para lagunas con baja carga (Marshall y Middlebrooks, 1974; Harris et al, 1977; Harris et al, 1978; Hill, et al 1977, en Truax y Shindala, 1994).

En la Tabla 7.1 se presenta un resumen de los sistemas para mejorar la calidad del efluente de las lagunas de estabilización.

**Tabla 7.1 Tecnología para mejorar la calidad del efluente de lagunas**

Parámetro	Filtros intermitentes de arena	Humedales	Humedales artificiales	Filtros de roca	Acuicultura	Suelo con tratamiento a baja tasa
Número de Operadores	>30	> 80	> 90	-20		N/A
Efectividad en la eliminación de SST	Buena	Buena	Buena	Pobre	Buena	Buena
Remoción de N-NH <sub>3</sub>	Buena con excepción de climas fríos	Pobre a menos que incluya aeración	Pobre a menos que incluya aeración	Pobre	De mediana a excelente	Buena
Remoción de H <sub>2</sub> S	Buena con excepción de climas fríos	Pobre en invierno	Pobre en invierno	Pobre	N/A	Buena
Parametro	Filtros intermitentes de arena	Humedales	Humedales artificiales	Filtros de roca	Acuicultura se encuentra en un invernadero	Suelo con Tratamiento a baja tasa no se puede operar en condiciones de congelación 6 a 21 ha por 1000 m <sup>3</sup> /d
Efectos del clima frío	Disminuye la remoción del H <sub>2</sub> S y N-NH <sub>3</sub>	Disminuye la remoción de H <sub>2</sub> S y N-NH <sub>3</sub>	Disminuye la remoción de H <sub>2</sub> S y N-NH <sub>3</sub>	N/A		
Area requerida	Problemas de operación en caso de congelamiento < 1 ha por 1000 m <sup>3</sup> /d	6 a 8 ha por 1000 m <sup>3</sup> /d	3 ha por 1000 m <sup>3</sup> /d	N/A	N/A	

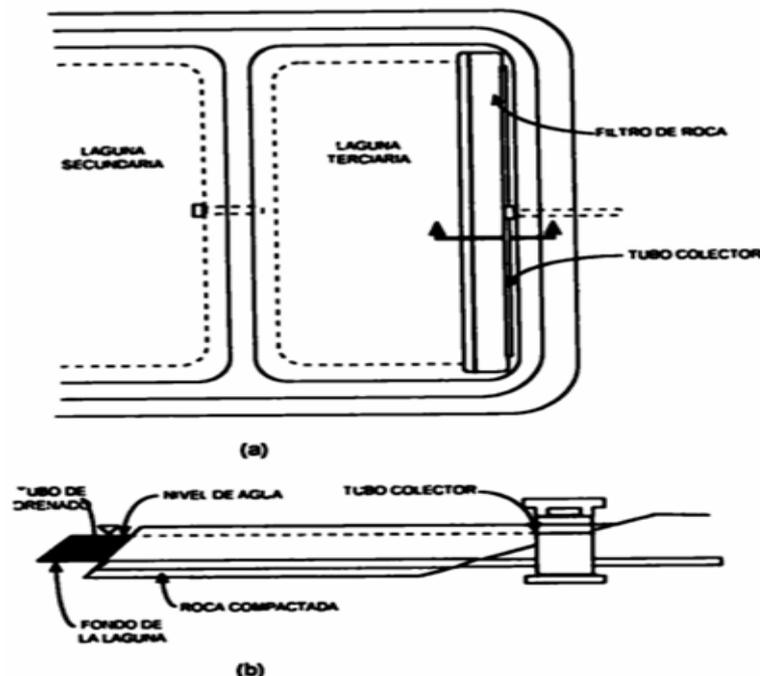
### 7.1.1.Filtración

Los filtros de roca se contruyen en la laguna cerca de la salida permitiendo la sedimentación de las algas en las superficie de la roca y en los espacios vacios (Figura 7.1)

Por su parte, los filtros intermitentes tienen las siguientes ventajas:

- ☺ Se pueden construir con un costo de capital relativamente bajo, si el costo de la tierra y del medio no son prohibitivos.
- ☺ Su mantenimiento y operación son muy sencillos
- ☺ No afectan las temperaturas bajas ni las variaciones de la calidad del influente.

En general, los filtros intermitentes se diseñan como pares de celdas múltiples con tiempos de operación que van de 2 a 8 h/d. Se alimentan en forma secuencial, de preferencia en la noche para controlar la parición de lagas, y su efluente se drena durante el día. Truax y Shindala (1994) demostraron que los filtros se colmatan en periodos muy cortos a velocidades de filtración de 0.2 m/h observaron una buena operación. Cada filtro opera entre 20 y 30 días antes de su colmatación. Es frecuente observar la aparición de hierba en la superficie del filtro que puede retirarse manualmente. Este sistema tiene la ventaja de disminuir el contenido del fósforo del agua.



**Figura 7.1 Filtro de roca dentro de una laguna facultativa (a) vista de planta y (b) sección transversal**

### 7.1.2. Acuicultura

Los sistemas de acuicultura (por ejemplo, estanque de patos y lirios) aunque muy proclamados por los ecologistas, tienen la desventaja de que son inconsistentes en sus eficiencias y difíciles de controlar (O' Brien y McKinnon 1979 Swanson y Williamson, 1980, en Truax y Shindala 1994). Además, introducen el problema del control del crecimiento y disposición de la vegetación eenerada.

### 7.1.3. Humedales

Los humedales se aplican para lagunas de 20 a 1000 L/s. Alcanzan una calidad en el efluente similar a tratamiento convencional a nivel secundario o avanzado. Para la remoción de nutrientes (fósforo y nitrógeno), se requiere que la carga orgánica sea pequeña. Se pueden emplear celdas múltiples o por etapas cada una diseñada para objetivos específicos. En general, los humedales se integran en sistemas compuestos por:

- Pretratamiento
- Laguna de facultativa y
- Laguna de maduración
- Humedad

Es importante mencionar que los humedales se deben diseñar con criterios específicos para cada región que deben considerar profundidad y permeabilidad del suelo, niveles de agua estacionales, topografía, forma y tamaño del predio, cortina de árboles y condiciones climatológicas (Tabla 7.2).

**Tabla 7.2 Parametros diseñados para humedales**

Concepto	Tratamiento	Necesidades de clima	Tiempo de retención	Profundidad m	Carga hidráulica m/ha/d	Calidad del efluente
Natural	Pulimento T.A.V a partir de efluente secundario	Cálido	10	0.2-1	100	DBO 5-10 SST 5-15 NTK 5-10
Construido	Secundario T.A.V.	Ninguno	7	0-1-0.3	200	DBO 5-10 SST 5-15 WK 5-10
Lechos de raíces	Secundario T.A.V.	Cálido	0.3		600	DBO 5-40 SST 5-20 WK 5-20

### 7.1.4. Tratamiento en suelo

El suelo, como método de tratamiento (land treatment) es una técnica muy empleada y ampliamente recomendada. Es una operación terciaria de post-tratamiento que demanda grandes requerimientos de tierra y es muy en zonas de donde escasea el agua (Middlebrooks, E., 1974 en Truax y Shindala, 1994).

## 7.2. SISTEMAS QUE EMPLEAN LAGUNAS

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, las lagunas también se pueden utilizar en combinación con procesos de tratamiento de agua para obtener efluentes de alta calidad.

### 7.2.1. Proceso Sutton

El proceso Sutton (Figura 7.2) consiste en una planta de aeración extendida nitrificante seguida por lagunas de pulimento donde se nitrifica el agua y se digieren los lodos del sistema biológico.

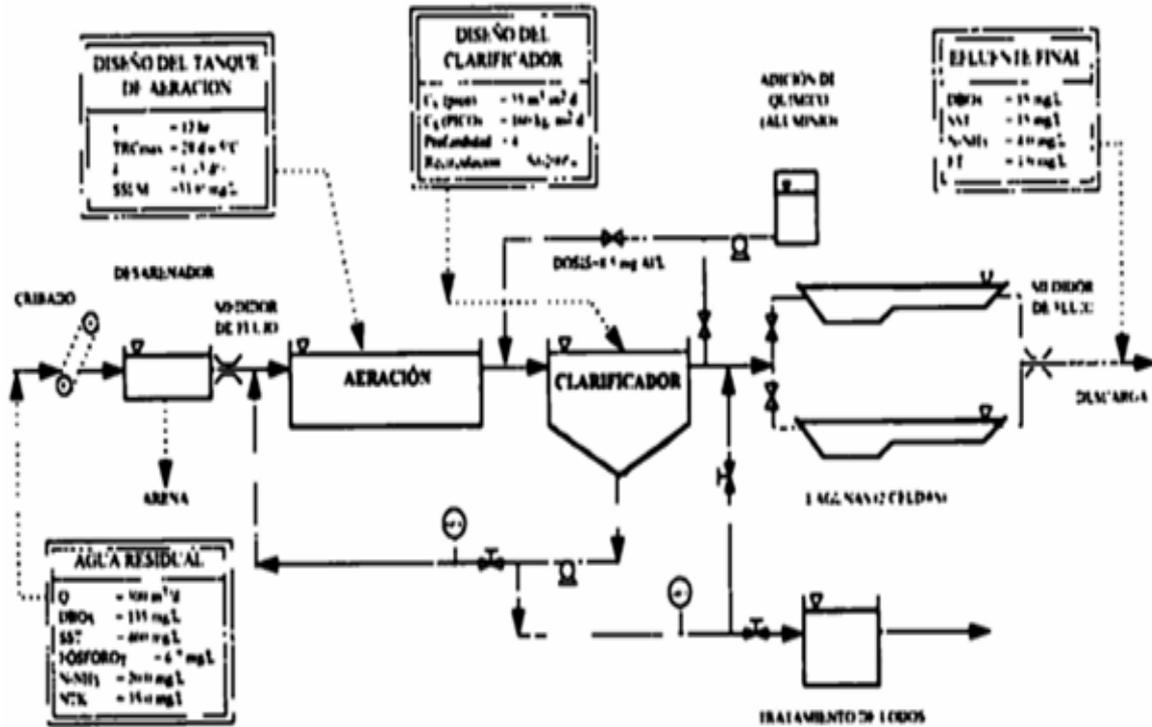


Figura 7.2 Diagrama de flujo de una instalación con el proceso Sutton

Las variaciones de calidad del efluente de la laguna se muestran en la Figura 7.3. El lodo generado puede ser empleado en la agricultura.

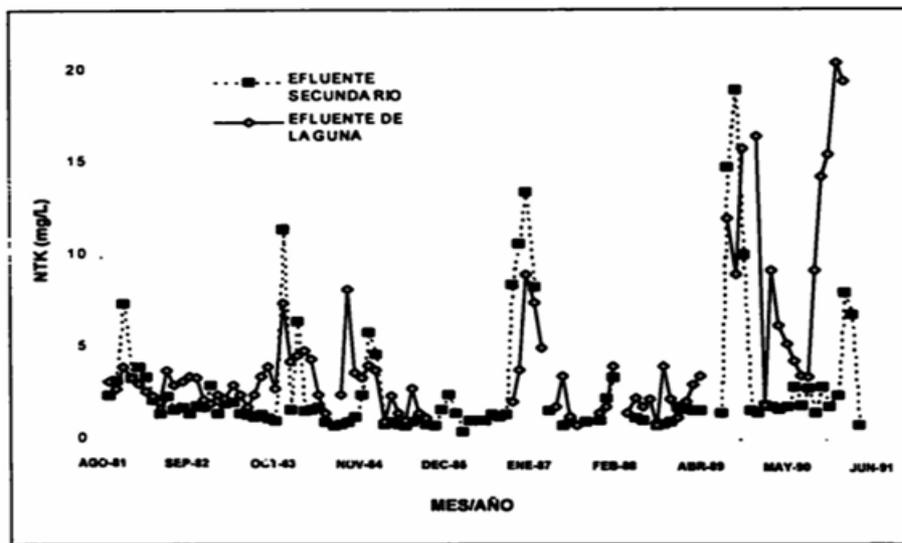


Figura 7.3 Concentraciones de nitrógeno total Kjeldahl en un sistema Sutton

Los principales problemas operacionales identificados son:

- ⊗ Presenta una degradación en la calidad del efluente después de varios años de operación debido, a una resolubilización del amoníaco presente en los sedimentos de la laguna.
- ⊗ Hay una flotación de lodos y natas en los sedimentadores secundarios relacionadas con la edad de, los lodos (45 a 1484), la desnitrificación, o ambos. La falta de desnatadores en esta etapa dificulta el manejo y control de, lodos flotados que van directo a la laguna.

### 7.2.2. Proceso New Hamburg

Por su parte, en el concepto New Hamburg (Figura 7.4), las lagunas aeradas o facultativas son usadas como, una primera etapa en el proceso de tratamiento para mantener una cantidad constante de SST en el efluente y éste, sea rociado, sobre, un filtro intermitente. La materia particulada incluyendo las algas son eliminadas durante el proceso de filtración. La nitrificación ocurre durante el paso del agua residual a través del filtro y su exposición ante bacterias nitrificantes adheridas a la arena. Los filtros no requieren retrolavado ya que cuando una de las celdas se tapa se deja fuera de servicio para su auto regeneración y cambio de las capas superiores del medio del medio filtrante. LA Tabla 7.3 muestra algunas condiciones de operación.

**Tabla 7.3 Condiciones de operación**

Pretratamiento	Cribado
	Desarenación
Lagunas Facultativas	
Número	2
Superficie	11.1 ha
Tiempo de retención	102 d
Filtración	
Número	4
Carga superficial	562S l/m <sup>2</sup> d
Remoción de Fósforo	
Reactivos	Alúmina
Punto de adición	Lagunas o filtros
Características del efluente	DBO: 10 mg/l
	SST: 15 mg/l

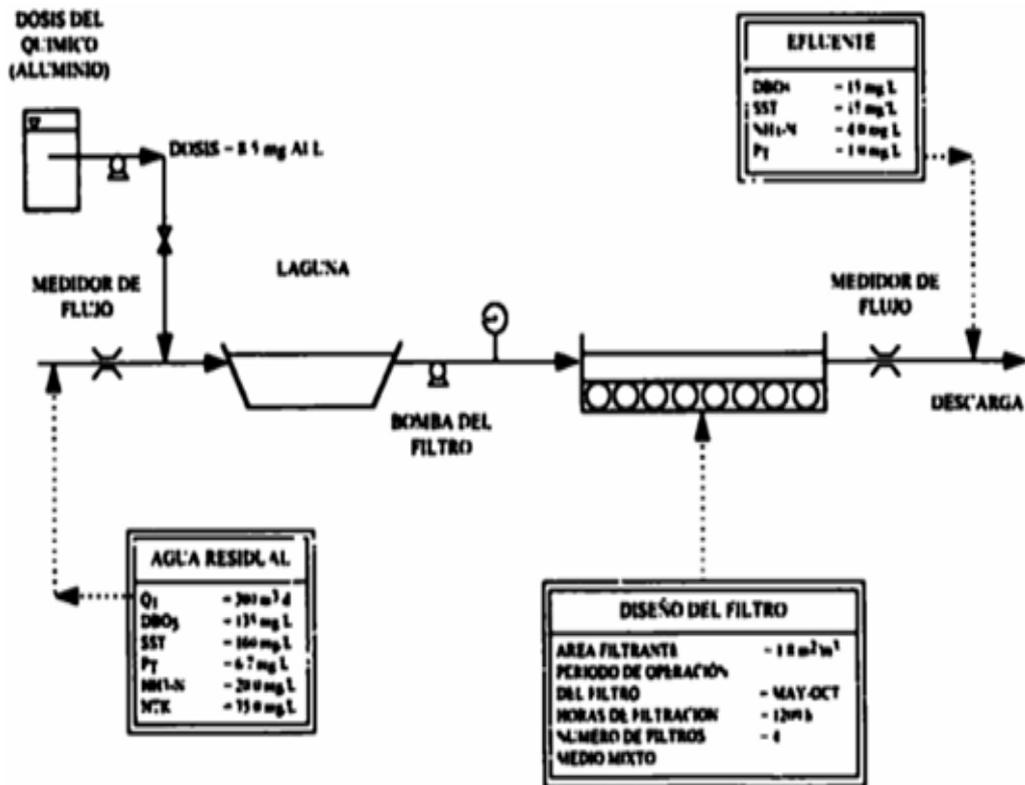


Figura 7.4 Proceso New Harnburg

### 7.2.3. Plantas de tratamiento avanzado de lagunas combinadas con reactores biológicos

Al cabo de diversas investigaciones se ha demostrado, que el acoplamiento de las lagunas con reactores biológicos convencionales para el tratamiento de aguas residuales permiten obtener la desnitrificación, una vez que han sido diseñadas para nitrificar, ya que sólo se requiere recircular una mezcla de agua, residual y lodos biológicos provenientes de un sedimentador de alta tasa. Las lagunas pueden ser construidas como lagunas aeradas o de otro tipo combinadas con reactores biológicos, como filtros percoladores o discos biológicos rotatorios. La Figura 7.5 muestra el diagrama de flujo de estos sistemas.

