

# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

## OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

47



# MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS  
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
MUNICIPALES: LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento  
Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales:  
Lagunas de Estabilización

ISBN: 978-607-626-005-0

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Bulevar Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña  
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua  
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo  
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.  
Tel. (55) 5174•4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México  
Distribución gratuita. Prohibida su venta.  
Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.  
Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,  
sin fines de lucro y citando la fuente

# CONTENIDO

Presentación	V
Objetivo general	VII
Introducción a la operación y mantenimiento de lagunas de estabilización	IX
1. Descripción	1
1.1. Generalidades	1
1.1.1. Lagunas anaerobias	1
1.1.2. Lagunas facultativas	3
1.1.3. Lagunas de maduración	4
2. Operación de lagunas de estabilización	7
2.1. Factores que influyen en el proceso	7
2.1.1. Medición del gasto	7
2.1.2. Características del afluente	8
2.1.3. Temperatura	11
2.1.4. Potencial de hidrógeno	14
2.1.5. Conductividad	15
2.1.6. Oxígeno disuelto	15
2.1.7. Potencial de óxido-reducción	21
2.1.8. Clorofila	21
2.1.9. Coliformes fecales	22
2.1.10. Viento	23
2.1.11. Radiación solar	24
2.1.12. Evaporación	24
2.1.13. Precipitación	25
2.1.14. Toxicidad	25
2.1.15. Indicadores del funcionamiento de una laguna	26
2.1.16. Profundidad de lodo en una laguna	27
2.2. Inspección, monitoreo y frecuencia de muestreo	28
2.3. Actividades rutinarias	29
3. Mantenimiento de lagunas de estabilización	35
3.1. Mantenimiento de taludes, caminos y cercas	35
3.2. Retiro de lodos en lagunas anaerobias y facultativas	36

4. Problemas comunes y acciones correctivas en lagunas de estabilización	41
4.1. Olores	41
4.1.1. Problemas de malos olores por sobrecarga	41
4.1.2. Problemas de malos olores por sustancias tóxicas	43
4.1.3. Problemas de malos olores causados por cortocircuitos	43
4.2. Proliferación de insectos	43
4.3. Crecimiento de vegetación	43
4.4. Remoción de natas	48
4.5. Alta concentración de algas	50
4.6. Presencia de cianobacterias	52
4.7. Cortocircuitos hidráulicos	52
5. Arranque y estabilización del proceso	59
5.1. Actividades de verificación antes del arranque de una laguna de estabilización	59
5.2. Recomendaciones para el llenado de las lagunas	59
5.3. Arranque de operación de lagunas anaerobias	60
5.4. Arranque de operación de lagunas facultativas	61
5.5. Arranque de operación de sistemas de lagunas en serie	61
6. Seguridad e higiene	65
6.1. Manual de seguridad y salud	65
6.2. Responsabilidades de higiene y seguridad	65
6.3. Responsabilidades de gestión	65
6.4. Responsabilidades de supervisión	66
Conclusiones del libro	69
Anexos	
A.1. Formatos de operación	71
A.2. Formatos de mantenimiento	77
Bibliografía	81
Tabla de conversiones de unidades de medida	85
Ilustraciones	95
Tablas	97

# PRESENTACIÓN

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México.**

**Director General de la Comisión Nacional del Agua**



## OBJETIVO GENERAL

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (MAPAS) está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



# INTRODUCCIÓN A LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización son cuerpos de agua contruidos, que operan en condiciones ambientales. Ejemplos de su aplicación en el Continente Americano pueden encontrarse en Brasil, Argentina, Chile, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela, Centro América, Cuba, México y Estados Unidos.

Las lagunas de estabilización son el proceso de tratamiento de mayor aplicación en México. Es asimismo el método más sencillo en su operación y mantenimiento. Sin embargo, como todo proceso de tratamiento, requiere de una buena operación y mantenimiento para su buen funcionamiento.

Toda planta de tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización requiere de un manual de operación y mantenimiento adecuado para cada sistema lagunar. Este libro presenta las actividades de operación y mantenimiento para las lagunas anaerobias, facultativas y de maduración. También se presentan bases teóricas de cada proceso, que ayudarán al operador a realizar una identificación del tipo de laguna o el proceso que se está llevando a cabo en la laguna (anaerobio, facultativo o de maduración).

La operación y el mantenimiento de las lagunas de estabilización son sencillos, pero requieren de personal. En las siguientes páginas podrán consultarse la operación y el mantenimiento del pretratamiento y las características de las aguas residuales.



# 1

## DESCRIPCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

Las lagunas de estabilización son cuerpos de agua creados artificialmente. El proceso de tratamiento es una combinación de sedimentación, digestión y conversión de desechos orgánicos por bacterias y algas, así como de su propia reproducción, que puede ser anaerobia, aerobia o una combinación de ambas.

El uso de lagunas de estabilización se usa para tratar aguas residuales de origen municipal, de la industria azucarera, de producción de papel, o de otras áreas como la petroquímica y la porcelana, entre otras.

De acuerdo con el propósito del tratamiento de las aguas residuales, las lagunas de estabilización pueden clasificarse en: lagunas anaerobias (remoción de sólidos y materia orgánica), lagunas facultativas (remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos) y lagunas de maduración (remoción de patógenos). Las lagunas de estabilización, en función del lugar que ocupan, pueden agruparse en primarias o de aguas residuales crudas, y secundarias, si reciben efluentes de otros procesos.

En relación con la secuencia de sus unidades, pueden clasificarse en lagunas en serie o en paralelo, pudiendo existir combinaciones de varios tipos. Los arreglos de un sistema lagunar pueden comprender una única laguna facultativa. Las lagunas en serie incluyen: anaerobia, facultativa y maduración. Además es deseable construir series del mismo tipo para permitir una operación en paralelo. Las lagunas anaerobias pueden ser diseñadas para operar individualmente o en paralelo.

#### 1.1.1. LAGUNAS ANAEROBIAS

La laguna anaerobia (Ilustración 1.1) se diseña para tratar aguas residuales con concentraciones altas de materia orgánica, su función es permitir la sedimentación de sólidos y la remoción de materia orgánica en ausencia de oxígeno. Por las consideraciones de diseño, las lagunas anaerobias son los estanques de menor área, mayor profundidad y tiempos de residencia hidráulica cortos; asimismo, admiten cargas orgánicas mayores que los otros tipos de lagunas. Su función primaria es remover materia orgánica y sólidos en suspensión.

Para mayor información consulte el libro de *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: lagunas de estabilización* del MAPAS.

En climas cálidos y con un diseño adecuado, podrá obtenerse una remoción aproximada de hasta 60 por ciento respecto de DBO a 20° C y un máximo de 75 por ciento a 25 grados Celsius.

El proceso es sensible a factores ambientales y operativos, como las temperatura, las variaciones de pH y las variaciones bruscas de carga orgánica, lo que puede producir periodos de baja eficiencia. Además, presenta una acumulación normal de natas, lo que genera un aspecto poco agradable.

Ilustración 1.1 Esquema de una laguna anaerobia

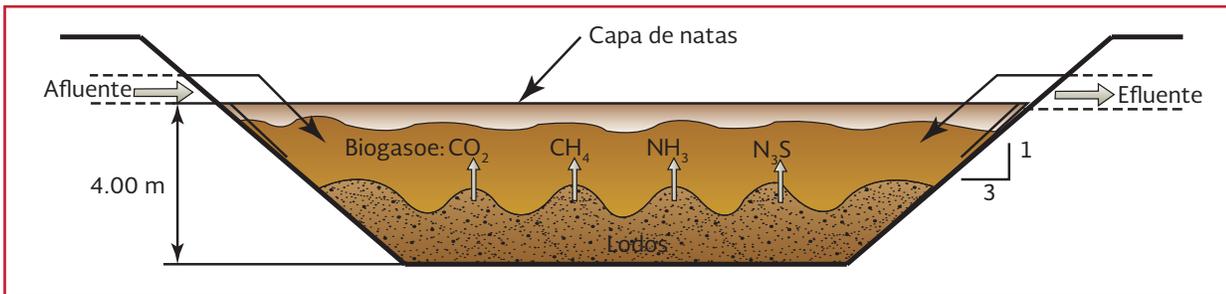


Ilustración 1.2 Laguna anaerobia



En este tipo de lagunas pueden presentarse algas natas en su superficie, generación de burbujas (debido a la liberación de biogás) y coloración del agua gris oscura (Ilustración 1.2). Con frecuencia es evidente el olor a huevo podrido, típico del sulfuro de hidrógeno que se emite a la atmósfera. Las variables que deben controlarse en este proceso son el pH, la temperatura y la carga orgánica. Es posible que el efluente de una laguna anaerobia presente una coloración que puede variar de color, de amarillo a café oscuro y gris oscuro.