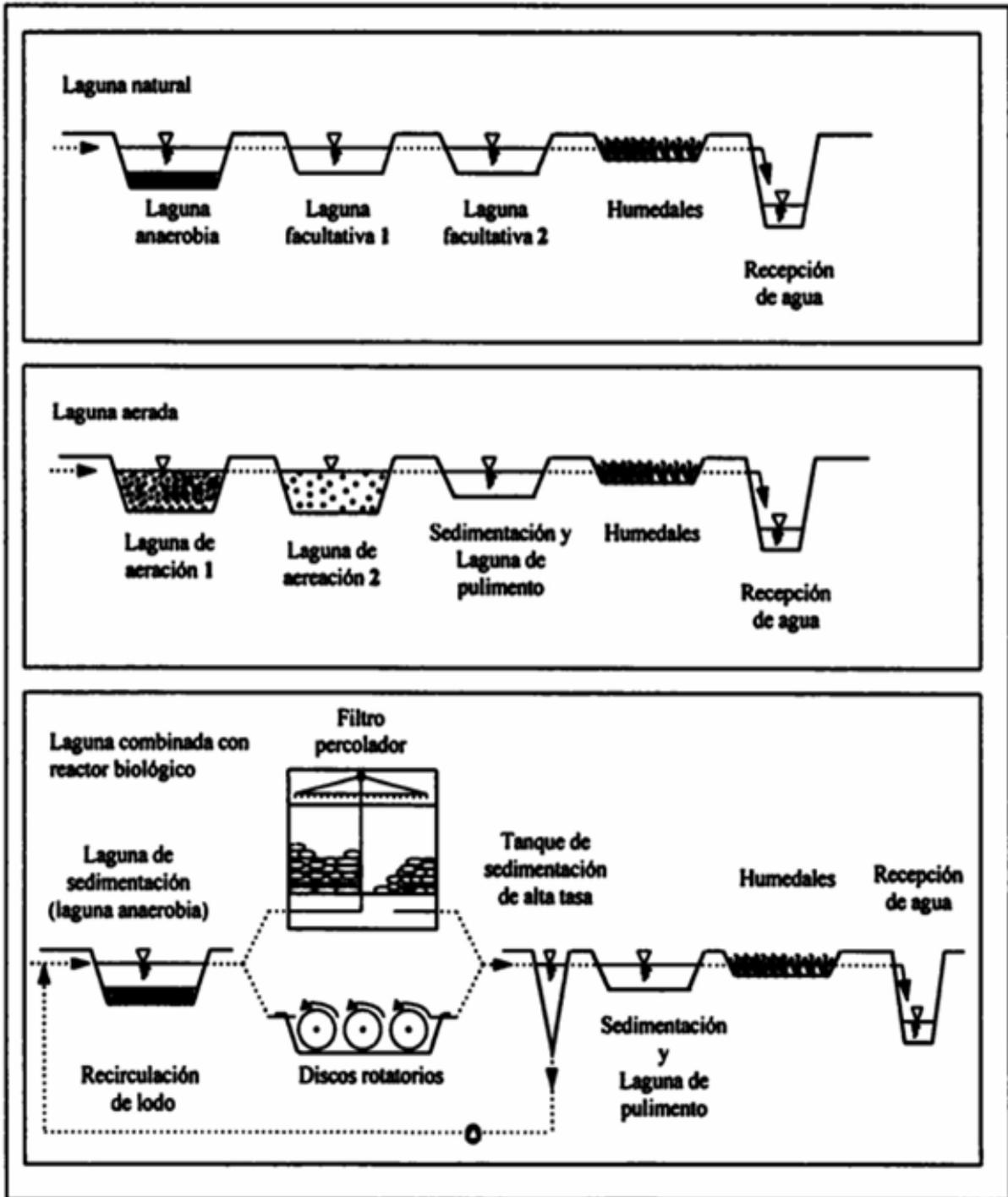


Figura 7.5 Diagrama de flujo de los diferentes tipos de lagunas

Las lagunas con discos biológicos rotatorios o filtros percoladores son a menudo usadas para aumentar la sobrecarga de las lagunas o para la construcción de nuevas unidades por un aumento en la capacidad de desecho. Este tipo de lagunas de aguas residuales por lo general se conciben como unidades integradas por:

- Una laguna de sedimentación (anaerobia) tiene un volumen equivalente de  $0.5 \text{ m}^3/\text{hab}$  con capacidad para, la digestión anaerobia de los lodos.
- Dos unidades de discos biológicos rotatorios en serie, diseñados para nitrificar [ $\text{DBO}_5$ :  $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $\text{N-NH}_3$ :  $1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]
- Un tanque de sedimentación de alta tasa para la recirculación de los lodos biológicos de los discos a la laguna de sedimentación y
- Un sedimentador final y una laguna de pulimento, con una profundidad de 1 m y un tiempo de retención hidráulico entre 1 y 5 días,

### 7.3.DESINFECCIÓN

Pese a que algunos investigadores han reportado que un buen diseño y una adecuada operación permiten alcanzar una reducción de 6-log de bacterias, 3-log de huevos de helmintos y 4-log de virus de quistes (Mara y Cairncross, 1984 en Crook et al., 1995), la experiencia en plantas a gran escala ha mostrado que en la práctica estos niveles no son fáciles de lograr (Camp Dresser y McKee International, 1993; Hutington y Crook, 1993 en Crook et al., 1995) por lo que en muchas ocasiones se requiere desinfectar el efluente.

En general, la desinfección es la inactivación y/o destrucción de los microorganismos patógenos del agua a un nivel no dañino. Un buen desinfectante debe ser tóxico para los microorganismos, además de persistir una concentración remanente para prevenir el crecimiento de organismos en los sistemas de distribución para el uso del agua tratada.

Los desinfectantes empleados pueden ser agentes químicos del grupo de los halógenos (cloro y bromo, principalmente) o agentes físicos (luz ultravioleta o gama).- La cloración, se considera como un sinónimo de desinfección.

Los principales factores que influyen en la acción de un desinfectante son:

- Tiempo de contacto
- Tipo y concentración del agente químico o intensidad y naturaleza de los agentes físicos
- Temperatura
- Número y tipo de organismos

Su eficiencia se mide en la remoción de coliformes fecales y también de huevos de helmintos.

Cada desinfectante tiene un campo específico de aplicación. Las diferencias entre los parámetros al utilizar diferentes técnicas se muestran en la Tabla 7.4.

**Tabla 7.4 Comparacion de los principales métodos de desinfección**

VARIABLE	COLORO	UV
Tiempo de contacto	30 - 50 min.	1-10 s
Tanque de reacción	requerido	ninguno
Mantenimiento	mediano	mínimo
Instalación	complicada	Sencilla
Influencia de -materia suspendida - temperatura - pH	alta alta alta	alta ninguna ninguna
Residuos en el agua	presente	nulo
Influencia del agua	presente	nula
Corrosión	presente	nula
Toxicidad	bajo	bajo

Finalmente, se puede afirmar que el tratamiento secundario proveniente de un sistema lagunar seguido de una filtración y desinfección puede producir un efluente que contenga niveles no detectables de coliformes fecales/100 ml si la turbiedad es de 2 UTN después de la filtración. El cloro residual será de 1 mg/l después de una cloración con tiempo de contacto de 30 minutos.

## 8.COSTOS

Este capítulo tiene el propósito de servir de guía para efectuar un cálculo aproximado del costo, de las lagunas, aún cuando se reconoce que cualquier apreciación económica es difícil en este país.

En primer término, se describirá la metodología para determinar los costos y en segundo, se presentarán ejemplos de gráficas de costos de lagunas en México.

### 8.1.COSTOS IMPLICITOS EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO

Una propuesta para diseño, construcción y operación de un sistema de tratamiento de agua debe incluir una estimación de costo. El propósito de ello es:

- Ayudar a los administradores, ingenieros y responsables involucrados en la planificación del sistema de tratamiento de agua para determinar, en forma preliminar, la magnitud de la inversión de los costos de capital, de operación y de mantenimiento
- Proporcionar un elemento financiero para la toma de decisiones respecto al tipo de procesos que pueda integrar un sistema de tratamiento.

Los costos asociados con las instalaciones del tratamiento de agua residual se dividen en dos:

- ⇒ Costos de capital (inversión), y
- ⇒ Costos para operación y mantenimiento (O y M).

#### 8.1.1.Costos de inversión

En general, para el cálculo de la inversión intervienen numerosos factores como son:

- Capacidad de la planta (población estimada)
- Tipo de sistema de tratamiento
- Costos locales de materiales y mano de obra
- Criterios de diseño (los más conservadores conducen a unidades más grandes y costos igualmente altos)
- Costo del terreno y ubicación geográfica
- Accesibilidad
- Costo de construcción y de acarreo de materiales
- Adecuaciones por condiciones climáticas
- Niveles de competencia entre los contratistas de la obra; y
- Tiempo de entrega.



- Suelo tipo C (rocoso)

no aplica pues el costo se vuelve prohibitivo para la excavación

- Construcción, Con respecto a las actividades asociados a la obra civil y equipan dentro para los sistemas lagunares se presenta la Tabla 8.2.

**Tabla 8.2 Principales conceptos de obra para presupuestacion a plantas de tratamiento**

CONCEPTOS	PRETRATAMIENTO	LAGUNAS FACULTATIVAS	LAGUNAS AERADAS
OBRA CIVIL	X		
• Limpieza y despalme de terreno a mano			
• Limpieza y despalme de terreno con medios mecánicos		X	X
• Trazo y nivelación para desplante de estructuras	X	X	X
• Excavación por medios manuales	X		
• Plantilla de concreto pobre de 8 centímetros de espesor con una resistencia de 100 kg/ cm <sup>2</sup>	X		
• Concreto simple de 200,kg/cm <sup>2</sup>	X	X	
• Acero de refuerzo con una resistencia de 4200 kg/ cm <sup>2</sup>	X	X	
• Pretratamiento		X	X
• Excavación por medios mecánicos		X	X
• Relleno compactado con producto de excavación, para formar bordos		X	X
• Relleno compactado para impermeabilización del fondo		X	
• Suministro y colocación de paso en bordos		X	
• Zampeado con piedra braza, junteada con mortero-cemento-arena			
• Suministro y colocación de pasto en bordos			X
OBRA ELECTROMECHANICA	X		
* Estructuras de acero			
* Fontanería con tuberías, válvulas y piezas especiales		X	X
* Subestación eléctrica			X
*Aeradores flotantes de alta velocidad			X
TERRENO			
Disponibilidad de terreno			
Mayor		X	X
Menor	X		

- Costo de impermeabilización. Como guía se proporcionarán los siguientes datos para el material, sin considerar mano de obra:

- Impermeabilización con arcilla	100.8 \$/m <sup>3</sup>
- Geomembrana de polietileno de alta densidad	136.8 \$/m <sup>3</sup> (18 USD/m <sup>3</sup> )
- Impermeabilizante con cloruro de vinilo	45.6 \$/m <sup>3</sup> (6 USD/m <sup>3</sup> )

- Costos por obra auxiliares. Se deben considerar las obras que permiten una mejor operación del sistema de tratamiento como

- Bordos e interconexiones
- Caseta de vigilancia
- Cerca perimetral
- Vialidades
- Drenaje externo
- Señalización

### 8.1.2.Operación y Mantenimiento

Los costos de operación y mantenimiento (O y M) son los referidos al funcionamiento de una planta de tratamiento para hacer producir la capacidad instalada. Estos costos se estiman por vigencias anuales de acuerdo con las proyecciones de producción que se establezcan.

Para las plantas de tratamiento, los costos de O y M comprenden por lo común los siguientes factores:

- Materiales y materias primas
- Servicios públicos (energía, eléctrico y agua potable)
- Combustible
- Personal
- Mantenimiento preventivo y correctivo
- Seguros
- Gastos varios

Para la mayor parte de los procesos de tratamiento los costos de operación y mantenimiento están influenciados en gran medida por el consumo de energía, de ahí que las lagunas con excepción de las aeradas resulten económicas.

#### 8.1.2.1Compuestos químicos.

Los compuestos químicos en los sistemas lagunares se emplean sólo cuando se desea realizar una mejora al sistema existente. Básicamente consisten en coagulantes afladidos durante la filtración o algún tratamiento primario fisicoquímico y el cloro para la desinfección final.

### 8.1.2.2 Personal

Las distintas clases de personal requeridos para operar y mantener una planta de tratamiento están en función de la capacidad de la planta, la complejidad y el grado de equipamiento. Para establecer con precisión los requerimientos de personal, deben considerarse las características y necesidades locales y la estructura social de la comunidad, por lo que cada planta tendrá condiciones únicas.

Se debe destacar que los requerimientos de personal no sólo incluyen a los operadores de la instalación, sino también a los directores responsables de emplear y distribuir el personal requerido, los técnicos y oficiales necesarios para el mantenimiento y el personal de laboratorio para supervisar las operaciones, e incluso las medidas para su entrenamiento.

Asimismo deben considerarse las prestaciones establecidas en la Ley Federal del Trabajo entre las cuales se debe destacar:

- Aguinaldo (mínimo 15 días de trabajo)
- Reparto de utilidades
- Pago de días festivos y horas extras (doble del sueldo horario)
- Pago de prima, dominical (25 % del sueldo diario para trabajadores que laboren en domingo)
- Vacaciones: 6 días al año de labores y aumenta en 2 días por año hasta los 10 años posteriormente se tiene un día por cada dos años.
- Servicio médico (IMS o ISSSTE)
- Créditos de INFONAVIT, FONACOT y SAR.

Con respecto al turno de trabajo es conveniente considerar tres turnos de 8 horas en función de las costumbres regionales ya que podría aumentar o disminuir la duración sin nunca rebasar 24 horas de trabajo continuo.

## 8.2. CURVAS DE COSTOS PARA LAGUNAS EN MÉXICO

Una estimación de costos también se puede obtener utilizando en curvas generales basadas en ecuaciones predictivas (curvas teóricas) o los datos de plantas similares construidas en otras regiones. En México, a causa de la situación económica y de una insuficiente información es difícil generar curvas de costos como una referencia a nivel nacional. A pesar de ello se presentan algunos datos.

### 8.2.1. Curvas teóricas

En las Tablas 8.3 y 8.4, se presenta una estimación del costo del terreno y de la inversión para lagunas facultativas y aeradas para poblaciones de, 2 500 a 40 000 habitantes con base en un estudio comparativo de, diversos sistemas de

tratamiento realizado en 1992 por Suzan y Aguilar y actualizado a julio de 1995 con los datos de inflación correspondientes.