Una laguna anaerobia no funciona en forma adecuada cuando recibe una carga orgánica insuficiente, en este caso, se presenta una coloración

del agua roja o rosada (indicador de la presencia de bacterias fotosintéticas). Lo anterior se debe a un error de diseño o a que recibe un gasto menor para la que fue proyectada. Por otra parte, un indicador de que la laguna anaerobia se encuentra sobrecargada es un fuerte olor a huevo podrido.

### 1.1.2. LAGUNAS FACULTATIVAS

Las lagunas facultativas se utilizan frecuentemente y pueden encontrarse como un primer tratamiento o como un tratamiento posterior a las lagunas anaerobias. La profundidad de diseño en estas lagunas varía entre 1.5 y 2 metros (Ilustración 1.3 e Ilustración 1.4).

Ilustración 1.3 Esquema de una laguna facultativa

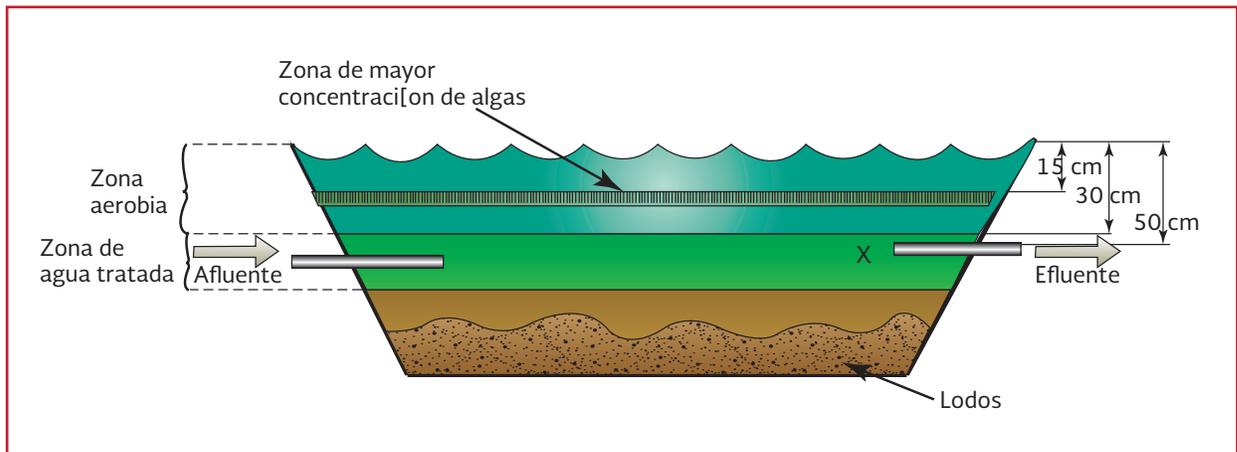
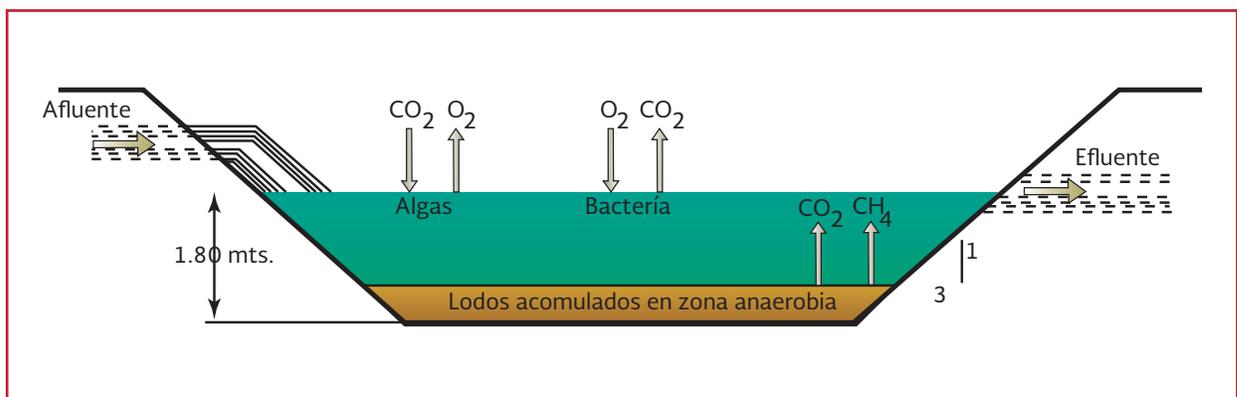


Ilustración 1.4 Esquema de una laguna facultativa



En ellas, el proceso de degradación se lleva a cabo en tres etapas. En el fondo de la laguna existen condiciones anaerobias que generan biogás y que producen un ligero mezclado. La etapa intermedia la llevan a cabo microorganismos facultativos y representa la etapa de transición entre las condiciones anaerobias y aerobias. La tercera etapa corresponde a la zona aerobia.

En la superficie se lleva a cabo la fase aerobia. La producción de oxígeno se realiza por medio de las algas que utilizan como fuente de energía la luz solar en el estanque, proveyéndole al agua una coloración verde oscuro brillante (alta concentración de OD y pH) y la ausencia de malos olores (Ilustración 1.5 e Ilustración 1.6). Algunas lagunas de estabilización presentan construcción de mamparas, para incrementar la eficiencia del proceso, lo que da un comportamiento de flujo pistón al fluido.

El efluente de una laguna facultativa deberá presentar una coloración verde oscuro brillante y no deberá detectarse olor, en este caso debe considerarse un buen funcionamiento. Si el efluente de esta laguna presenta una coloración verde opaco o amarillo, se considera un funcionamiento regular, con disminución de pH y OD

(predominio de algas azul-verdosas). Si esta laguna presenta mal olor y coloración gris a negro, se considera que tiene un mal funcionamiento.

### 1.1.3. LAGUNAS DE MADURACIÓN

Las lagunas de maduración, también llamadas aerobias, son menos profundas que las facultativas (0.9 a 1.5 metros) y en ellas deben predominar las condiciones aerobias. Presentan concentraciones de oxígeno disuelto mayores a las de una laguna facultativa y su objetivo es la remoción de microorganismos patógenos.

El agua de las lagunas de maduración presenta una coloración verde y está libre de olor (Ilustración 1.7 e Ilustración 1.8).

Generalmente las lagunas de maduración se ubican después de una laguna facultativa. El efluente de una laguna de maduración deberá presentar una coloración verde, un pH alcalino (mayor a 8) y no deberá detectarse olor. La presencia de insectos o larvas de insectos en la laguna, indica un mantenimiento pobre y una mala circulación.

Ilustración 1.5 Imagen de una laguna facultativa



Ilustración 1.6 Esquema del funcionamiento de una laguna facultativa

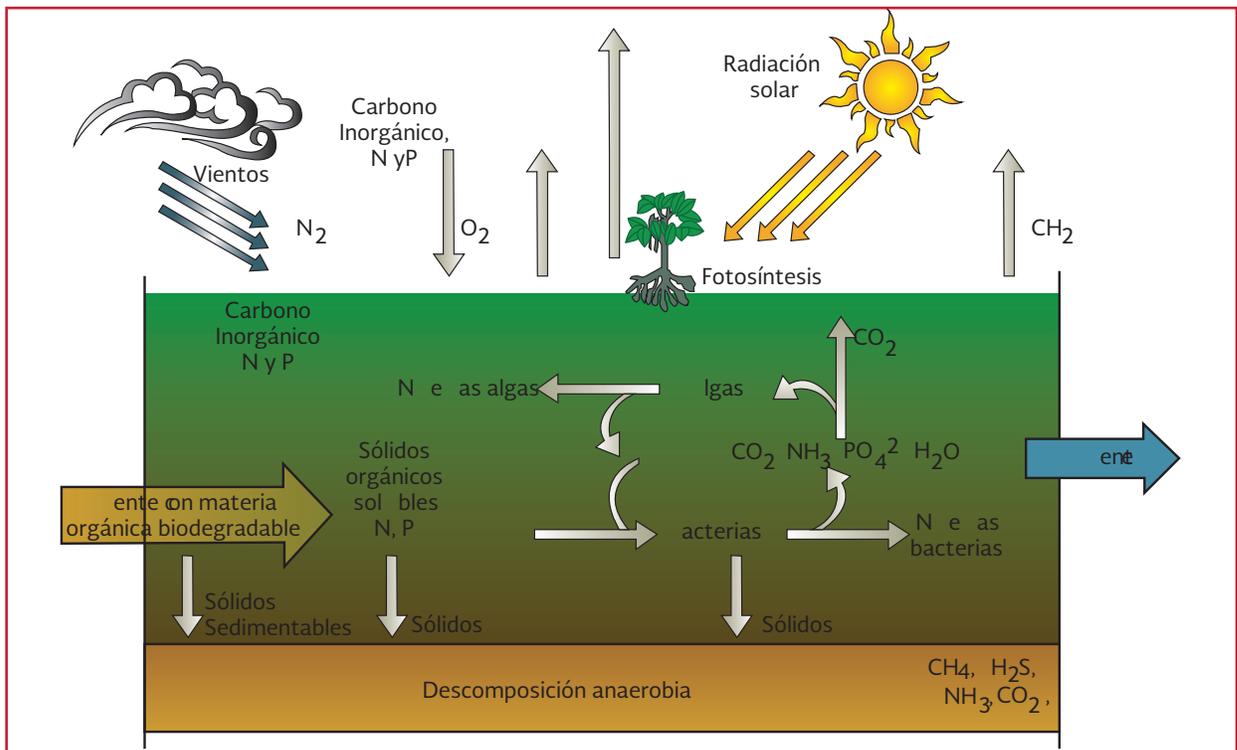


Ilustración 1.7 Esquema de una laguna de maduración

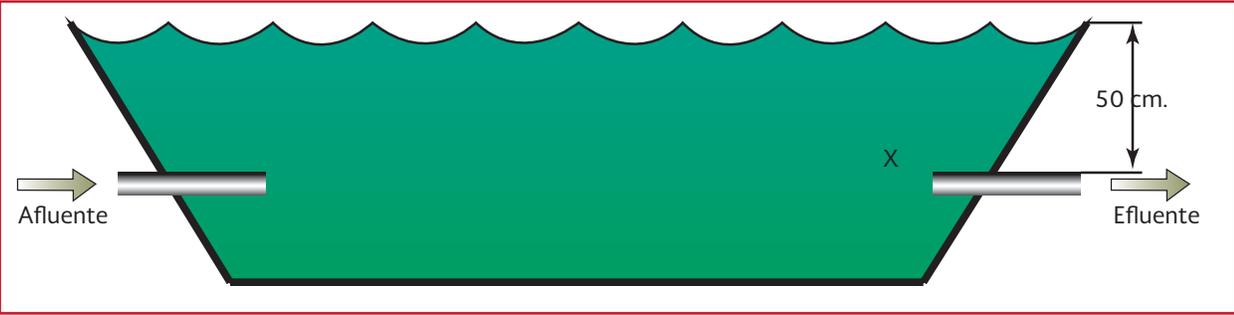


Ilustración 1.8 Imagen de una laguna de maduración



# 2

## OPERACIÓN DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización son el proceso de tratamiento con mayor facilidad de operación y mantenimiento. Sin embargo, como todo proceso de tratamiento, requieren de una correcta operación y mantenimiento para su apropiado funcionamiento, ya que sin ello no podrán alcanzarse los objetivos de tratamiento.

Para la operación y mantenimiento adecuada de un sistema lagunar es necesario contar con personal capacitado para desarrollar el proceso, herramientas para llevar a cabo las actividades, un manual de operación, programas de monitoreo para operar las lagunas de estabilización y evaluar su eficiencia, así como una programación adecuada para la remoción, tratamiento y disposición final de los lodos.

Toda planta de tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización requiere de un manual de operación y mantenimiento adecuado para cada sistema lagunar. Este capítulo presenta los factores de seguimiento para el control del proceso y las actividades de operación para las lagunas anaerobias, facultativas y de maduración.

Para llevar el registro del control de operación, así como las observaciones, se requiere del uso de una bitácora.

En este capítulo se presentan los factores que influyen en el control del proceso, las actividades para la inspección, el monitoreo y la frecuencia de muestreo para lagunas, así como las operaciones rutinarias a realizar en un sistema lagunar. En el capítulo 4 se presenta una descripción de los problemas más comunes que se presentan en las lagunas de estabilización y las acciones correctivas para dichas situaciones.

### 2.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO

Los parámetros para el control del proceso de lagunas de estabilización dependen del tipo de laguna. Los más comunes son: el gasto, el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno, los sólidos, las sustancias activas al azul de metileno, las grasas y aceites, el nitrógeno total y amoniacal, el fósforo, los sulfuros, los coliformes totales y fecales, y los huevos de helminto.

#### 2.1.1. MEDICIÓN DEL GASTO

Una de las labores rutinarias más importantes para operar un sistema lagunar consiste en la

medición del gasto, a partir del cual se controla la cantidad de agua que puede ingresar al sistema. Cada una de las lagunas es un proceso biológico previamente calculado para recibir una carga orgánica y una carga hidráulica, por lo que variaciones excesivas de dichos parámetros pueden afectar negativamente el comportamiento del sistema.

Algunas lagunas de estabilización no cuentan con ningún dispositivo para la medición del gasto, por lo que puede requerirse la instalación temporal de vertedores triangulares en el caso de que el gasto sea pequeño. Otras opciones a utilizar son el método volumétrico, el método de tiempo distancia, o bien, el uso de molinetes hidráulicos. La información obtenida de la medición del gasto debe registrarse en una bitácora específica para dicha actividad.

Los puntos de medición del gasto son la entrada y salida de la laguna. En caso de tener lagunas en serie, también debe medirse entre las interconexiones. En labores rutinarias la medición debe realizarse preferentemente las 24 horas del día; si no se cuenta con un medidor de gasto permanente, debe medirse y registrarse el gasto en diferentes horas del día, de acuerdo con la variación horaria. Cuando se realiza un muestreo compuesto debe medirse el gasto cada vez que se tomen muestras simples. En el caso de definir el gasto promedio en el afluente a una laguna, el gasto debe medirse cada hora, durante una semana continua de medición. La medición del gasto se requiere para:

- Comparar con el gasto de diseño de la laguna, para estimar una posible ampliación del sistema lagunar
- Comparar el gasto afluente con el gasto efluente, al haber una disminución

o incremento entre gastos deberán revisarse las pérdidas por fugas, infiltración y/o calcular las pérdidas por evaporación

- Calcular los tiempos de residencia hidráulica (Ecuación 2.1) de cada tipo de laguna
- Calcular la carga orgánica volumétrica (Ecuación 2.2) en las lagunas y la carga orgánica superficial (Ecuación 2.3) en lagunas facultativas y de maduración

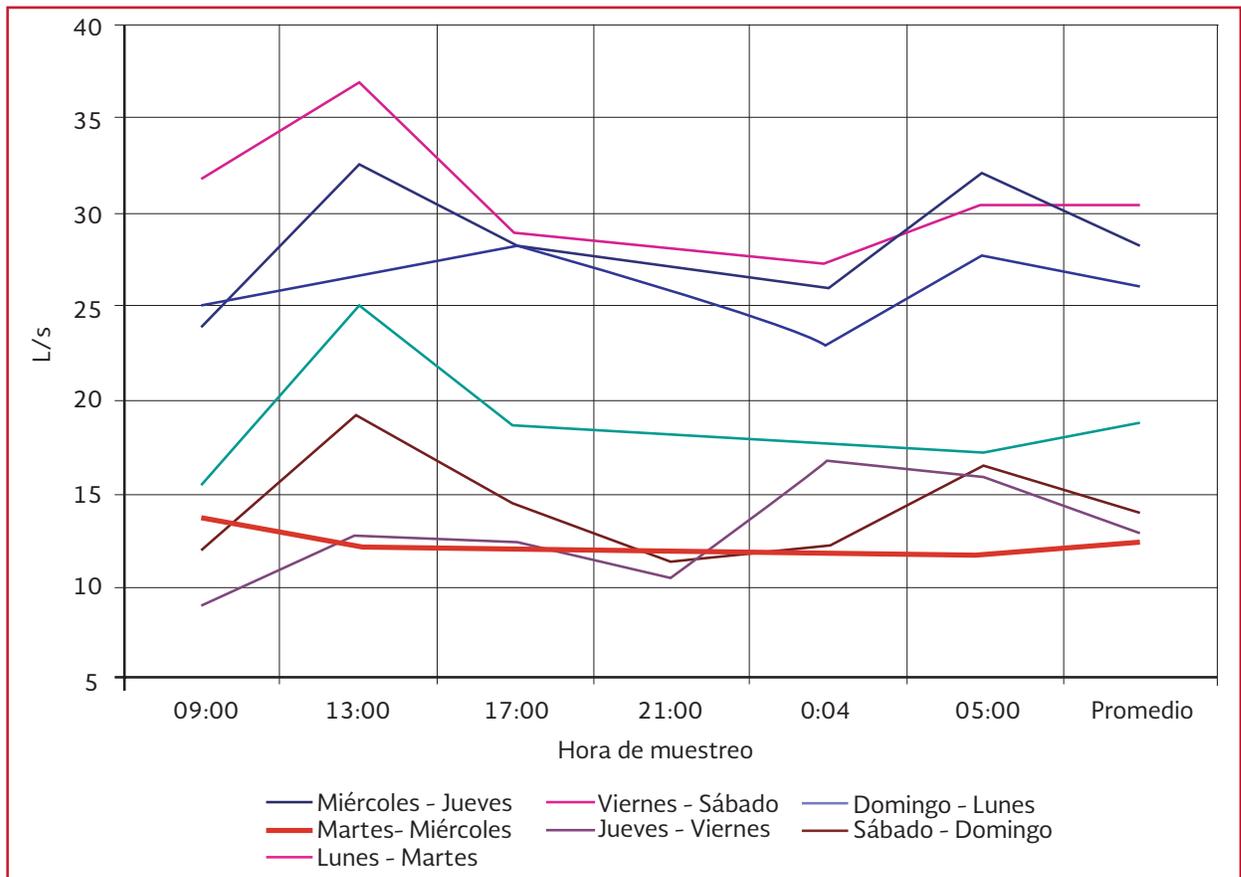
$$TRH = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

En la Ilustración 2.1 se grafica el comportamiento horario de diferentes días de medición del gasto en el afluente en un sistema de tratamiento de aguas residuales, en donde puede observarse la variación diaria y horaria en los datos registrados. Esta variación depende de las actividades de la población. En este ejemplo los días de la semana en que se registraron los mayores gastos fueron viernes a sábado, seguido de miércoles a jueves y de domingo a lunes.