**Tabla 8.3 Estimación de costo del terreno para lagunas facultativas y aeradas**

SISTEMA		LAGUNAS FACULTATIVAS <sup>(1)</sup>		LAGUNAS AERADAS <sup>(1)</sup>	
*Pob. Servida (Hab) <sup>(3)</sup>	Caudal de agua Tratada (l/s)	Sup. m <sup>2</sup>	Costo \$ <sup>(2)</sup>	Sup. m <sup>2</sup>	Costo \$ <sup>(2)</sup>
2500	5	16000	43414	8500	3068
5000	10	25500	69206	12350	35522
7500	15	34000	92274	15750	42750
10000	20	42250	114670	18950	51431
15000	30	58000	157404	24900	67577
20000	40	73250	192141	30450	82644
30000	60	103000	279536	41200	111815
40000	80	131500	356883	51450	169638

- (1) Para fines de presupuesto de área requerida, se estimó un valor de 12 millones 222 mil pesos/ha en 1992. Aplicando la tasa, de inflación para 1995, se tiene una relación de costo/área de 27 133 \$/ha.
- (2) Actualizado con base en el índice de inflación de 1992 a junio de 1996 que equivale a un factor de 2.22
- (3) Como población servida se considera a aquella que cuenta con servicio de alcantarillado

Para el cálculo de los costos de operación y mantenimiento, Suzán y Aguilar (1992) emplearon las Tablas 8.5 y 8.6, más las consideraciones siguientes:

- Para los costos por el manejo de lodos: Una producción promedio laguna facultativa 0.30 L/hab d y nula en lagunas aeradas.
- Para el costo de transporte y desalojo de lodos: En el primer kilómetro en 17.8 por metro cúbico, y de 2.13 pesos por metro cúbico en los kilómetros subsecuentes, estiindndose un recorrido de, cinco kilómetros.
- Para estimar los costos de energía: Se consideró de 0.6 pesos kW/h y la cantidad de, HP instalados por sistema.
- El costo anual: Por concepto de mantenimiento, preventivo del equipo electromecánico voiria entre 1.5 y 2.5 por ciento, del valor total de los equipos

**Tabla 8.4 Estimación de costos de inversión para julio de 1996**

SISTEMA	COSTOS POR MÓDULOS EN PESOS <sup>(1)(2)</sup>						
	POBLACIÓN, HAB	5000	10000	15 000	20 000	30 000	40000
	CONCEPTO						
LAGUNAS FACULTATIVAS							
	Obra civil	1010295	1730983	2363647	2922688	3954424	4968049
	Obra electromecánica	11251	22502	28 132	33757	39383	45 008
	Terreno	69011	114669	157409	198801	279535	356883
	Inversión total	1159568	1982935	2706597	3354047	4552878	5 726 823
LAGUNAS AERADAS	Obra civil	590147	956 932	1253 163	1518578	1976235	2390620
	Obra electromecánica	460623	771250	980760	1162432	1572004	1 978 872
	Terreno	33522	51435	67577	77760	111814	139638
	inversión total	1117726	1830053	2369 077	2836530	3771869	4648769

(1) Actualizado con base en el índice de inflación de 1992 a junio de 1996 que equivale a un factor de 212

(2) Si se desea efectuarlo con base en dólares multiplicar el valor dado por 1.09.

NOTA: El costo de inversión no incluye intereses del financiamiento.

**Tabla 8.5 Costo de personal actualizado**

PERSONAL	SUELDO BASE	SUELDO MAS PRESTACIONES	IMPORTE ANUAL
S = Superintendente	4986	6780	81363
A = Operador calificado	2455	3338	40055
A' = Operador	1840	2503	30041
B = Ayudante	1232	1669	20029
C = Cuadrilla de mantenimiento	1150		55223

**Tabla 8.6 Personal considerado para operación desistemas lagunares por turno**

POBLACION	SISTEMA	PERSONAL
2 500	Facultativas	1A + 1C
	Aeradas	1A + 1B + 1C
5 000	Facultativas	1A + 1C
	Aeradas	1A' + 2B
7 500	Facultativas	1A + 1C
	Aeradas	1A'+ 1B + 1C
10 000	Facultativas	1A + 1B + 1C
	Aeradas	1A' + 2B + 1C
15 000	Facultativas	1A + 1B + 1C
	Aeradas	1A'+ 2B + 1C
20 000	Facultativas	1A + 1B + 1C
	Aeradas	2A' + 2B + 1C
30 000	Facultativas	1A + 2B + 1C
	Aeradas	2A' + 3B + 1C
40 000	Facultativas	1A + 2B + 1C
	Aeradas	3A' + 3B + 1C

La Tabla 8.7 presenta los costos de O y M obtenidos para diversos sistemas, dentro de los cuales los tanques Imhoff y las lagunas facultativas son los más económicos. La sedimentación primaria y las lagunas aeradas, tienen costos intermedios y, la aeración extendida y las zanjas de oxidación resultan los tratamientos de mayor costo.

La Tabla 8.8, muestra el prorateo de los costos de inversión y operación y mantenimiento para las poblaciones consideradas (Figura 8.1). Asimismo, se puede observar el costo asociado al agua tratada por población y el precio para dichas poblaciones (Figuras 8.2 y 8.3).

**Tabla 8.7 Costos anuales por operacion y mantenimiento actualizados a Julio, 1996**

Población habitantes	Sistema	Personal	Manejo de lodos		Energia			Mantenimiento de equipo	
		pesos (\$)	m <sup>3</sup> /año	pesos (\$)	HP inst	kw-hr/año	pesos (\$)	costo equipo	pesos (\$)
2 500	Laguna facultativas	85 264	274	7 761	-	-	-	555	89
	Laguna aeradas	105 293	456	12 912	20	117 582	71 653	23 821	4 231
5 000	Laguna facultativas	85 264	548	15 527	-	-	-	1 110	204
	Laguna aeradas	115 307	913	25 878	38	235 164	143 314	45 430	8 054
7 500	Laguna facultativas	85 264	821	23 261	-	-	-	1 665	293
	Laguna aeradas	115 307	1 369	38 788	53	333 149	203 050	60 462	10 731
10 000	Laguna facultativas	105 293	1 095	31 022	-	-	-	2 220	382
	Laguna aeradas	135 336	1 825	51 724	71	450 731	274 712	76 084	13 498
15 000	Laguna facultativas	105 293	1 643	46 549	-	-	-	2 775	493
	Laguna aeradas	135 336	2 738	77 602	107	685 895	418 019	96 752	17 165
20 000	Laguna facultativas	105 293	2 190	62 076	-	-	-	3 330	586
	Laguna aeradas	175 391	3 650	103 448	137	881 865	537 471	114 674	20 340
30 000 (**)	Laguna facultativas	125 322	3 285	93 098	-	-	-	3 885	697
	Laguna aeradas	195 420	5 475	155 147	197	1 273 805	776 336	155 068	27 492
40 000 (**)	Laguna facultativas	125 322	4 380	124 125	-	-	-	4 440	786
	Laguna aeradas	235 475	7 300	206 873	265	1 711 471	1 043 103	213 577	34 628

\*\* : Para estos niveles de población no se recomienda zanjas de oxidación y areación extendida por sus altos costos.

**Tabla 8.8 Resumen de costos anuales para Enero de 1992**

Poblacion habitantes		2 500	5 000	7 500	10 000	15 000	20 000	30 000	40 000
Costo anual por m <sup>3</sup> de agua tratada		157 680	315 360	473 040	630 720	946 060	1 216 440	1 892 160	2 522 880
Sistema									
Tanques Imhoff	1	107709	143250	202060	276246	373835	435358	586462	689057
	2	43117	28649	12136	27624	24922	21767	19549	17225
	3	684	455	426	437	395	344	311	273
Sedimentacion primaria	1	250083	325186	434380	604306	792647	932043	1286261	1558127
	2	106033	65037	57918	60437	52840	46580	42875	38952
	3	1585	1030	919	959	837	739	679	617
Lagunas facultativas	1	153027	193210	322595	416365	552833	676359	993941	1154114
	2	56770	48729	43013	41636	36854	33817	30911	28851
	3	970	772	682	659	584	537	441	457
Lagunas aeradas	1	264970	165839	563902	729698	992387	1300440	1732484	2244329
	2	105987	85640	75187	72969	66158	65022	57749	56108
	3	1681	1359	1192	1157	1050	1030	915	890
Aeracion extendida	1	366706	538208	615797	892125	1210535	1565344		
	2	146682	107641	82107	89213	80701	78266		
	3	2438	1707	1301	1414	1279	1241		
Zanjas de oxidacion	1	340364	506693	64203	892118	1146406	162829		
	2	136146	101339	85694	89217	76426	81414		
	3	2158	1607	1359	1414	1212	1290		

1 costo anual en pesos, inversion, operación y mantenimiento

2 costo anual por poblacion, pesos

3 costo anual por m<sup>3</sup> de agua tratada por poblacion, pesos

NOTA: Los m<sup>3</sup> anuales de las ocho columnas equivalen a 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, y 80 litros por segundo.

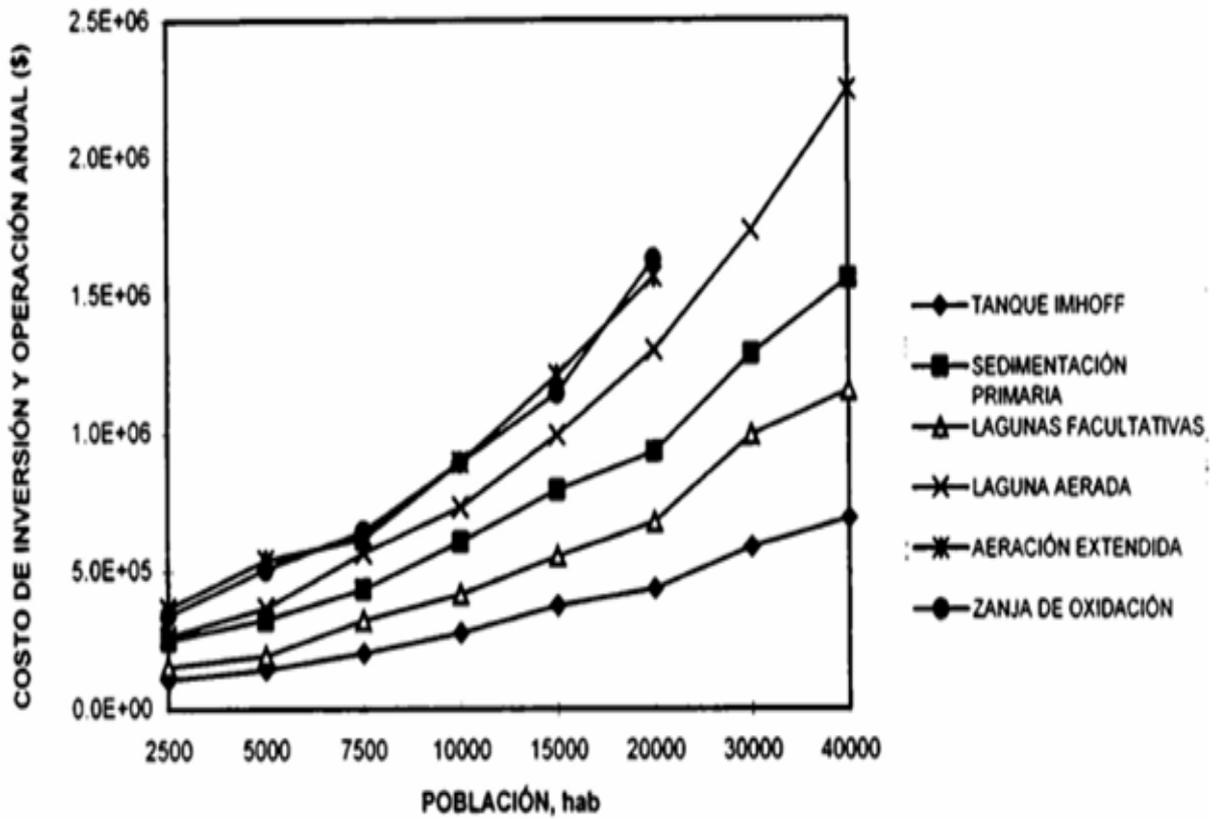


Figura 8.1 Requerimientos de inversión, operación y mantenimiento

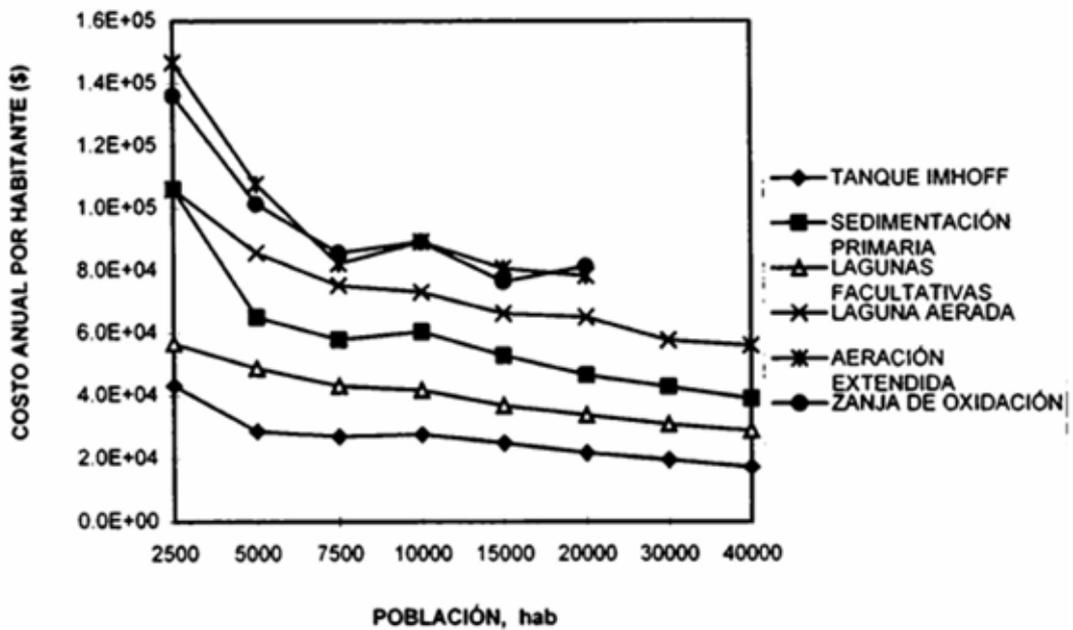


Figura 8.2 Costo anual de agua tratada por población servida

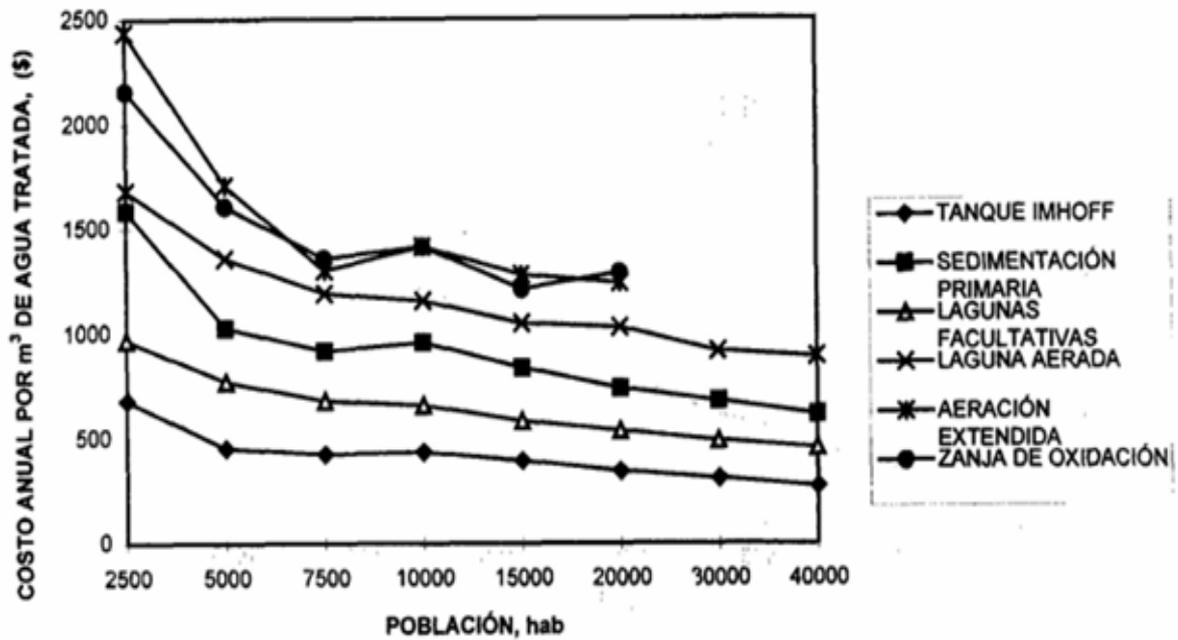


Figura 8.3 Costo anual de agua tratada por habitante para las poblaciones estimadas

### 8.2.2. Costos de lagunas construidas

Aún cuando se han construido más de 300 lagunas en México, la información de su costo de construcción es escasa y dispersa. Parte de la que se ha podido recabar se muestra en la Figura 8.4.