### 2.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE

La concentración de materia orgánica en el afluente es un parámetro que define el proceso que se lleva a cabo en una laguna de estabilización. Cada tipo de laguna presenta un límite de aceptación de carga orgánica en su proceso. Las lagunas anaerobias toleran una carga mayor que las facultativas y estas últimas una concentración mayor que las de maduración. La carga orgánica (concentración de materia orgánica multiplicada por el gasto del afluente) es un parámetro que es necesario controlar de acuerdo con cada tipo de laguna, con el propósito de no

Ilustración 2.1 Variación del gasto del afluente a una planta de tratamiento de aguas residuales



sobrecargarlas y de obtener la eficiencia de remoción planteada en su diseño.

Una sobrecarga orgánica es causada normalmente por cargas orgánicas altas en el afluente o incrementos en la concentración de materia orgánica, sin el correspondiente aumento en la capacidad de la planta de tratamiento.

Esta condición hace que las concentraciones de oxígeno disuelto bajen ( $< 1 \text{ mg/L}$ ) e inhiban el tratamiento. Esto puede verificarse mediante el cálculo de la carga orgánica ( $\text{DBO/d}$ ), comparándola con la capacidad de diseño. La medición de oxígeno disuelto y la realización de perfiles de oxígeno disuelto deberán realizarse en distintos momentos del día, para verificar si hay una baja continua (EPA, 2011).

Una sobrecarga orgánica puede ser ocasionada por varios factores: incremento del gasto de diseño; incremento de la concentración de la materia orgánica (DBO) en el afluente; acumulación de lodos sedimentables, lo que genera una reducción del volumen útil de la laguna y de su tiempo de residencia hidráulica.

Las lagunas pueden presentar sobrecarga debido a que fueron subdimensionadas, su capacidad de tratamiento fue rebasada o bien porque se presentó alguna nueva descarga con alto contenido de materia orgánica que no fue prevista en el diseño.

En caso de una sobrecarga orgánica, un sistema lagunar debe tener estructuras de control para permitir operar con diferentes niveles de agua (volumen útil de tratamiento), controlar la velo-

cidad de flujo, el cierre completo y el cambio de dirección del flujo para permitir la operación en serie o en paralelo.

Como acciones correctivas se contemplan: instalar mamparas para generar un flujo pistón; extender la capacidad de tratamiento; recircular el efluente; revisar posibles cortocircuitos; mejorar la distribución del afluente a la laguna (implementando varios puntos de entrada); tratamiento de nuevas descargas donde se originan; o instalar un sistema anaerobio para la reducción de la materia orgánica antes del sistema lagunar.

Los sistemas lagunares conformados por dos, tres y cuatro lagunas presentan alternativas de distribución de gasto para ser operadas en serie o en paralelo. En el capítulo 4, la Ilustración 4.3 e Ilustración 4.4 ahondan en el tema.

En la Tabla 4.1 se presentan medidas de prevención y control de olores por sobrecarga orgánica en lagunas de estabilización.

En el subcapítulo 2.2, referente a la inspección, monitoreo y frecuencia de muestreo de los parámetros a dar seguimiento en la operación de un sistema lagunar se presentan de la Tabla 2.4 a la Tabla 4.6, en las que se indica la frecuencia de muestreo de los parámetros a seguir dependiendo del tipo de laguna.

La demanda bioquímica de oxígeno es el parámetro a medir para referir la concentración de materia orgánica en el cálculo de la carga orgánica volumétrica en lagunas anaerobias, así como la carga orgánica superficial en lagunas facultativas y de maduración.

Para lagunas facultativas en climas cálidos se han utilizado cargas orgánicas superficiales (Ecuación 2.3), entre 150 y 400 kg DBO/(ha d) sin problemas. El límite inferior de carga corresponde a temperaturas de 20° C y el superior a temperaturas de 30 grados Celsius. Para lagunas anaerobias se utiliza la carga orgánica volumétrica (Ecuación 2.2), que varía ente 100 y 400 g DBO/(m<sup>3</sup> d).

$$COV = \frac{Q * S_0}{V} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

COV = Carga orgánica volumétrica, en kgDBO/(m<sup>3</sup> d)

Q = Gasto, en m<sup>3</sup>/d

S<sub>0</sub> = Concentración de sustrato en el afluente, en kgDBO/m<sup>3</sup>

V = Volumen de la laguna (m<sup>3</sup>)

$$COS = \frac{Q * S_0}{A} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

COS = Carga orgánica superficial, en kg DBO/(m<sup>2</sup> d)

Q = Gasto, en m<sup>3</sup>/d

S<sub>0</sub> = Concentración de sustrato en el afluente (kg DBO/m<sup>3</sup>)

A = Área de la laguna (m<sup>2</sup>)

La disponibilidad de nutrientes debe ser la adecuada para el crecimiento de bacterias y algas. Una relación carbono (DQO)/nitrógeno (Nt)/fósforo (Pt) adecuada para las bacterias aero-

bias es de 100/5/1; para un adecuado desenvolvimiento y reproducción de algas, esta relación debe ser de 106/15/1.

El fósforo es un elemento esencial en el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Ya que el florecimiento de algas se presenta en la superficie de las aguas, existe un interés primordial en el control de la cantidad de compuestos de fósforo que entran en aguas residuales domésticas e industriales. Por ejemplo, las aguas residuales municipales contienen de 4 a 15 mg/L de fósforo como fosfatos. Las formas usuales de fósforo encontradas son: ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos, por ejemplo  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4$  y  $\text{H}_3\text{PO}_4$  son biológicamente disponibles para el metabolismo de los microorganismos.

### 2.1.3. TEMPERATURA

En los procesos biológicos, la temperatura influye en la velocidad de reacción de un proceso y ésta a su vez influye en la determinación del tiempo de residencia hidráulica que se requiere para llevar a cabo la degradación. La temperatura del agua es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática; por ejemplo, el incremento en la temperatura puede causar un cambio en las especies de peces que pueden existir en un cuerpo de agua. La temperatura óptima para la actividad bacteriana se encuentra en el rango de 25 a 35° C; por lo tanto, se recomienda realizar al menos una medición diaria en el afluente y en el efluente de la laguna, utilizando un termómetro calibrado; los resultados deberán registrarse en la bitácora.

En las lagunas de estabilización la temperatura es el criterio de diseño más significativo, ya

que en climas fríos se requiere una mayor área para las lagunas que para climas cálidos. Una temperatura > 35° C genera el cambio del tipo de alga en las lagunas facultativas, por ejemplo, la proliferación de algas verdiazules que originan manchas superficiales y generan la disminución de la actividad de las algas verdes. Por otra parte, una temperatura < 4° C inhibe la actividad de algas y bacterias.

En el caso de que la temperatura tenga una disminución de 10° C, la actividad microbiológica se reducirá en aproximadamente 50 por ciento. En el caso de lagunas anaerobias, la temperatura durante la noche es casi siempre constante para todo el volumen de la laguna. En las lagunas de estabilización no existe una temperatura uniforme en toda la laguna, por lo que es conveniente referir el valor de la temperatura a la profundidad en la que se mide y determinar los perfiles de temperatura en diferentes puntos de la misma.

La producción óptima de oxígeno en algunas especies de algas en lagunas facultativas se generan entre 20 y 25° C (Rolim Mendoca, 2000). La nitrificación y digestión aerobia se detiene cuando la temperatura sube a 50° C y baja a 15 grados Celsius.

La temperatura del afluente (agua residual) puede ser usada para detectar infiltración y afluencia de algunos desechos industriales. Un incremento súbito de temperatura puede indicar la presencia de aguas residuales industriales. Por otra parte, el afluente puede enfriarse rápidamente a finales del otoño y principios del invierno.

La temperatura puede ser utilizada para predecir la eficiencia de tratamiento y el modo de operación (paralelo o en serie) y estimar el TRH

necesario. Cuando la temperatura del agua entrante se enfría, un sistema de laguna facultativa puede necesitar cambiar de operación de serie a paralelo para reducir la carga orgánica de cada laguna (EPA, 2011).

La medición de la temperatura se realiza en el sitio, con un termómetro de mercurio (con una escala de 0.1° C, calibrado en forma periódica). Los puntos de medición son la entrada y la salida de la laguna. En caso de tener lagunas en serie, debe medirse este parámetro entre las interconexiones de las lagunas, con un mínimo de frecuencia de medición diaria. Al mismo tiempo se recomienda medir la temperatura del aire en cada sitio de medición. Los datos obtenidos en las mediciones deberán ser anotados en la bitácora de operación de la planta de tratamiento.

En el caso de las lagunas anaerobias, se ha comprobado que la temperatura del agua durante

la noche es casi siempre constante para todo el volumen de la laguna, con una temperatura superficial levemente inferior a la medida de aquella que la laguna presenta en las horas en que la temperatura ambiente es más baja (ilustraciones 2.2 y 2.3). Por lo tanto, durante la noche, un flujo de calor se produce a partir de las capas inferiores, con temperaturas levemente mayores en la superficie. Como en una laguna de estabilización no existe temperatura uniforme, se torna más conveniente usar la expresión temperatura media de la laguna o temperatura superficial de la laguna, de acuerdo con el caso, a cambio de temperatura de la laguna (Escalante *et al.*, 2006).

La Ilustración 2.4 presenta la variación horaria de la temperatura en tres puntos de una laguna terciaria. Pueden observarse valores uniformes para los tres puntos. Por otro lado, se observa que las temperaturas máximas registradas se

Ilustración 2.2 Variación de la temperatura del agua en una laguna de estabilización

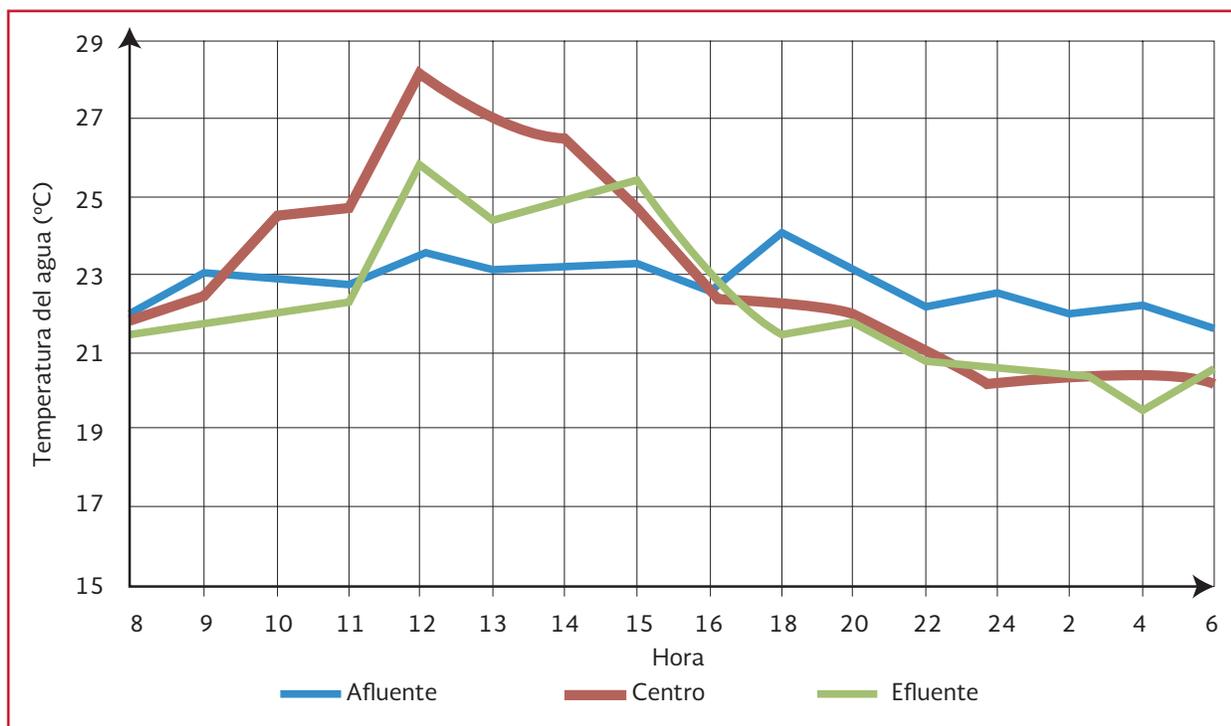


Ilustración 2.3 Variación de la temperatura ambiente en una laguna de estabilización primaria

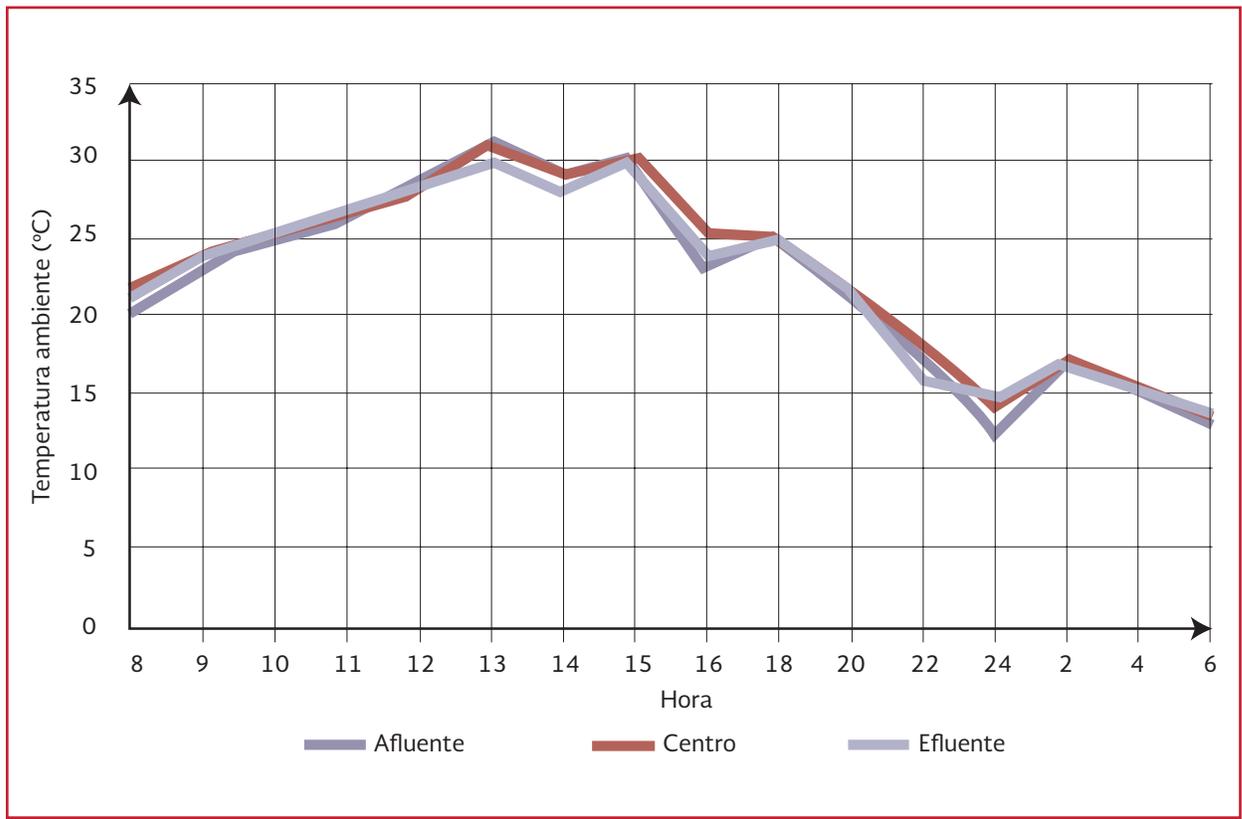


Ilustración 2.4 Variación de la temperatura del agua en una laguna de estabilización terciaria