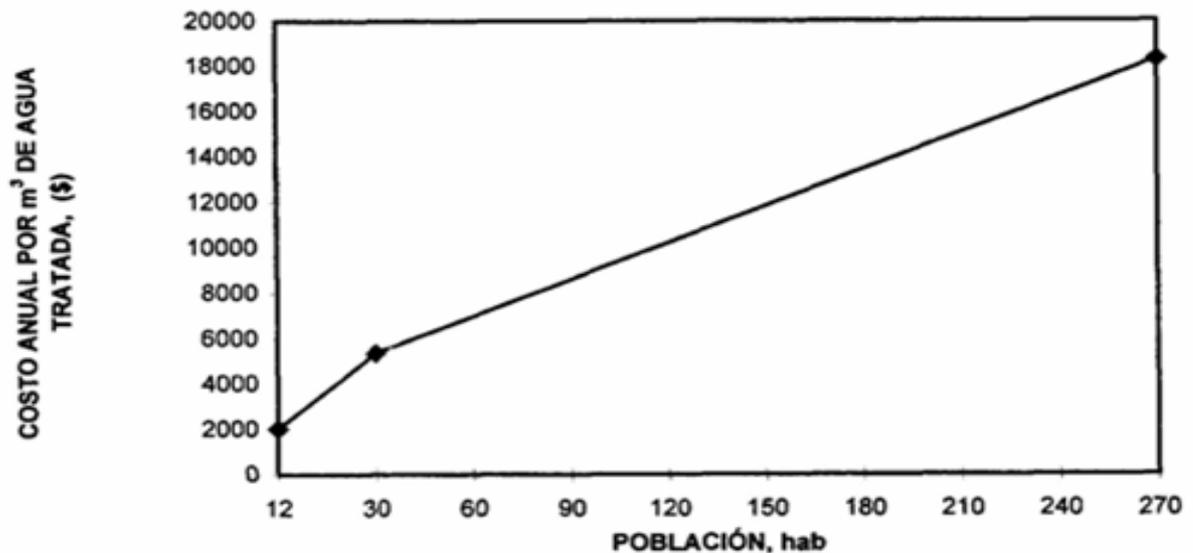


Figura 8.4 Ejemplo de costos de construcción para tres lagunas instaladas en México. Cortesía de Ecoingenierfa

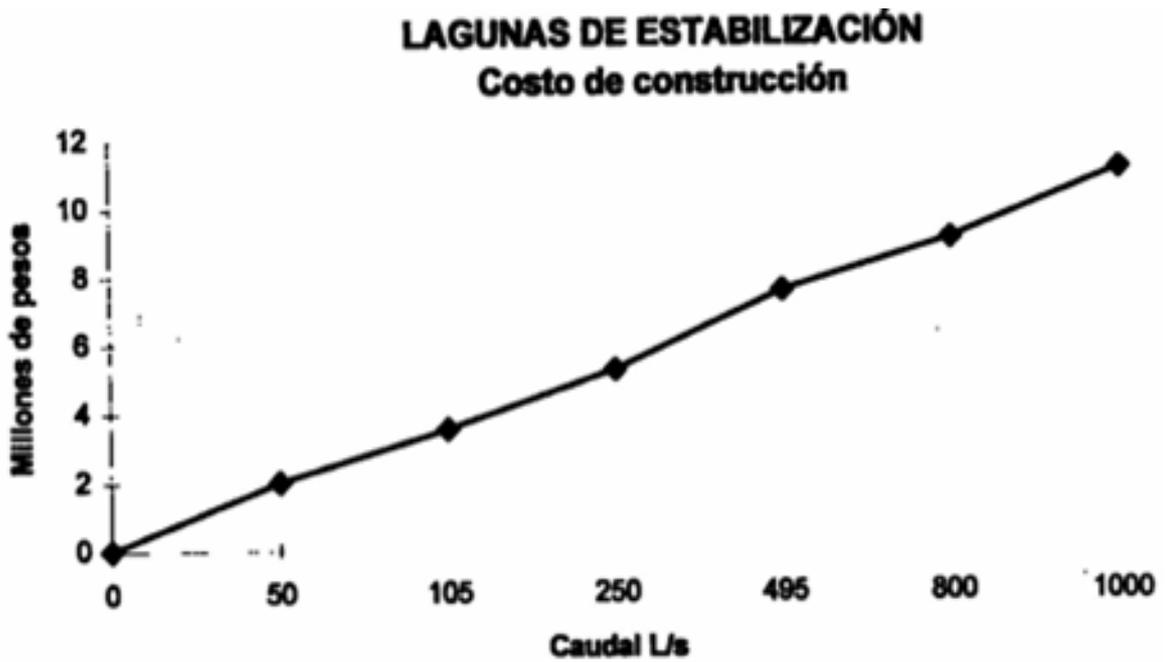


Figura 8.5 presenta una gráfica elaborada por la CNA para lagunas de estabilización que establece los costos de inversión total

## 9.BIBLIOGRAFIA

- Alabaster G., Mills S., Osebe S.A., Thitai W., Pearson H., Mara D. y Muiruri P. (1991) "Combined treatment of domestic and industrial wastewater in waste stabilisation pond systems in Kenya" *Water Science Technology*, Vol 24, No. 1, pp. 43-52. Gran Bretaña
- Aldana G., Herrera L. y Bracho No. (1995) "Selección de un trazador para la determinación de regimenes hidráulicos en reactores". 9' Jornadas Científicas de Ingeniería, Vol. HI, pp. 16-25. Universidad de Zulia, Maracaibo Venezuela.
- Apuntes del Curso Intensivo No. 8 (1966) "Lagunas de estabilización" Apuntes del Curso Intensivo, Centro de Ingeniería Sanitaria, UNAM, pp. 38. México.
- Arridge H., Oragui L., Pearson H., Mara D. y Silva S. (1995) "Vibrio cholerae 01 and Salmonellae removal compared with the die-off of faecal indicator organisms in waste stabilization ponds in northeast Brazil" *Water Science Technology*, Vol. 31, No.12, pp. 249-256. Gran Bretaña.
- Arthur J. (1990) "Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries", *World Bank Technical*, No.7, pp. 106. Estados Unidos de América.
- Auvinet G. y Esquivel R. (1986) Impermeabilización de lagunas artificiales" *Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*, pp.77. México.
- Ayres R., Mara D., Lee D. y Thitai W. (1993) "Monitoring full scale waste stabilisation ponds in Kenya for nematode egg removal" *Environmental Technology*, Vol. 14, pp. 295-300. Gran Bretaña.
- Azov Y. y Tregubova T. (1995) "Nitrification processes in stabilization reservoirs" *Water Science Technology*, Vol. 31, No. 12, pp. 313-319. Gran Bretaña.
- Bower, C. J. (1991) "Options for the rational design and operation of oxidation ponds" *Water Science Technology*, Vol. 24, No.5, pp. 21-32. Gran Bretaña.
- Bracho No., Garcla G., Aldana G. y Perrualo T.(1995) "Ajuste de modelos de remoción de DBO en lagunas" 91' Jornadas Científicas-técnicas de Ingeniería, Vol. IH, Universidad de Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- Ceballos B., Koing A., Lomans B., Athayde, A. y Pearson H. (1995) "Evaluation of a tropical: single-cell waste stabilization pond system for irrigation". *Water Science and Technology*, Vol. 31, No, 12, pp. 267-213. Gran, Bretaña.

- CNA e IMTA (1994) "Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Manual de Diseño de Lagunas de Estabilización" Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos. México.
- Communications Scientifiques (1982) "L'épuration 1, par, Lagunage". Technologie, Fonctionnement, Valorisation, ~ Montpellier 2-3-4. Communications Scientifiques, PP. 94. Francia
- Crook L, Shimp G. y Sandino L, (1995) "Water reuse strategy for Santiago, Chile". pp., 745-761. Estados Unidos de, América.
- Curtis T., Mara D. y Silva S. (1992) " The effect of sunlight on faecal coliforms in ponds: implications for research and design" Water Science and Technology, Vol. 26, No.78, pp. 1729-1738. Gran Bretaña.
- Chopard, P.(1,982) "Etude des conditions d'une optimisation,de la production de bioniasse et, de sa valorisation sur une, installation de lagunage" Société Lyonnaise des Eaux et de l' Eclairage, Laboratoire Central, Le Pecq, pp. 55. Francia..
- Daib S., Kochba M. y Aunimelech Y. (1993) "Nitrification pattern in a fluctuating anaerobic-aerobic pond" environment" Water Research, Vol. 27, No. 9, pp. 1469-1475. Gran Bretaña.
- De Azevedo J. y Acosta G. (1976) "Manual de hidráulica" HARLA, pp. 578. España.
- Delaunoy M.(1982) "Epuration et production de biomasse par lagunage naturel dans un contexte tropical", Société Lyonnaise des Eaux et de l' Elairage, Laboratoire Central,, Le Pecq, pp. 55. Francia.
- Dixo N., Gambrill M., Catunda P. y Haandel A. (1995) "Removal of pathogenic organisms from the effluent of an, upflow anaerobic, digester using waste stabilization ponds" Water Science and, Technology, Vol. 31, No. 12, pp. 275-284. Gran Bretaña.
- Eckenfelder Jr. (1989) "Industrial water Pollution Control. Chapter 7 Biological wastewater-treatment processes". Mc Graw-Hill,: 2' Edition, pp. 189-210. Estados Unidos de América.
- Ellis K. y Rodrigues P. (1993) "Verification of two design approaches for stabilization ponds " Water Research, Vol. 27, No. 9, pp. 1447-1454. Gran Bretaña.
- Emparanza-K A. y Torrella F. (1995) "Microbiological performance and salmonella dynamics in a wastewater depuration pond system of southeastern Spain"

- Water Science and Technology, Vol. 3 1, No. 12, pp. 239-2 48. Gran Bretaña.
- EPA (1974) "Design criteria form mechanical, electrical and fluid system and component reability". EPA 430199-74-001, Office of WaterProgram Operations, Washington, D. C., Estados Unidos de Arnérica.1
- EPA (1983) "Desing Manual. Municipal wastewater stabilization ponds". EPA-62511-83015, Office of Water Program Operations, Washington'. D.C., Estados Unidos de América.
- EPA (1977) "Stabilization ponds. Operations Manual". MO 15. EPA-430/9-77-012, Office of Water Program Operations, Washington, D. C., Estados Unidos de América.
- Esen L, Puskas K., Banat L, y Al-Daber R.(1992) `BOD and COD removal in waste stabilization ponds". Environmental Téchnology, Vol.13, pp. 1181-1186. Gran Bretaña.
- Evans B., Nutt S., Ho:T. y Melcer H. (1993) "Alternative approaches for upgrading effluent quality for lagoon based systems". Water Science and Technology, Vol. 28, No. 10, pp. 201-205. Gran Bretaña. 1
- Frederick G. y Lloyd B. (1995) 'Svaluation of Serratia marcescens bacteriophage as a tracer and a model for virus, removal in waste stabilisation ponds" Water Science and Technology, Vol. 3 1, No. 12 pp 291-302. Gran Bretaña.
- Gaviria J. (1994) "Tratamiento de aguas residuales por lagunaje". Master en Contaminación Ambiental " Universidad Politécnica de Madrid, pp. 229. España.
- Ghrabi A., Ferchichi M. y Drakides C (1993) "Treatment of wastewater by stabilization ponds-aplication to Tunisian conditions". Water' Science and Technology, Vol. 28, No. 10, pp. 193-199. Gran Bretaña.
- Gómez E., Casellas C., Picot B. y Bontoux J. (1995) "Ammonia elimination processes in stabilisation and high-rate algal pond systems". Water Science and Technology, Vol. 3 1, No. 12, pp. 303-312. Gran Bretaña.
- IMTA (1995) Curso Internacional "Las lagunas de estabilización como alternativa de tratamiento para reúso agricola" Centro de Capacitación IMTA, jutepec, Morelos México.
- IMTA, CNA, TACSA.1 (1994) Curso "Manual de operación y mantenimiento de sistemas lagunares" Centro de Capacitación IMTA, Eutepec, Morelos. México.

- Jiménez B., Noyola A. y Capdeville B. (1988) "Selectes dyes for residence time distribution in bioreactors " Biotechnological Techniques No.21, pp. 77-82
- Juanico M. (1991) "Should waste stabilization ponds be designed for perfect-mixing or plug-flow,?" Water Science and Technology,; Vol. 23,;pp-. 1495-1502. Gran Bretaña.
- Juanico M. y Shelef G. (1991) "The performance of stabilization reservoirs as a funtion of design and operation parameters" Water Science and Technology, Vol.23, pp. 1509-1516. Gran Bretaña.
- Juanico M. y Shelef G. (1994) "Design, operation and performance of stabilization reservoirs for wastewater irrigation in Israel" Water Research, Vol. 28, No. 1, pp. 175-186. Gran Bretaña.
- Kantardjieff A. y Jones J. (1994) "Removal of toxicity and some non conventional pollutants by a dual power multicellular lagoon system". Water Environment Research, Vol. 65, No. 7, pp. 819-826. Gran Bretaña.
- Llavador F. y Prats D. (1993) "Mechanistic model for facultative stabilization ponds" Water Environment, Research, Vol. 66, No. 5, pp., 679-685. Gran Bretaña.
- Mara D. y Marecos do Monte, M. (1990) "The design and operation of waste stabilization ponds in tourist~ areas of Mediterranean Europe". Water Science and Technology, Vol.22, No.3/4, pp. 73-76. Gran Bretaña.
- Martínez C. (1974):"Funcionamiento de lagunas de estabilización en Cuba" XW Congreso , Interamericano de Ingenieria Sanitaria. Agosto 4-9, México, D. F. pp 20. México.
- Melcer H., Evans B., Nutt S.G. y Ho A. (1995) "Upgrading effluent quality for lagoonbased systems". Water Science and Technology, VoL 3 1, No. 12, pp. 379-3 87. Gran Bretaña.
- Metcalf y Eddy, Inc. (1991) "Wastewater engineering: Treatment. Disposal. Reuse" Aird Edition. McGraw-Hill. pp. 1334. Estados Unidos de América.
- Mezrioui N. y Baleux B. (1994) "Resistance patterns of E.Coli strains isolated from' domestic sewage before and after treatment in both aerobic lagoon and activated sludge" Water Resesearch, Vol.28, No. 11, pp. 2399-2406. Gran Bretaña
- Miiddlebrooks E.J. (1995) "Upgrading pond effluents : An overview" Water Science and Technology. Vot. 3 1, No. 12, pp. 353-368. Gran Bretaña.

- Middlebrooks E.J. y Crites R. (1988) "Natural systems for waste management and treatment. Chapter Four, Mc Graw-Hill Coop. Estados Unidos de América.
- Mills S., Alabaster G., Mara D., - Pearson H. y Thitai W. (1992) "Efficiency of faecal bacterial , removal in waste stabilisation ponds in Kenya". Water Science and Technology, Vol. 26, No.7-8, pp. 1739-1748. Gran Bretaña.
- Narasiah K., Marin M. y Shoiry J. (1990) "Sludge accumulation in aerated facultative lagoons operating in colder climate" Water Science and Technology, Vol.22, No.3A, pp. 77-82. Gran Bretaña.
- Nie M. y Xu S. (1991) "Technical and economic analysis of stabilization ponds" Water Science and Technology, Vol. 24, No. 5, pp. 55-62. Gran Bretaña.
- Oragui L, Arridge H., Mara D., Pearson H. y Silva S (1995) "Rotavirus removal in experimental waste stabilization pond systems with different geometries and configurations" Water Science and Technology, Vol. 31, No. 12, pp. 285-290. Gran Bretaña.
- Oswald W. (1991) "Introduction to advanced integrated wastewater ponding systems" Water Science and Technology, Vol 24, No. 5, pp. 1-7. Gran Bretaña.
- Oswald W. (1995) "Ponds in the twenty-first century` Water Science and Technology, Vol. 31, No. 12, pp. 1-8. Gran Bretaña.
- Ouano E. (1981) "Principles of wastewater treatment`. Vol. I. Biological processes. Chapter V Lagoons. National Science, pp. 148-200 . Estados Unidos de América.
- Palange R. y Zavala A. (1989) "Control de la contaminación del agua : Guías para la planificación y financiamiento de proyectos". Documento Técnico del Banco Mundial, No. 73S.
- Parker S. y Corbitt R. (1992) "Environmental Science & Engineering" McGraw Hill, Inc, pp. 721. Estados Unidos de América.
- Petts J. y Eduljee G. (1994) "Environmental impact assessment for waste treatment and disposal facilities" John Wiley and Sons, pp. 89-103. Estados Unidos de América.
- Picot B., Halouani C., Casellas S., Moersidik S. y Bontoux J. (1991) "Nutrient removal by high rate pond system in a: mediterranean climate - (France)". Water Science and Technology, Vol. 23, pp. 1535-1541. Gran Bretaña.

- Polprasert C. y Agarwalla K. (1994): "A facultative: pond, model incorporating Biofilm activity" *Water Environment Research*, Vol. 66, pp. 725-732. Gran Bretaña
- Prats D. y Llavador F. (1994), "Stability of kinetic models from waste stabilization ponds" *Water Research*, Vol. 28, No. 10, pp. 2125-2132. Gran Bretaña.
- Pu,skas K., Esen I., Banat I. y Al-Daher R. (1991) "Performance of an integrated ponding system operated in and zones" *Water Science and Technology*, Vol. 23, Kyoto, pp. 1543- 1552. Gran Bretaña.
- Quin D., Bliss P., Barnes D. y~ FitzGerald A. (1991) "Bacterial (Total Coliform) die-off in maturation ponds" *Water Science and Technology*, Vol. 23, Kyoto, pp. 1525-1534. Gran Bretaña.
- Racault Y. (1993) "Pond malfunction: case study of three plants in the south-west of France" *Water Science and Technology*, Vol. 28, No. 10, pp. 183-192. Gran Bretaña.
- Rico M. y Escalante V. (1991) "Adaptación de criterios de diseño de reactores anaerobios y sistemas lagunares" XTA, pp.- M. Jiutepec, Morelos, México.
- Rolim Mendonna, S. (1990) "Lagoas de estabiliza0o e aeradas mecanicamente : novos conceitos". Jolo Pesssoa, pp. 388. Paraíba, Brasil.
- Saidam M., Ramadan S. y Butler D. (1995) "Upgrading waste stabilization pond effluent by rock filters" *Water Science and Technology*. Vol. 3 1, No. 12, pp. 369-378. Gran Bretaña.
- Sanks R. (1980) "Water treatment plan desing for the practicing engineer" AnnArbor Science. Third Edition. Estados Unidos de América.
- Saqqar. M. y Pescod M. (1991) "Microbiological performance of multi-stage stabilization ponds for effluent use in7 agriculture" *Water Science and~ Technology*, Vol 2,3, Kyoto, pp. 1517-1524. Gran Bretaña.
- Schleypen P. (1994) "Advanced wastewater treatment plants in lagoons combined with biological contactors" *Water Science and Technology*, Vol 29, No. 12 pp. 13-21. Gran Bretaña.
- Shamloufard L, Weinberg K. y Fornelli R. (1993) "Water, water everywhere" *Civil Engineering*, pp. 43-46. Estados Unidos de América.
- Shelef G. y Kanarek A. (1995) "Stabilization ponds with recirculation" *Water Science and Technology*, Vol 3 1, No. 12, pp. 389-397. Gran Bretaña.

- Silva S.A., de Oliveira R., Soares J Mara D.D. y Pearson H.W. (1995) "Nitrogen removal in pond systems with different configurations and geometries". *Water Science and 1 Technology*, ~ Vol. 3 1, No. 12, pp 321-330. Gran Bretaña.
- SMISA, AC (1993) Curso sobre Lagunas de Estabilización Aplicabilidad, Operación, Mantenimiento, 11-13 octubre. D.F., México.
- Smith D. (1993) "Wastewater treatment with complementary filter feeders: A new method to control: excessive suspend solids and nutrients:- in stabilization Ponds" *Water Environment Research*, Vol. 65, No. 5, pp. 650-654~! Gran Bretaña.
- Smith J. (1995) *Ingeniería de la cinética química*" Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., Novena reimposición, pp. 774. México.
- Suffem L, Fitzgerald C. y Sáulia A. (1981) "'Trace metal concentrations in oxidation ponds" *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol. 5 3, No. 11. Gran Bretaña.
- Surampalli RX., Banerji SK., Pycha C.J. y Lopez E.R. (1995) "Phosphorus removal in ponds" *Water Science and Technology*, Vol.31, No. 12, pp.331-339. Gran Bretaña.
- Thirumurthi D. (1991) "Biodegradation in waste stabilization ponds (facultative lagoons)" *Martin, A. M. C Biological Degradation of Wastes. Elsevier applied science*, pp. 23 1 -246. Gran Bretaña.
- Truax D. y Shindala A. (1994) "A filtration technique for algal removal from lagoon effluents" *Water Environment Research*, Vol. 66, No. 7 pp 894-898. Gran Bretaña.
- Wanielista M. (1990) "Hydrology and water quantity control" John Wiley and Sons, pp.565. Estados Unidos de América.
- Water Pollution Control Federation. *Natural systems for wastewater treatinenint. Manual of Practice FD-16*, pp 159-185. Alexandria, VA, Estados Unidos de América.
- Water Pollution Control Federation (1977) "Wastewater treatment plant design" *Water Pollution Control Federation, Manual of Practice No. 8*. pp. 560. Estados Unidos de América.
- WEF/ASCE (1990) "Desing and construccion of urban stormwater management systems" *ASCE Manuals and reports of Engineering Practice No. 77 and "F Manual of Practice FD-20*, pp. 270. Estados Unidos de América.

- Wiandt S., Baleux B., Casellas C. and Bontoux J. (1995) 'Occurrence of giardia sp. Cysts during a wastewater treatment by a stabilization pond in the south of France" Water Science and Technology, Vol. 31 :,No. 12, pp. 257-265. Gran Bretaña.
- Xiang-Hua W., Yi Q. y Xia-Sheng, G. (1994) "Graphical presentation of the transformation of some nutrients in a wastewater stabilization pond system" Water Ressearch, No. 7, Vol. 28, pp. 1659-1665. Gran Bretaña.,
- Ydnez F. (1993) "Lagunas de estabilización. Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento". Empresa Pablica Municipal de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado de Cuenca. pp 427. Cuenca, Ecuador.
- Zhao Q. y Zhang Z. (1991) "Temperature influence on performance of oxidation ponds" Water Science and Technology, Vol. 24, No. 5, pp. 85-96. Gran Bretaña.
- Zhoorov V. y Zhookov D. (1991) "Tertiary treatment of wastewater in biological ponds". Water Science and Technology, Vol. 24, No. 5, pp. 41-46. Gran Bretaña.

**ANEXO 1**  
**SITUACION NACIONAL DE LAS LAGUNAS**

**Tabla A.1.1 Localización de sistemas lagunares municipales y su estado a nivel nacional**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo	Q(L/s)		% η DB0	Disposicion final
		Total	En operación	En rehabilitación		Diseño	Operación		
AGUASCALIENTES	Aguascalientes	20	14		Oxidación	44.6	21.6	45	A. Sin nombre, Montoro, El Cedazo, Calvillo, Rio Chicalote
	Asientos	5	4		Oxidación	10.3	5.4	20	P. Mercedes, A. Sin Nombre, Riego, A. Casillas
	Calvillo	15	7		Oxidación	53.8	10.6	50	Rio Calvillo, Rio Malpaso, A. Sin Nombre., A. El Jaguey, A. Grande, Rio La Labor, A. Las Moras
	Costo	3	3		Oxidación	17	9.7	45	Rio Sn. Pedro, Riego
	El Llano	4	4		Oxidación	7.4	3.8	40	A.
	Jésus Maria	2	2		Oxidación	50.3	17.7	50	Rio Chicalote, Rio Sn. Pedro
	Pavellón de O.	2	1		Oxidación	10.9	1.8	30	Rio Pedro, Rio Santiago
	Rincón de Ramos	5	4		Oxidación	54.5	9.9	35	R. Sn. Pedro, Riego Agricola
	Sn. Fco. de los Romo	2	0		Oxidación	3	-	-	R. Chicalote
	Sn. José de Garcia	2	2		Oxidación	10	5.3	50	P. Calles
Tepezala	16	14		Oxidación	43.8	16	45	P. Calles, Infiltración y Riego Agricola	
BAJA CALIFORNIA	Mexicali	1	1		Oxidación	980	1100	80	Rio nuevo, Uso agricola
	Mexicali	3	3		Estabilización	284	243	55	Infiltración
	Tijuana	2	2		Estabilización	828	995	-	Riego agricola
BAJA CALIFORNIA SUR	Comundo	2	2		Estabilización	100	31	-	Riego agricola e Infiltración
	La Paz	2	1		Estabilización	270	350	-	Riego agricola e Infiltración
	Loreto	1	1		Estabilización	20	2	-	Infiltración
	Mulege	4	0		Estabilización	150	66	-	Riego agricola e Infiltración
CHIAPAS	Palenque	1	1		Estabilización	68	68		
	Suchiapa	1	0		Estabilización	2.9			
	Villaflores	2	0		Estabilización	27			
CHIHUAHUA	Chihuahua	2	2		Oxidación	-	68	10	Rio Bravo
COMIJILA	Acuña	1	1		Estabilización	100	150	33	-
	Coahuila <sup>CL</sup>	1	1		Oxidación	47	40	77.7	Terreno de cultivo
	Nueva,Rosita	1	0		Estabilización	100	-	-	-
	Piedras negras	1	1		Estabilización	150	226	30	-
COLIMA	Armeria	2	2		Estabilización	31	31	70	Riego agricola, R. Ameria
	Colima	3	3		Estabilización	37	10	70	Acuifero
	Comala	1	1		Estabilización	4	2	70	Acuifero

**Tabla A.1.1 Localización de sistemas lagunares municipales y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo	Q (L/s)		% η DB0	Disposicion final
		Total	En operación	En rehabilitación		Diseño	Operacion		
COLIMA	Comala	1	1		Estabilización	1	1	40	Acuífero
	Coquimatlin	3	1		Estabilización	35	2	-	Acuífero
	Cuautemoc	2	2		Estabilización	30	27	85	Acuífero
	Ixtahuacan	4	2		Estabilización	18	13	55	Acuífero
	Minatitlan	1	1		Estabilización	12	12	80	R. Marabuco
	Tecomán	2	2		Estabilización	2	2	65	Acuífero
DURANGO	Canatlán	1	0		Facultativa	90	-	-	A. Mimbres
	Canelas	1	0		Facultativa	5	-	-	A. Canelas
	Cuencame	2	2		Facultativa	70	29	80	A. Cuencame
	Durango	1	1		Estabilización	3	1	55	Rio Santiago Bayacora
	Durango	1	0		Facultativa	18	-	-	Rio La Saucedá
	Durango <sup>CL</sup>	5	5		Oxidación	105	71.3	25	Terreno de cultivo
	El Oro	1	1		Facultativa	32	12	-	A. Agua buena
	Gpe. Victoria	2	2		Facultativa	97	41	50	L. Macedonio
	Hidalgo	1	1		Facultativa	8	3	46	A. C. Gordo
	Mezquital	1	1		Facultativa	22	6	74	Rio Mezquital
	Nombre de Dios	1	1		Facultativa	37	40	68	Rio La Villa
	Nuevo Ideal	1	1		Facultativa	33	25	62	A. El gato
	Ocampo	4	1	1	Facultativa	44	11	19	Rio Florido e Infiltración
	Pánuco de Coronado	1	0		Facultativa	60	-	-	A. Las cuencas
	Peñon Blanco	1	1		Facultativa	32	7	55	A-El Alarno
GUANAJUATO	Poanas	2	2		Facultativa	67	34	40	Rio Poanas
	San Juan del Rio	1	1		Facultativa	30	9	77	Rio San Juan
	Santiago Papatquiaro	1	1		Facultativa	138	50	79	Rio Santiago
	Sn. Bernardo	1	1		Facultativa	16	5	-	A. San Bernardo
	Sta. Clara	1	1		Facultativa	23	8	95	Rio Sta. Clara
	Suchil	1	1		Facultativa	37	15	28	Rio Suchil
	Tepehuanes	1	1		Facultativa	30	12	72	Rio Tepehuanes
	Vicente Guerrero	1	1		Facultativa	174	40	70	Rio Suchil
GUANAJUATO	Irapu to	1	1		Estabilización	745	250	-	R. Lerma
	Peniamo	1	1		Estabilización	700	540	75	R. Lerma
HIDALGO	Meztitlán	1	1		Estabilización	1.5	-	-	-
	Tizayuca	1	1		Estabilización	6.5	-	-	-
JALISCO	Amacueca	1	0		Facultativa	12	-	-	-
	Atoyac	1	1		Oxidación	30	20	-	-
	Chihuahatlán	1	0		Estabilización	50	-	-	-

**Tabla A.1.1 Localización de sistemas lagunares municipales y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado	Municipio	PlantaS			Tipo	Q (L/s)		% $\eta$ DBO	Disposicion final
		Total	En operación	En rehabilitación		Diseño	Operacion		
JALISCO	Cihuatián	2	1		Oxidación	17	15	-	-
	Gómez Farías	1	0		Estabilización	70	-	-	-
	Ixtiahuacan de los	1	1		Aerada	28	28	82	R. Santiago
	La Barca	1	1		Estabilización	60	60	84	R. Lerma
	La Huerta	1	1		Estabilización	20	15		-
	Mexicacán	1	1		Oxidación	450	420	9	Emisor submarino
	Ocotlán	1	1		Estabilización	130	100	90	R. Santiago
	Poncitlán	1	1		Aerada	26	26	82	R. Santiago
	Tajornulco de Zuñiga	1	0		Estabilización	5	-	-	Canal
	Tepatitlán	1	1		Oxidación	10	8	-	L. Villa Corona
	Villa Corona	1	1		Oxidación	9	9	-	
	Zacoalco de Torres	1	1		Estabilización	17	20		
	Zapopan	1	1		Oxidación	28	15	50	
MÉXICO	Acambay	1	1		Estabilización	4.88	4.88	-	
	Almoleya de Juárez	1	1		Estabilización	15.17	15.17	80	L. de Almoleya
	Almoleya del Rio	1	1		Estabilización	10.29	10.29	79-	P. El Mortero
	El Oro	1	1		Estabilización	2.63	2.63	79	
	Jiquipilco	1	1		Estabilización	1.67	1.67	46	
	Mexicaltzingo	1	1		Estabilización	1028	1028		
	Sn. Antonio la Isla	1,	1		Estabilización	11.1	11.1		
	Sn. Bartolo Morelos	1	1		Estabilización	1.96	1.96	85	
	Sn. Felipe del Progreso	1	1		Estabilización	1.16	1.16		
	Sn. Lorenzo Huehuetitlán	1	1		Estabilización	3.19	3.19	11	
	Sn. Pedro Techuchulco	1	1		Estabilización	1.82	1.82		
	Sta-, Cru Atizapan	1	1		Estabilización	6.9	6.9		
	Sta. Ma. Rayón	1	1		Estabilización	8.52	8.52		
	Texcalyacac	1	1		Estabilización	4.49	4.49	64	
MICHOACAN	Briseñas		1		Facultativa	8.3	8.3*		
MORELOS	Jiutepec	1	1						
NAYARIT NUEVO LEÓN	Agualeguas	1	1		Biológico				
	Cerralvo	1	1		Oxidación	50	8	49	Rio Agualeguas
					Oxidación	15	12.5	33	Riego agricola
	Cienega de Flores	1	0		Aerada	-	-	54	Rio Salinas
	Dr. Arroyo	1	1		Oxidación	22	7		Riego agricola
	El Carmen	1			Aerada	-	-	-	-