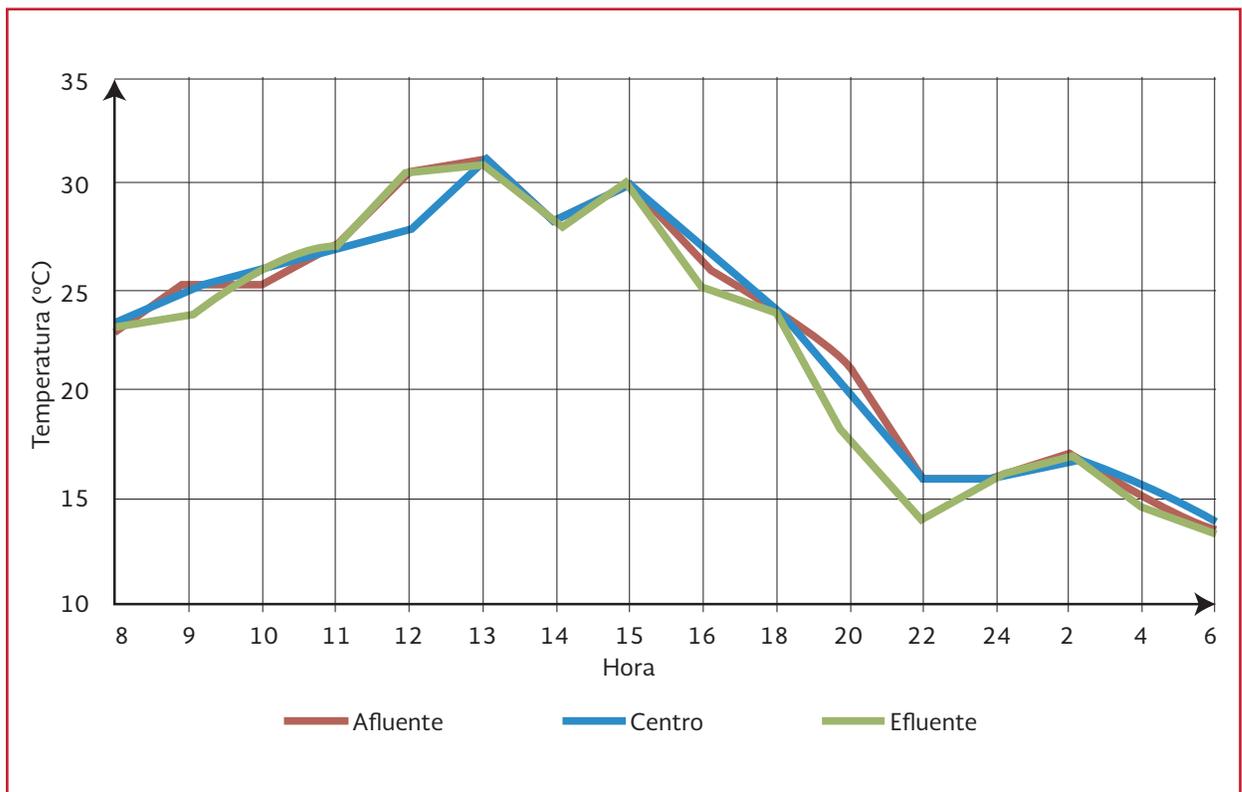
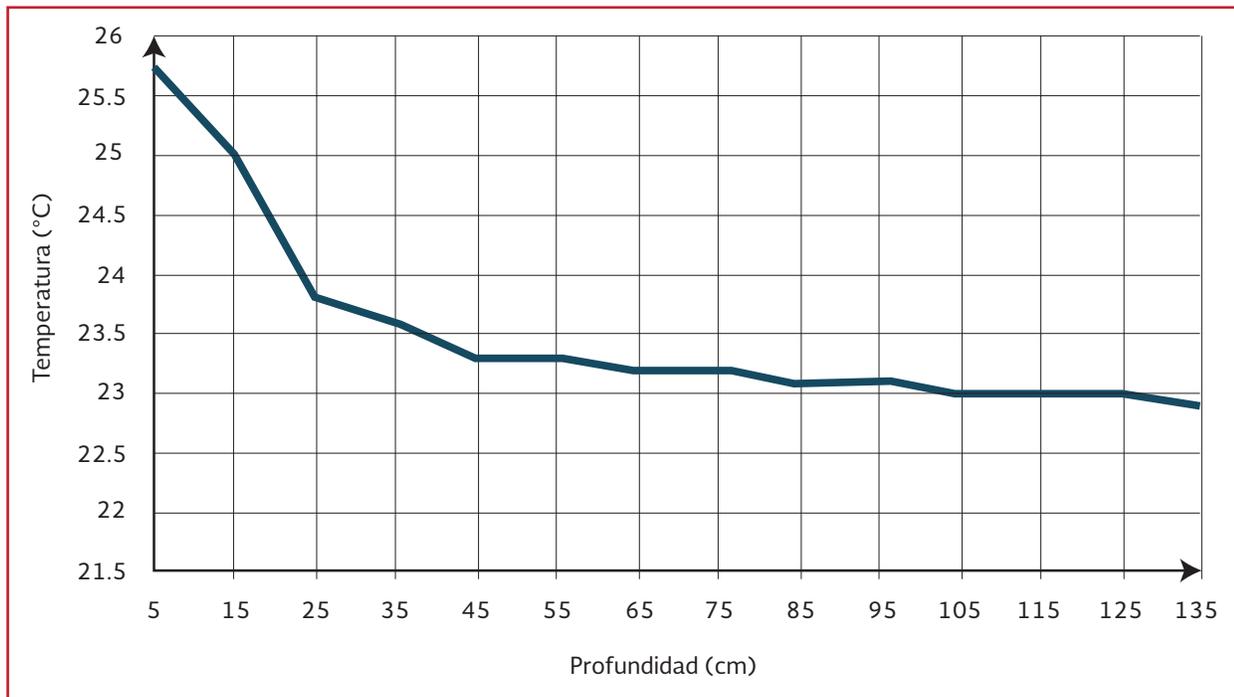


Ilustración 2.5 Perfil de temperatura en una laguna facultativa



presentaron entre las 12:00 y 15:00 horas y las mínimas a las 06:00 horas.

El perfil de temperatura del agua en una laguna se presenta en la Ilustración 2.5, en donde puede observarse una disminución de dos grados centígrados a los 25 centímetros de profundidad.

#### 2.1.4. POTENCIAL DE HIDRÓGENO

El rango de Potencial de hidrógeno (pH) de las aguas residuales municipales es de 6.8 a 7.5 (EPA, 2011), dependiendo de la alcalinidad y dureza del agua. El pH es un buen indicador de la salud del sistema lagunar. Las lagunas que contienen una coloración verde oscura generalmente presentan un alto número de algas verdes y un correspondiente alto Potencial de hidrógeno. Las lagunas que presentan un color negro a gris y tienen una disminución de pH (< 6.8) pueden estar sépticas o avanzar hacia un estado séptico.

El pH en los sistemas lagunares es indicativo del tipo de laguna. En las lagunas anaerobias debe presentarse en el rango de 6.5 a 7.5; en las lagunas facultativas en la capa aerobia debe estar entre 8 a 10 y en el fondo de la laguna en el rango de 6.5 a 7.5. Las lagunas de maduración que son aerobias presentan pH entre 8 a 10. Es conveniente observar el comportamiento del pH en las lagunas, midiendo este parámetro a diferentes profundidades (obtención del perfil de pH) y en al menos tres puntos de la laguna (afluente, centro y efluente de la laguna).

Durante el día, en las horas de la máxima actividad fotosintética, el pH puede llegar ser alrededor de 9 o más (Sperling Von, 2007).

La Ilustración 2.6 muestra la variación horaria del pH en tres puntos de una laguna de estabilización primaria, en donde pueden observarse valores semejantes en los puntos del centro y el efluente; los valores menores de pH se presentaron entre las

02:00 y las 04:00 horas; el rango medido esta entre 7 y 9.1 de Potencial de hidrógeno.

Como una labor rutinaria, el pH deberá medirse en el afluente y en el efluente de cada laguna de forma diaria. Para la medición deberá utilizarse un potenciómetro, el cual deberá calibrarse antes de su uso. Las mediciones realizadas deberán ser registradas en una bitácora. En caso de presentar valores de pH fuera del rango normal de operación (dependiendo del tipo de laguna), deberá consultarse el capítulo 4 de este libro.

La variación horaria de pH en una laguna de estabilización terciaria, se presenta en la Ilustración 2.7, donde puede observarse que la variación en el rango de pH es de entre 8 a 10 unidades para esta laguna.

### 2.1.5. CONDUCTIVIDAD

La conductividad es una medida de la habilidad de una solución acuosa para transmitir carga eléctrica. Esta habilidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, así como de valencia y la temperatura en la que se realiza su medición. Es una medida indirecta de la concentración de sales inorgánicas disueltas. Su variación en un tratamiento biológico debe ser muy pequeña. Debe medirse en el sitio del muestreo, en el afluente y en el efluente de la laguna de forma diaria; para la medición deberá utilizarse un conductímetro, calibrado antes de su uso. Las mediciones realizadas deberán ser registradas en una bitácora.

La variación de la conductividad en una laguna de estabilización primaria se presenta en la Ilustración 2.8, observándose una gran variación en

el afluente a la laguna primaria (registrándose valores más altos durante las horas del día (13 horas); valores semejantes se registraron para los puntos del centro y efluente de la laguna, con una desviación baja.