**Tabla A.1.1 Localización de sistemas lagunares municipales y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado municipio		Plantas			TIPO	Q (L/s)		% η DBO	Disposición final
		Total	En operación	En rehabilitación		Diseño	Operación		
NUEVO LEÓN	Galeana	1	1		Aerada	15	12	-	A.
	García	1	1		Oxidación	10	7.5	80/DBO	Río Pesugera
	General Treviño	1	1		Oxidación	10	6	-	Río Sosa
	Hidalgo	1	1		Oxidación	50	8	-	Río Salinas
	Juárez	1	1		Oxidación	58	58	71	-
	Lampazos	1	1		Oxidación	10	5	-	Infiltración
	Linares	1	1		Oxidación	120	93.6	6	Riego agrícola
	Marín	1	1		Oxidación	50	8	25	Riego agrícola
	Melchor Ocampo	1	1		Oxidación	10	1.6	67	Riego agrícola
OAXACA	Santiago	1	1		Aerada		75	96	Riego keas verdes
	Caipulpan	2	2		Oxidación	2	2	so	A. Sin Nombre
	El Espinal	1	0		Estabilización	40	-	-	R. Los Perros
PUEBLA QUERETARO	Nazareno Etia	1	1		Estabilización	21	18	73	Riego
	Chietla	1	1		Estabilización	12.2	6.5	Barranca	
	Chilchotla	1	1		Estabilización	-	14.4	-	Area de cultivo
	Querétaro	1	0		Estabilización	8		-	
SAN LUIS POTOSI		1	0		Oxidación	12	-	-	Area de cultivo
	Rayón	1		1	Oxidación	8			
	Sn.Vicente Tancuayalab	1		1	Oxidación	10			
SINALOA	Soleclad de Graciano S.	1	1		I	25	25	inicia	Drenaje
	Sinaloa	11	0	7	Estabilización	-	-		
SONORA	Aconchi	1	1		Oxidación	8	-	81	
	Aqua Prieta	1	1		Oxidación	243	45	25	
	Altar	1		1	Oxidación	27.8			
	Arivechi	1		1	Oxidación	3.5	-	60	
	Arizpe	1		1	Oxidación	5		44	
	Aripe	1	1		Oxidación	1.7	-	44	
	Bacadehuachi	1		1	Oxidación	5.6			
	Bacoachi	1		1	Oxidación	3.3			
	Bamnamichi	1		1	Oxidación	6	3.5		
	Baviacora	1		1	Oxidación	5	3	59	
	Bavispe	1		1	Oxidación	3.8			
	Caborca	1		1	Oxidación	80			
	Cajeme	1		1	Oxidación				
	Carbo	1	1		Oxidación	-		40	Río Zanjon
	Cumpas	1		1	Oxidación	15		40	Río Moctezuma

**Tabla A.1.1 Localización de sistemas lagunares municipales y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo	Q (L/s)		% η DBO	Disposicion final
		Total	En operación	En rehabilitación		Diseño	Operacion		
SONORA	Divisadero	1		1	Oxidación		8.3	42	
	Empalme	1	1		Oxidación	100	90	68	Mar
	Etchojoa	1		1	Oxidación	---10			
	Frontera	1		1	Oxidación	10	9	15	Riego
	Granados	1		1	Oxidación	4	-	313	
	Guaymas	1			Oxidación	280	240	39	Mar
	Huachinera	1			Oxidación	2.6			
	Huasabas	1		1	Oxidación	2.5	-	-	
	Huepac	1		1	Oxidación	4.3			
	Magdalena	1	1		Oxidación	100			
	Mazatan	1	1		Oxidación			64	A. Matape
	Moctezama	1			Oxidación	10			-Riego
	Naco	1		1	Oxidación	14.1			-Riego
	Nacori Chico	1		1	Oxidación	3			
	Nacozari	1		1	Oxidación	30	30		Rio Moctezuma
	Onovas	1		1	Oxidación	1.6			
	Opedepe	1	1		Oxidación	5	3		
	P. Elias Calles	1	1		Oxidación	12	8.5		
	Puerto Peñasco	1	1		Oxidación	60	72	53	
	Quiriego	1			Oxidación	5	1	87	Riego
	Rayón	1	1		Oxidación	2.5		-	Riego
	Rosario	1	1		Oxidación	4.5			
	Sahuaripa	1	1		Oxidación	9			Riego
Saric	1			Oxidación	4.5				
Tepache	1	1	1	Oxidación	3				
Trincheras	1	1	1	Oxidación	4.7				
Ures	1			Oxidación	20	12	50	Rio Sonora	
Villa Hidalgo	1			Oxidación	4-	2	56	Rio Yaqui	
Yecora	1		1	Oxidación	4.4				
TABASCO	Cárdenas	1	1		Oxidación	287	192	7	Dren
	Centro	1	1		Oxidación	10	10		L. Sin Nombre
TAMAULIPAS	Comacalco	1	1		Oxidación	89.7	80	-	R. Seco
	Cunducan	1	1		Oxidación	60	60	-	Dren agricola
	Macuspana	2	1		Oxidación	-	170	-	R. Puxeatan
	Altamira	1	1		Oxidación	282	9	72	lag. De champayan
	Camargo	1	1		Oxidación	9		50	Subsuelo

**Tabla A.1.1 Localización de sistemas lagunares municipales y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo	Q(L/s)		%η DBO	Disposición final
		Total	En operación	En rehabilitación		Diseño	Operación		
TAMAULIPAS	González	1	1		Oxidación	95	4	95	Bajo natural
	Gustavo Díaz Ordaz	1	1		Oxidación	35	35	40	-
	Hidalgo	1	1		Oxidación	9	9	68	Subsuelo
	Madero	1	1		Oxidación	1562	338	72	Marismas
	Miguel Alemán	1	1		Oxidación	70	70	48	A. San Pedro
	Reynosa	1	1		Oxidación	675	675	58	Rio bravo
	Rio Bravo	1	1		Oxidación	11	11	61	Subsuelo
TLAXCALA	Altzayanca	1	0		Estabilización	1			Barranca
	Antonio Carbajal	1	1		Estabilización	12	10	60	R. Zahuapan
	Apizaco	1	1		Aerada	100	50	61	R. Atenco
	Calpulalpan	2	0		Estabilización	48			Barranca
	Domingo Arenas	1	0		Estabilización	2			R. Zahuapan
	Huamantla	5	1		Estabilización	11	0.5		Barranca
	Hueyotlipa	1	1		Estabilización	7	5	75	Barranca
	Ixtacuixtia	1	1		Aerada	80	55	63	Barranca
	Ixtacuixtia	1	1		Estabilización	7.5	3.5	66	Barranca
	J. Ma. Morelos	1	1		Estabilización	13	8	53	Barranca
	Lardizabal	1	0		Estabilización	6			R. Atoyac
	Lázaro Cárdenas	3	2		Estabilización	16	9	-	Barranca
	Mariano Arista	2	1		Estabilización	20	2.5	-	Barranca
	Panotla	1	1		Estabilización	12	8	56	R. Zahuapan
	Tepeyanco	1	1		Estabilización	30	17	59	Barranca Briones
	Terrenate	1	0		Estabilización	2			Barranca
	Tetia	1	1		Estabilización	32	7	69	Barranca
	Tlaxcala	1	1		Aerada	250	180	87	R. Zahuapan
	Tlaxco	1	1		Estabilización	13	9	52	Barranca Payuca
	Tocatlan	1	1		Estabilización	7	1.5	43	Barranca
Xalostoc	1	1		Estabilización	25	10	62	Barranca	
Xicotzingo	1	1		Estabilización	22	8.5	52	Zanja	
Zacatelco	1	0		Estabilización	7			Barranca	
VERACRUZ	El Higo	1	1		Oxidación	1	1	98	Rio Moctezuma
	Paso de ovejas	1	1		Oxidación	4	4	0	
	Pueblo Viejo	1	1		Oxidación	10	10		L. Pueblo Viejo
	Saltabarranca	1	1		Oxidación	3	3		A. Sn. Agustín

**Tabla A.1.1 Localización de sistemas lagunares municipales y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo	Q (L/s)		% $\eta$ DBO	Disposicion final
		Total	En operacion	En rehabilitacion		Diseno	Operacion		
VERACRUZ	Tamalin				Oxidación	32	32	49	A. Otontepec
	Tierra Blanca				Oxiclación	6	6	53	A. Innominado
	Ursulo Galván	1	1		Oxiclación	14	14		Resumidero
YUCATAN	Tizimin	1	1		Oxidación	5	4	91	Acuífero
ZACATECAS	Jork	1	1		Estabilización	63	63	65	R. Jeréz, circa de cultivo
	Noria de Angeles	1	1		Estabilización	8	3	-	Agostadero,
	Villa de Cos	1	0		Estabilización	10			Area de cultivo
	Villanueva	1	1		Estabilización	8	2.5	20	Area de cultivo
		330	222	39		13053.66	8953.56	6540.2	

**Tabla A.1.2 Localizacion desistemas lagunares en proyecto y construccion y su estado a nivel nacional**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo	Q DISEÑO (L/s)	Disposicion final
		Total	En construcción	En proyecto			
AGUASCALIENTES	Asientos	1		1	Oxidación	1	A.Hondo
BAJA CALIFORNIA	Mexicali	1		1	Aerada	1680	Reúso
BAJA CALIFORNIA SUR	Mulege	1		1	Estabilización	5	Areas verdes
CHIAPAS	Pyas-de ciCatatzaja	1	1		Estabilización	4.9	
COAHUILA	Acuña	1		1	Aerada	164	R. Bravo
DURANGO	Castaños	1	1		Oxidación	60	R. Castaños
	Mon-Fort	1	3	1	Estabilización	1050	Riego
	Durango	3			Facultativa	1556	A acequia Grande. R.
	Inde	1	1		Facultativa	25	A. La Boquilla
	Santiago Papasquiario	2	1	1	Facultativa	21.5	A.
	Ocampo	1	1		Facultativa	32	R. Florido
	Pénuco de Colorado	3	3		Facultativa	25	A. Pinudo e infiltración
	Nombre de Dios	3		3	Facultativa	31	
	Tepehuanes	2		2	Facultativa		
	El Oro	1		1	Facultativa		
	Camatlán	1		1	Facultativa		
	Gpe. Victoria	2		2	Facultativa		
	Coneto de Comonfort	1		1	Facultativa		
Penon Blanco	1		1	Facultativa			
GUANAJUATO	Abasolo	1	1		Estabilización	70	R. Turbio
	Acanbáro	1		1	Estabilización	270	R. Lerma
	Cortazar	1		1	Estabilización	180	R. Laja
	Dolores Hidaigo	1		1	Estabilización	210	R. Laja
	León	1		1	Estabilización	3000	R. Gómez
	Moroleón	1		1	Estabilización	400	L. Yuriria
	Penjamo	1		1	Estabilización	180	R. Penjamo
	Salvatierra	1		1	Estabilización	300	Zona de riego
Silao	1		1	Estabilización	270	R. Silao	
MICHOACAN	Uruaoan	1		1	Aerada		R. Cupatitzio,
	Jiquilpan	1	1		Estabilización		R. Jiquilpan
	La Piedad	1	1		Aerada	200	
	La Piedad	1	1		Estabilización		R. Lerma

**Tabla A.1.2 Localizacion desistemas lagunares en proyecto y construccion y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo	Q DISEÑO (L/s)	Disposicion final
		Total	En construcción	En proyecto			
MICHOACAN	Sahuayo	1	1		Estabilización	180	Dren
	J. Sixto Verduzco	1	1		Estabilización	60	R. Lerma
	Bdsehas	1		1	Aerada		R. Celio
	Venustiano Carranza	1		1	Estabilización		L. Chapala
	Zacapú	1		1	Facultativa		R. Angulo
	Zamora	1		1	Estabilización	330	R. Duero
MÉXICO	Calimaya	1		1	Aerada	37	
	Chapultepec	1	1	1	Aerada	25	
	Tejupilco	1			Estabilización	48	
	Temascalcingo	1		1	Estabilización	30	
	Zinacatepec	1		1	Aerada	150	
NUEVO LEÓN	Linares	1	1	1	Oxidación		
	El Carmen	1			Aerada	55	R. Salinas
OAXACA	Ciudad Ixtepec	1		1	Lagunas?	222	R. Los Perros
	Juchitan de Zaragoza	1		1	Lagunas?	23	R. Los Perros
	Tehuentepec	1		1	Lagunas?	35.4	R. Tehuentepec
	Sn. Blas Atempa	1		1	Lagunas?	10	R. Tehuentepec
	Sn. Pedro Pochutia	1		1	Lagunas?	24.5	Pozo Tamarindo
	Matias Romero	1		1	Lagunas?	15	R. Malatengo
	Sn. Pedro Tapanatepec	1		1	La\$unas?	10	A. Paso Hondo
	Nazareno Etia	1		1	Lagunas?	11	Riego agricola
PUEBLA	Palmar de Bravo	1	1		Estabilización	11.1	
	Acatlán de Osorio	1	1		Aerada	30	
	Tepeaca	1		1	Aerada	46	
	Sh. Pedro Yeloixtiahuaca	1		1	Estabilización	1	
	Tlapanala	1		1	Estabilización	5	
SAN LUIS POTOSI	Axtla de Terrazas	2	1	2	Estabilización	31.3	A. y riego
	Ciudad Valles	1			Estabilización	180	R. Valles
	Tampacin	1		1	Estabilización	13	
	Villa de Ramos	1		1	Estabilización	10	Laguna
SINALOA	Costa rica	1		1	Estabilización	120	ren agricola
	El Dorado	1		1	Estabilización	75	Dren Agricola
	Guamuchil	1		1	Estabilización	270	
	Guasave	1		1	Estabilización	180	

**Tabla A.1.2 Localizacion desistemas lagunares en proyecto y construccion y su estado a nivel nacional (continuación)**

Estado	Municipio	Plantas			Tipo-	Q DISEÑO (L/s)	Disposicion final
		Total	En construcción	En proyecto			
	Mazatlán	1		1	Estabilización	600	
SONORA	Aconchi	1	1		Oxidación	2.3	
	Cajeme	1		1	Estabilización	800	
TAMAULIPAS	Rio Bravo	1		1	Oxiclación	121.66	Dren R. Bravo
VERACRUZ	Minatitlán	2		2	Oxidación	500	R. Coatzacoalcos
	Playa Vicente	1		1	Oxidación	48	
	Tlabcoyan	1		1	Oxiclación	6	
	Coatzacoalcos	2		2	Oxidación	800	
	Tepetzintla		1		Oxidación	4	
	Colipa		1		Oxidación	2	
	Lerdo de Tejada		1		Oxiclación	36	
	ZACATECAS	Benito Juárez			1	Estabilización	12
	Huanusco			1	Estabilización	16	R. Juchipila
	Jalpa			1	Estabilización	73	R. Juchipila
	Juchipila			1	Estabilización	53	R. Juchipila
	Mezquital del Oro	1		1	Estabilización	20	R. Mezquital
	Moyahua	1		1	Estabilización	16	R. Juchipila
	Pinos	1		1	Estabilización	15	A. Sn. Bias, A. Las Tinajas
	Rio Grande	1		1	Estabilización	37	R. Aguanaval
	Sain Alto	1		1	Estabilización	16	R. Saint Alto,
	Tabasco	1		1	Estabilización	22	R. Juchipila
	Tialtenango	1		1	Estabilización	100	R. Tialtenango
	Valparaiso	1		1	Estabilización	28	R. Valparaiso
	Villanueva	1		1	Estabilización	24	R. Juchipila
		102	26	76		15325.66	

## ANEXO 2

### MICROBIOLOGIA DE LAS LAGUNAS

La depuración de aguas residuales por lagunas de estabilización consiste en un proceso de degradación de la materia orgánica mediante la actividad biológica de diversos grupos de seres vivos. En la biodegradación intervienen diversas relaciones teóricas que transforman la materia orgánica y mineral en grandes cantidades de biomasa (fitoplancton y zooplancton) la cual constituye un sustrato alimenticio potencial para otros organismos.

No todos los compuestos orgánicos son igualmente degradables por acción bacteriana. Entre las sustancias de más fácil ataque se encuentran los glúcidos y los prótidos, mientras que otras, como la celulosa, la quitina y muchos lípidos y pigmentos llegan relativamente intactas al fondo, incorporándose a los sedimentos. Los productos resultantes de la degradación son, en último término, agua, anhídrido carbónico y sales minerales.