La variación horaria de la conductividad en tres puntos en una laguna de estabilización terciaria, se presenta en la Ilustración 2.9, donde pueden observarse valores semejantes para tres puntos (afluente, centro y efluente) de la laguna. La conductividad varió en un rango de entre 800 a 1 000  $\mu\text{S}/\text{centímetros}$ .

La conductividad es una medida de la salinidad del agua y es una consideración vital en la reutilización de dicho recurso. En el tratamiento del agua por lagunas de estabilización no decrece la salinidad, sin embargo, la evaporación excesiva puede incrementarla (Shilton, 2005).

### 2.1.6. OXÍGENO DISUELTO

Las lagunas facultativas presentan concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 6 mg/L, principalmente durante la fase de radiación solar y en la capa aerobia; durante la noche la concentración de oxígeno disminuye. Las lagunas de maduración también presentan concentraciones mayores de 6 mg/L durante el día y contenido de oxígeno disuelto en su profundidad.

El oxígeno disuelto debe medirse al menos una vez al día durante el primer turno de operación (turno matutino), como una labor rutinaria en afluente y efluente de cada laguna, en forma diaria. Para su obtención deberá utilizarse un medidor de oxígeno disuelto, que deberá haber sido calibrado antes de su uso. Las mediciones reali-

Ilustración 2.6 Variación del pH en una laguna de estabilización primaria

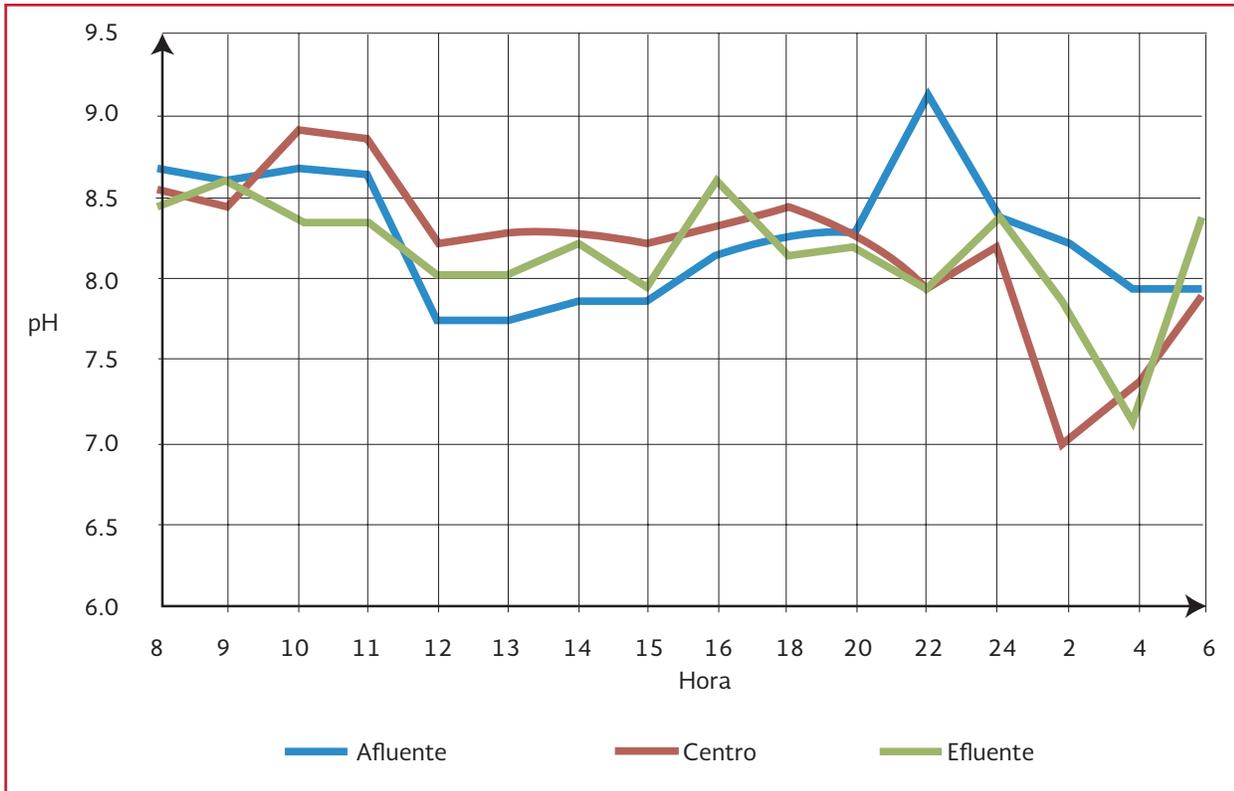


Ilustración 2.7 Variación de pH en una laguna de estabilización terciaria

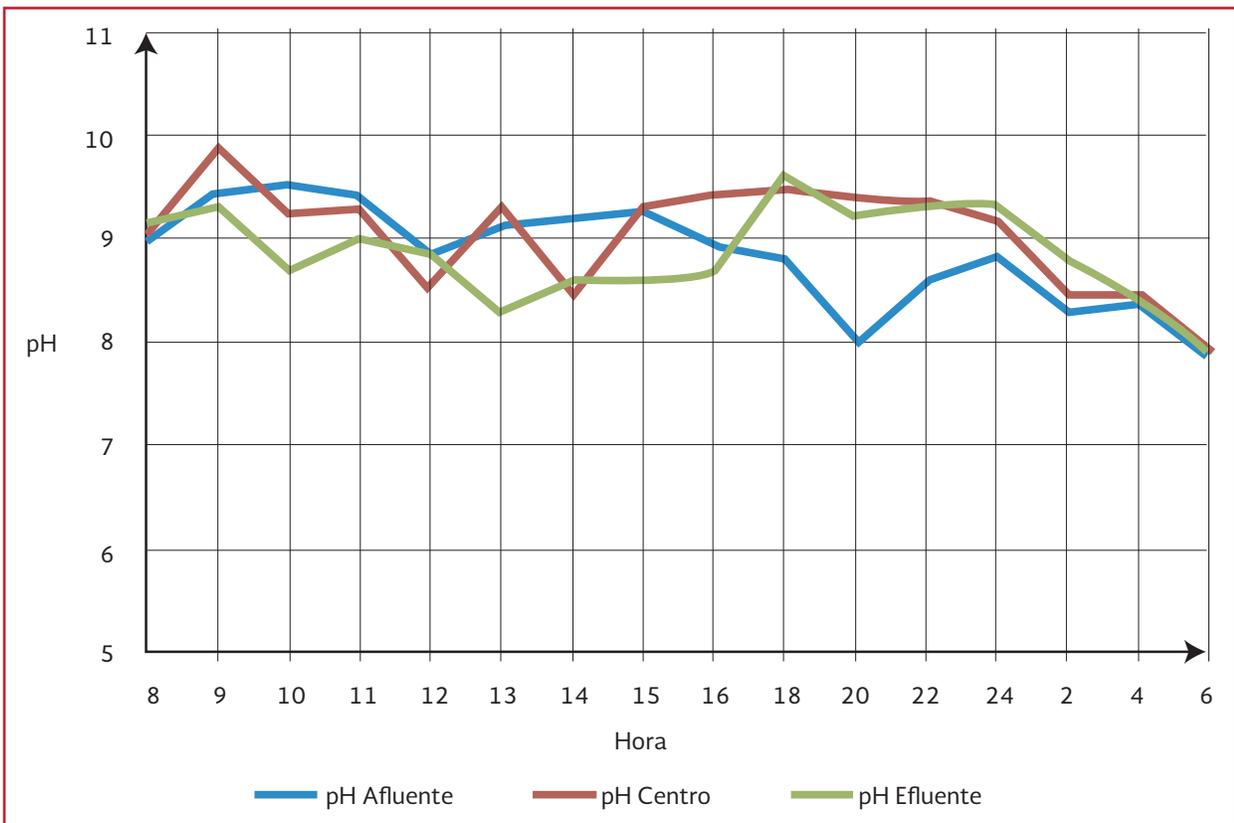


Ilustración 2.8 Variación de la conductividad en una laguna de estabilización primaria