Los factores ambientales son básicos ya que actúan como controladores del crecimiento y de la supervivencia, lo cual se aprecia en la distribución de los microorganismos cuyas interacciones dinámicas entre las poblaciones microbianas y su alrededor son necesarias para soportar la productividad y mantener la calidad ambiental de los ecosistemas. La disponibilidad de un microorganismo para degradar un contaminante es altamente dependiente de la estructura química del contaminante mismo. Un sencillo cambio en los constituyentes de un pesticida puede hacer la diferencia entre biodegradabilidad y recalcitrancia (completa resistencia a la biodegradación), por ejemplo.

#### A.2.1 Microbiología en los diferentes tipos de lagunas

Cada uno de los ambientes acuáticos o terrestres están conectados físicoquímicamente con su medio circundante mediante procesos meteorológicos e hidrológicos (Figura A.2.1). Por ejemplo, la precipitación pluvial combinada con su gradiente y las características de la laguna, determinan la diversidad de microorganismos presentes.

Las diferentes interacciones entre las poblaciones microbianas, plantas y animales proveen estabilidad a la comunidad biológica para dar un hábitat adecuado y asegurar la conservación del balance ecológico. Entre ellas, destaca el mutualismo o simbiosis la cual es una relación obligada entre dos poblaciones que se ven mutuamente favorecidas.

Los organismos acuáticos se agrupan en diferentes categorías de acuerdo con su capacidad de supervivencia en un sistema en particular. Las bacterias presentes en las áreas platónicas y bénticas juegan un papel muy importante en el ciclo biogeoquímico. Algunas bacterias son heterótrofas, utilizando carbón reducido

como fuente de energía, y otras son fotosintéticas o proporcionan energía para reducir compuestos diferentes al carbono (Figura A.2.2).

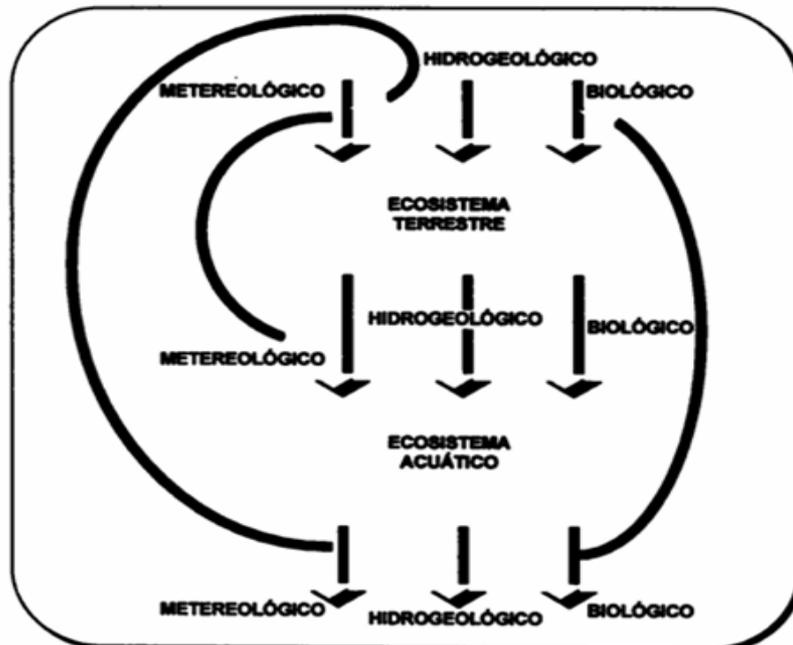


Figura A.2.1 Modelo esquemático de las líneas funcionales entre los ecosistemas acuático y terrestre

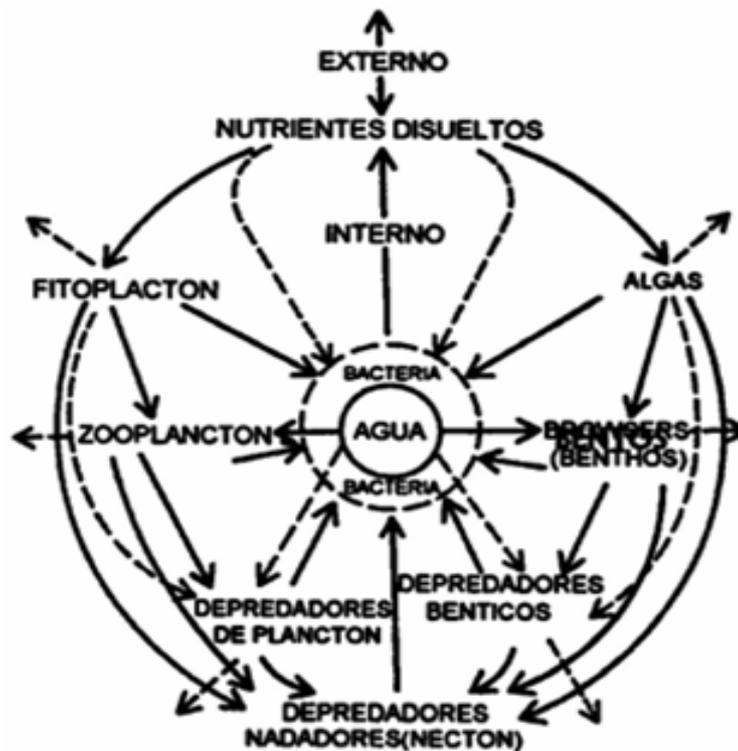


Figura A.2.2 Diagrama de la cadena alimenticia en una laguna

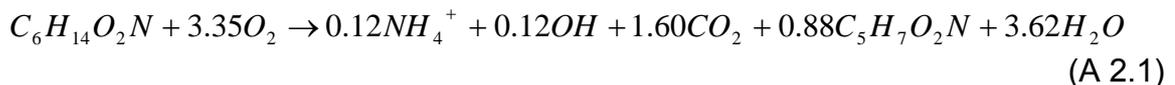
En los sedimentos, otras poblaciones bacterianas y hongos actinomicetos del grupo de las levaduras aseguran, procesos de degradación de la materia orgánica, principalmente de tipo fermentativo. También se tiene una presencia abundante de población bentónica compuesta en su mayoría por larvas de insectos Quirónomidos que suelen ser los más abundantes y que se alimentan de microorganismos del sedimento actuando sobre el mismo para removerlo. Su presencia o ausencia es un indicador del proceso en las lagunas.

En las lagunas facultativas, los procesos de oxidación bacteriana convierten el material orgánico a dióxido de carbono, amoníaco y fosfatos. Las bacterias involucradas son *Pseudomonas* sp., *Flavobacterium* sp y *Alcaligenes* sp. La presencia de nutrientes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{-2}$ ) proporcionan un ambiente ideal para el desarrollo de las algas y éstas a través de su actividad fotosintética producen más oxígeno. Este oxígeno está disponible para que las bacterias continúen la oxidación aerobia de la materia orgánica.

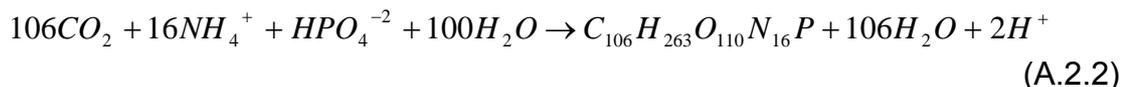
Las lagunas aerobias, de maduración o pulimento son concebidas como, el último tanque en una secuencia de lagunas anaerobias-facultativas-aerobias o como lagunas de pulimento de una planta de tratamiento convencional. Éstas tienen como función principal, la destrucción de los microorganismos patógenos (bacterias, virus, cistis y huevos de parásitos intestinales).

#### A.2.2 Remoción de materia orgánica

La respiración bacteriana degrada la DBO a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  vía la ecuación (A.2.1.)

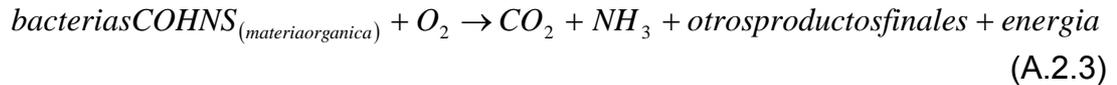


La ecuación A.2.1 es la reacción de respiración la cual combina el rompimiento bacteriano catabólico del sustrato: ( $C_6H_{14}O_2N$ ) para producir energía y metabolitos, y la producción anabólica de nuevas células ( $C_5H_7O_2N$ ). El  $\text{CO}_2$  producido metabólicamente es usado por las algas para generar nuevas células de acuerdo con la ecuación (A.2.2)

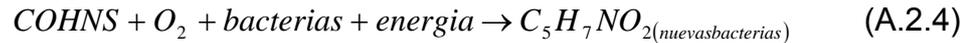


El oxígeno producido por la fotosíntesis de las algas soporta la respiración bacteriana.

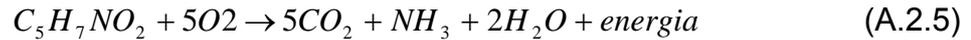
Las siguientes tres ecuaciones representan a detalle los procesos de transformación (que se llevan a cabo Thirumurthi, 1991). Oxidación (proceso desasimilatorio)



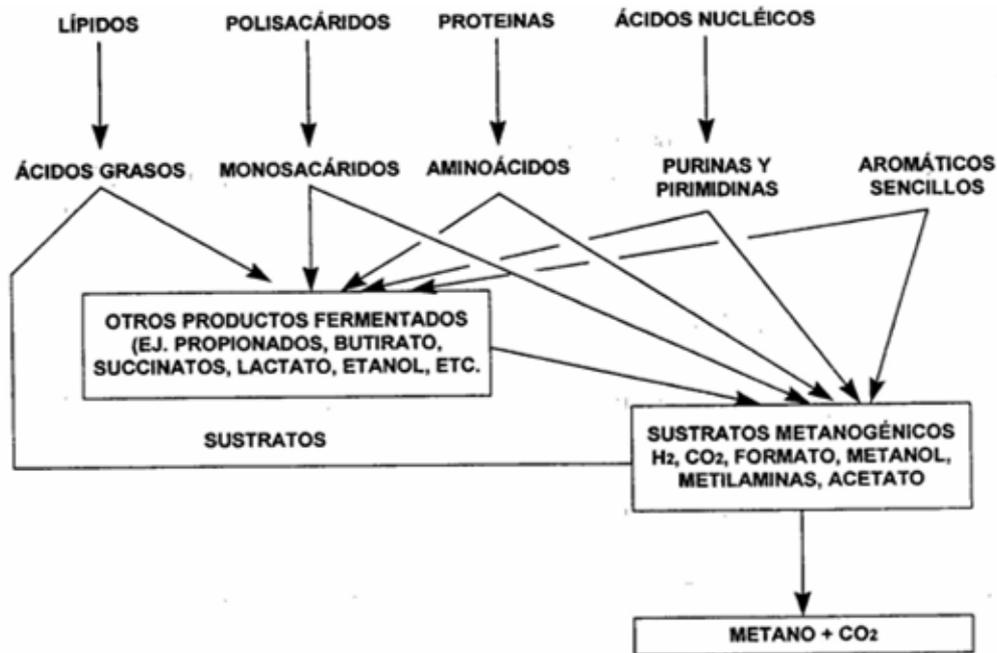
Síntesis (proceso de asimilación)



Respiración endógena (autooxidación)



En un medio anaerobio la conversión biológica de la materia orgánica ocurre en tres etapas (Figura A.2.3). La primera (tóxica) consiste en el proceso que involucra la transformación mediante una enzima (hidrólisis) de compuestos de masa molecular alta a compuestos fáciles de ser usados como fuente de energía y células carbonáceas. La acidogénesis involucra la conversión bacteriana de los compuestos obtenidos en la primera etapa, a compuestos intermediarios de baja masa molecular. La tercera etapa (metanogénesis, o anóxica) involucra la conversión bacteriana de los compuestos intermediarios en productos finales sencillos, principalmente metano y dióxido de carbono. Así, en las lagunas anaerobias, la degradación de la materia orgánica se realiza a través de las bacterias formadoras de ácidos orgánicos y las bacterias metanogénicas. Las primeras convierten los compuestos orgánicos complejos, presentes en el agua residual, en moléculas sencillas. Los carbohidratos, como la celulosa, o amino, son convertidos en ácidos orgánicos, aldehídos y alcoholes; los lípidos (ej. grasas y aceites) en glicerol y ácidos grasos que posteriormente serán transformados en alcoholes, aldehídos y ácidos; las proteínas son degradadas a aminoácidos, los cuales a su vez son convertidos en ácidos orgánicos, mercaptanos y aminas. Estos productos de degradación ácida, donde destaca el ácido acético son el sustrato para las bacterias metanogénicas, que convierten este material a metano y dióxido de carbono.



**Figura A.2.3 Diagrama esquemático de la trayectoria del flujo de carbono en un digestor anaerobio.**

### A.2.3 Algas en las lagunas de estabilización

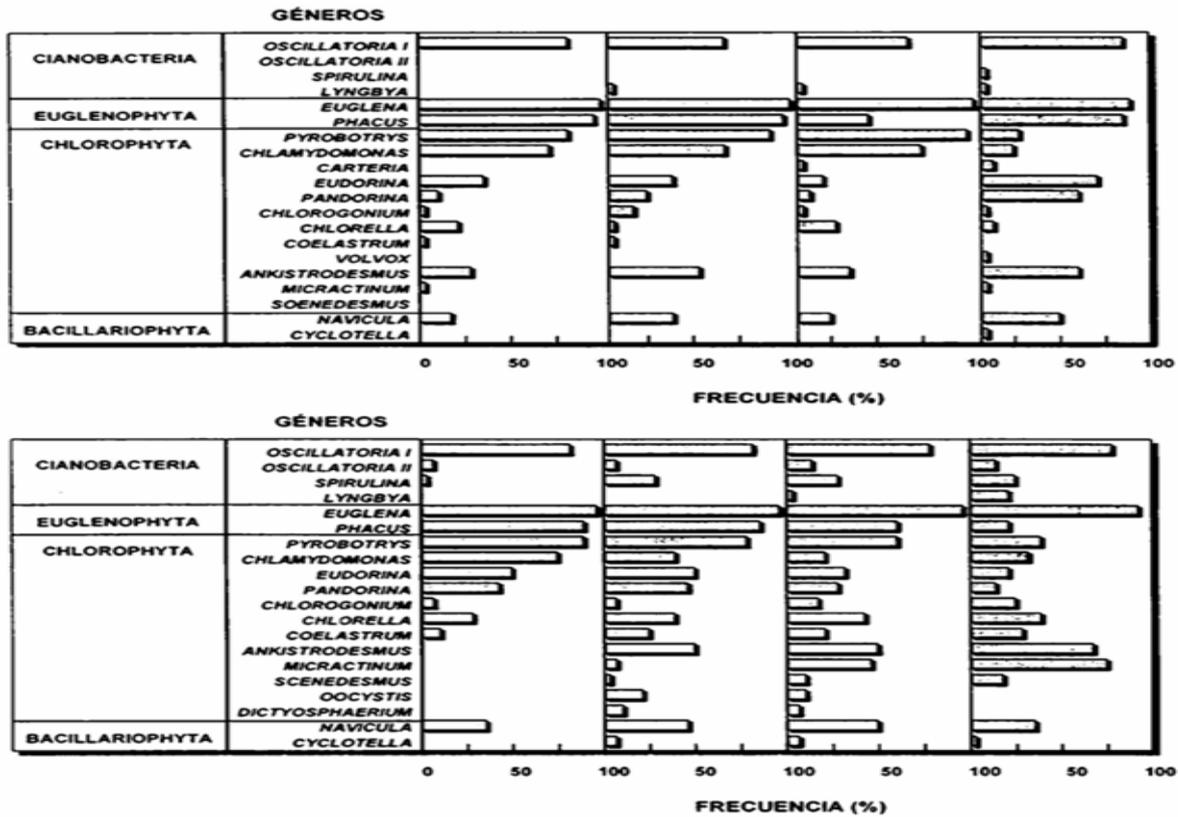
Las algas son organismos sencillos del grupo de Thallophytes que son plantas que no tienen definidas sus raíces o sistema vascular de savia y no producen flores o semillas. Son organismos fotosintéticos dado que contienen clorofila y emplean la energía de la luz solar, utilizando el complejo  $\text{CO}_2\text{-HCO}_2\text{-CO}_3^{2-}$ . Algunas algas no tienen medios de locomoción mientras que otras tienen flagelos o un sistema para ajustar su movimiento mediante vacuolas gaseosas.

El fitoplacton comprende ocho principales grupos taxonómicos de algas, algunos microscópicos. Estos grupos presentan diferentes formas, desde organismos unicelulares hasta complejos. Existen diferencias funcionales entre cada grupo de fitoplacton. Las diatomeas generan una estructura silicea llamada, frústula a partir de la sílice disuelta en el agua. Las algas azul-verdes pueden fijar el nitrógeno disuelto y tiene mayores ventajas que otras que no lo hacen. Las algas flageladas son capaces de coleccionar partículas pequeñas o compuestos orgánicos disueltos, combinando nutrición heterótrofa y autótrofa. Otras algas verdes son alimento de animales planctónicos.

En ausencia de luz o en ambientes con una intensidad reducida de la misma, algunas algas se encuentran en respiración endógena mientras que otras utilizan sustancias orgánicas como su fuente de energía. Para ambas formas de oxidación biológica, el oxígeno es requerido y adsorbido del agua residual.

En 1982, se tenían registrados 125 géneros de algas en tanques de oxidación de los Estados Unidos. Las algas, por lo común, tienden a ser estables en número,

género, y cantidad y, se debe resaltar que dadas las características del agua residual cada laguna tiene su propia flora. Una distribución de las algas identificadas en las lagunas de estabilización se muestra en los histogramas de la Figura A.2.4.



**Figura A.2.4 Generos de algas presentes en (a) una laguna facultativa secundaria. (b) una laguna facultativa primaria.**

La Chlorella es la primera microalga que aparece. Brota rápidamente en agua residual turbia con poca intensidad luminosa y muere después de 10 días. Scenedesmus alcanza su máximo hasta el doceavo día cuando la Chlorella desaparece. Entonces, Chlamydomon invade el estanque, ésta es de las algas más activas, en la purificación de las aguas residuales.

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 flora mixta.

Las algas generan dominancia del plancton dependiendo de que algunas diatomeas y algas azul-verdes filamentosas dominen la flora bentónica. Las diatomeas son más abundantes en primavera, mientras que las cianofíceas tienden a proliferar al final del verano.

En: general, algunas plantas acuáticas tienen altas tasas de producción de biomasa. Las microalgas han sido estudiadas como productoras de gas

(hidrógeno) y líquido (aceites), mientras que las macroalgas, como las algas gigantes con: altas tasas de crecimiento, producen cantidades considerables de carbohidratos los cuales son anaerobiamente digeridos a metano o fermentados a alcohol. Las plantas emergentes, como eneas y juncos y las plantas flotantes como el jacinto acuático son altamente productivas y representan una fuente potencial de almacenamiento de comida para la conversión de metano o alcohol.

#### A. 2.3.1 Periodicidad de las algas

Las poblaciones de algas pueden disminuir rápidamente a medida que el zooplancton (rotíferos, copépodos y daphnia) aumenta. La periodicidad de las algas está atribuida a fenómenos físicos o químicos mientras que la influencia de la depredación es notable. Las algas pueden emitir compuestos extracelulares o inhibidores. Se tiene evidencia que *Chlorella* secreta una sustancia llamada chlorellina. Sus propiedades inhibitorias generalmente se atribuyen a las bacterias patógenas en lugar de a ellas mismas y a otras algas.

#### A. 2.3.2 Capacidad de las algas para remover nutrientes

La capacidad de las algas para utilizar y concentrar el fósforo y el nitrógeno no está demostrada. Sin embargo, las algas unicelulares, *Scenedesmus*, pueden almacenar del 40 a 60 % de nitratos y de 60 a 80 % de fosfatos.

La asimilación metabólica de nitrógeno por el sistema de algas-bacterias es del orden del 10 al 12% a partir de las fórmulas clásicas empíricas de algas ( $C_{5-7}H_{9-8}O_{2-3}N$ ) y las bacterias ( $C_5H_7O_2N$ ).

La acumulación de 1, mg/l de fósforo por las algas está acompañada por el metabolismo del 33 a 78 mg/l de carbono y de 11 a 12 mg/l de nitrógeno, este último limitante del sistema ya que, el crecimiento de las algas tiene una relación, de N/P de 5: 1 a 10: 1.

#### A. 2.3.3 Biomasa de las algas

La cuantificación de la biomasa de las algas presentes en las lagunas de estabilización puede determinarse a través de métodos directos, que incluyen el peso húmedo o seco de los microorganismos presentes en un cierto volumen de muestra, o por métodos indirectos, como contenido y volumen de las células de algas y la clorofila a. Siendo estos últimos los más empleados.

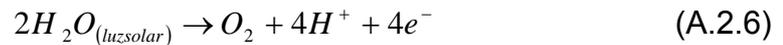
En las lagunas facultativas, la concentración de clorofila a es menor que la observada en lagunas de maduración. En este tipo de lagunas, los valores de clorofila a en el efluente están en función de los movimientos y de la estratificación de las algas en la columna de agua. También se ha observado que un aumento de la carga orgánica superficial en las lagunas provoca la reducción de la biomasa de las algas. Esta disminución de clorofila a puede estar relacionada con factores como el aumento de la concentración de amoníaco, sulfato, turbidez, tiempo de

retención de 1.6 días, el cual esta próximo al tiempo de duplicación de la población de algas y como consecuencia, estas serian eliminadas junto con el efluente (Rolim et al., 1990).

#### A. 2.3.4 Fótosisntesis de las algas

A pesar de que la foltosisntesis de las algas no es un proceso de degradación conviene analizar su función ya que por medio de esta los organismos son capaces de crecer y reproducirse usando la energia radiante para la fijación del CO<sub>2</sub> atmosférico y, consecutivamente, proporcionar la energia requerida para reducir a CO<sub>2</sub> los compuestos orgánicos. La fotosintesis por lo común se asocia con el crecimiento de las plantas verdes, sin embargo, algunas bacterias como las algas azul-verdes llevan a cabo este proceso (Thirumurthi, 1991).

La fotosintesis se clasifica en oxigánica y anoxigénica dependiendo de la fuente reductora usada por un organismo en particular. En la fotosintesis oxigánica la descarga de agua es la fuente reductora, con el oxigeno producido como un subproducto. La ec (A.2.6) representa la fotosintesis oxigánica.

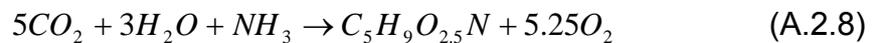


Este tipo de fotosintesis ocurre en plantas verdes, algas y cianobacterias. El oxigeno, subproducto de la fotosintesis oxigénica permite a las bacterias aerobias la degradación del material orgánico presente en la descarga (Thirumurthi, 1991)

La fotosintesis anoxigénica no produce oxigeno como, subproducto y ocurre en ausencia completa de él. Las bacterias involucradas en este proceso son frecuentemente anaerobias y su fuente de energia proviene de la reducción de los compuestos inorgánicos. Algunas bacterias usan compuestos reductores de azufre produciendo azufre elemental.



La actividad de las algas en los sistemas de lagunas y el metabolismo aerobio de las bacterias heterotóficas, pueden ser representados por las siguientes ecuaciones (Smith and Finsch, 1983 en Thirumurthi, 1991):



## **ANEXO 3**

### **TEMPERATURAS PROMEDIO EN MEXICO**

#### **A.3.1 Temperaturas promedio en México**

Conocer la variación de, temperaturas a lo largo del país provee la información necesaria para el diseño dado que las temperaturas de las lagunas son de 2 a 3 °C más cálidas que el aire (lo contrario sucede en la estación más fría).

Otras temperaturas de diseño utilizadas son la temperatura del aire en el periodo más frío de la temporada de riego y la mes más frío de la temporada turística.

La evaporación neta (precipitación - evaporación) tiene que tomarse en cuenta para el diseño de lagunas facultativas y de maduración, no así para el de las lagunas anaerobias, ya que éstas generalmente tienen una capa de nata la cual evita de manera significativa la evaporación. Si se utiliza la tasa neta de evaporación anual y la de evaporación del mes más cálido adicionalmente se debe realizar un balance hidráulico en el mes más cálido.

La Tabla A.3.1 presenta la temperatura media del mes más frío y la evaporación neta máxima para, las localidades más importantes de cada uno de los estados de la República. Estas temperaturas podrían usarse como referencia para lugares cercanos al sitio donde se construirán las lagunas.

**Tabla A.3.1 Temperaturas medias en el mes más frío en las principales ciudades de la republica mexicana**

ESTADO	CIUDAD	TEMP ° C	MES MAS FRIO	PERIODO DE OBSERVACIÓN (AÑOS)
<b>ZONA NORTE</b>				
Chihuahua	Camargo	10.9	Enero	28
	Chihuahua	9.8	"	27
	Cd. Delicias	9.4	"	29
	Hidalgo del Parral	10.2	"	27
	Juárez	6.1	"	20
	Moctezuma	8.9	"	21
	Nuevo Casas Grandes	8.3	"	10
	Qjinaga	10.4	"	27
Coahuila	Monclova	13.0	Enero	23
	Piedras Negras	11.1	"	22
	Saltillo	11.7	"	30
	Torreón	14.4	"	23
Durango	Cd. Lerdo	12.9	Enero	30
	Durango	11.8	"	24
	Guanacevi	9.1	"	30
	Santiago Papasquiaro	11.7	"	25
<b>ZONA CENTRO</b>				
Aguascalientes	Aguascalientes	13.8	Enero	27
	Pabel1ón de Arteaga	11.7	11	25
Colima	Colima	22.7	Enero	27
	Manzanillo	24.3	Marzo	30
D.F.	Mixcoac	12.7	Diciembre	20
	Escandón	14.4	Enero	29
	Iztacalco	12.8	Diciembte	18
Guanajuato,	San Gregorio, Xoch.	11.8	Enero	10
	Celaya	14.9	Enero	30
	Guanajuato	14.1	"	25
	Lrapuato	17.4	"	30
	León	15.5	"	30
	San Miguel de	17.4	Diciembre - Enero	24
	Allende			
Hidalgo	Aparn	10.5	Enero	18
	Pachuca	12.0	"	30
	Tulancingo	1,2.0	Diciembre - Enero	26
Jalisco	Autlán	0.5	Enero	25
	Guadalajara	15.2	"	30
	Puerto Vallarta	22.9	"	29
	San Miguel el Alto	12.8	"	26
	Teocaltiche	13.6	"	24
México	Amecameca	11.4	Diciembre	15
	Malinalco, Xoch.	17.6	Diciembre - Enero	13
	Texcoco	12.5	Enero	29
	Toluca	10.0	"	29
	Valle de Bravo	14.9	"	18
Michoacán	Apatzingán	25.1	Enero	30
	Morelia	14.4	"	29
	Uruapan	15.2	"	8

**Tabla A.3.1 Temperaturas medias en el mes más frío en las principales ciudades de la republica mexicana (continuación)**

	Zamora	17.0	"	30
	Zitácuato	15.0	"	29
Puebla	Huachinango	12.6	Enero	15
	Izúcar de Matamoros	19.9	Diciembre - Enero	23
	Puebla	14.0	Enero	28
	Teziutlán	13.4	"	28
	Zacatlán	11.4	"	15
Querétaro	Jalpan	17.9	Diciembre - Enero	28
	Querétaro	15.3	Enero	30
	Tolimán	16.2	"	21
	Villa Corregidora	14.0	"	14
Tlaxcala	Huamantla	11.8	Enero	25
	Tlaxcala	13.9	11	30
ZONA SUR				
Guerrero	Acapulco	26.5	Enero	30
	Atoyac	27.3	11	23
	Chilpancingo	19.9	Diciembre - Enero	30
	Iguala	22.5	Enero	26
	Taxco	19.8	Diciembre - Enero	30
Oaxaca	Huajuapán de León	16.6	Diciembre	29
	Huautla de Jimenez	14~3	Enero	19
	Juchitán	24.8	"	29
	Matias Romero	22.9	"	30
	Oaxaca	18.3	Diciembre - Enero	24
	Salina Cruz	25.5	Enero	30
Tabasco	Comalcalco	23.0	Enero	27
	Tenosique	22.6	"	17
	Villahermosa	24.0	"	29
Veracruz	Córdoba	17.1	Enero	30
	Jalapa	14.8	"	30
	Orizaba	16.1	"	30
	Poza Rica	18.7	"	15
	Santiago Tuxtla	20.6		22
	Tierra Blanca	24.3	"	25
	Veracruz	21.5	"	30
ZONA SURESTE				
Campeche	Campeche	23.5	Enero	30
	Champotón	22.3	Diciembre - Enero	30
	Cd. del Carmen	23.6	Enero	24
	Escarcéga	22.6	11	27

**Tabla A.3.1 Temperaturas medias en el mes más frío en las principales ciudades de la republica mexicana (continuación)**

Chiapas	Ocosingo	21.3	Enero	23
	Pichucaleo	22.9	11	26
	Sn. Cristobal las	12.3	Diciembre - Enero	27
	Casas			
	Tapachula	25.5	Diciembre	30
	Tuxtla Gutiérrez	22.1	11	21
Quintana Roo	Cocoyol	22.6	Enero	16
	Cozumel	22.8	"	30
	Felipe Carrillo Puerto	22.5	"	18
	Kantunilken	21.5	"	18
Yucatán	Bacanchen	22.6	Diciembre - Enero	18
	Mérida	23.0	Enero	30
	Progreso	22.7	"	30
	Tizimin	22.2	Diciembre	18

**Tabla de Conversión al sistema internacional de unidades (S.I.)**

MAGNITUD	UNIDAD	SIMBOLO	MULTIPLICAR POR	UNIDAD S.I.	SIMBOLO S.I.
Presión	Atmósfera	atm	101,331.13	Pascal	Pa
Presión	Milímetros de	mm Hg	133.37	Pascal	Pa
Potencia	mercurio caballo de potencia	HP	0.746	kilo-watt	kW
Energía	caloría	cal	4.186	juole	j

**Tabla de conversión de unidades de medida al Sistema Internacional de Unidades (SI)**

OTROS SISTEMAS DE UNIDADES		MULTIPLICADO POR	SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)	
UNIDAD	SÍMBOLO		SE CONVIERTE A	
			UNIDAD	SÍMBOLO
<b>LONGITUD</b>				
Pie	pie, ft., ‘	0.3048	metro	m
Pulgada	plg., in, “	25.4	milímetro	mm
<b>PRESIÓN/ ESFUERZO</b>				
Kilogramo fuerza/cm <sup>2</sup>	kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	98,066.5	Pascal	Pa
Libra/pulgada <sup>2</sup>	lb/ plg <sup>2</sup> ,PSI	6,894.76	Pascal	Pa
Atmósfera	atm	98,066.5	Pascal	Pa
metro de agua	m H <sub>2</sub> O (mca)	9,806.65	Pascal	Pa
Mm de mercurio	mm Hg	133.322	Pascal	Pa
Bar	bar	100,000	Pascal	Pa
<b>FUERZA/ PESO</b>				
Kilogramo fuerza	kg <sub>f</sub>	9.8066	Newton	N
<b>MASA</b>				
Libra	lb	0.453592	kilogramo	kg
Onza	oz	28.30	gramo	g
<b>PESO VOLUMÉTRICO</b>				
Kilogramo fuerza/m <sup>3</sup>	kg <sub>f</sub> /m <sup>3</sup>	9.8066	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
Libra /ft <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	157.18085	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
<b>POTENCIA</b>				
Caballo de potencia, Horse Power	CP, HP	745.699	Watt	W
Caballo de vapor	CV	735	Watt	W
<b>VISCOSIDAD DINÁMICA</b>				
Poise	μ	0.01	Mili Pascal segundo	mPa.s
<b>VISCOSIDAD CINEMÁTICA</b>				
Viscosidad cinemática	v	1	Stoke	m <sup>2</sup> /s (St)
<b>ENERGÍA/ CANTIDAD DE CALOR</b>				
Caloría	cal	4.1868	Joule	J
Unidad térmica británica	BTU	1,055.06	Joule	J
<b>TEMPERATURA</b>				
Grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	Grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s<sup>2</sup>