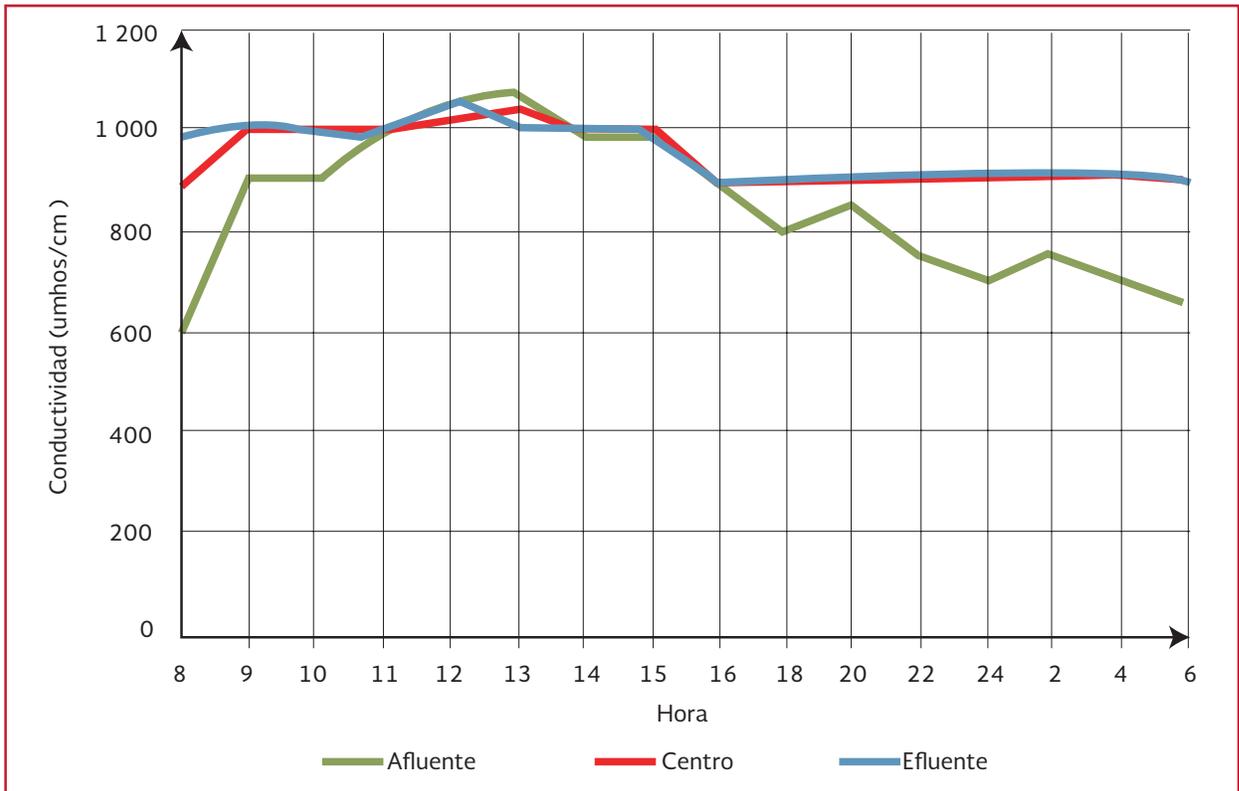


Ilustración 2.9 Variación de la conductividad en una laguna de estabilización terciaria

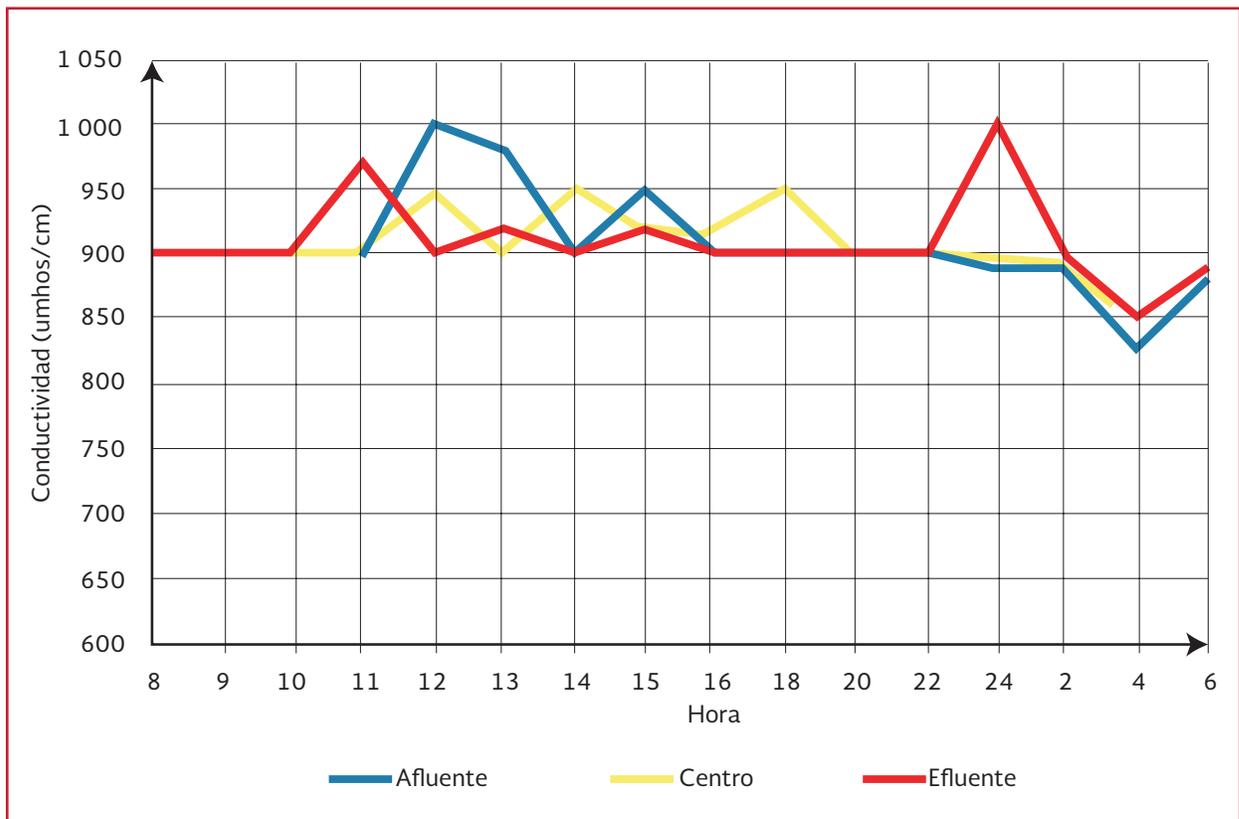
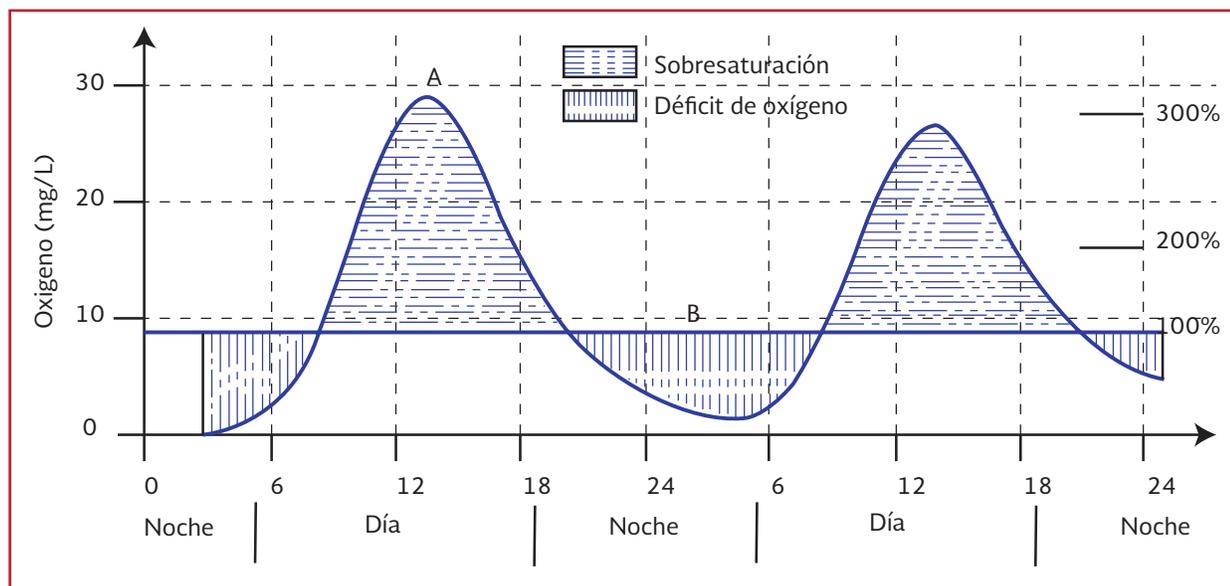


Ilustración 2.10 Concentración de oxígeno disuelto en una laguna



zadas deberán ser registradas en una bitácora. En caso de presentar valores fuera del rango normal de operación (dependiendo del tipo de laguna), deberá consultarse el capítulo 4 de este libro.

En la Ilustración 2.10 pueden observarse lecturas de  $O_2$  más bajas justo antes de la salida del sol, debido al consumo de oxígeno disuelto durante la noche por parte de las bacterias y algas. Ya con la presencia de luz del día, los niveles de oxígeno disuelto más altos pueden observarse por la tarde ( $\approx 14:00$  horas) debido a la fotosíntesis de las algas, lo que puede convertirse en una condición sobresaturada de oxígeno en la tarde.

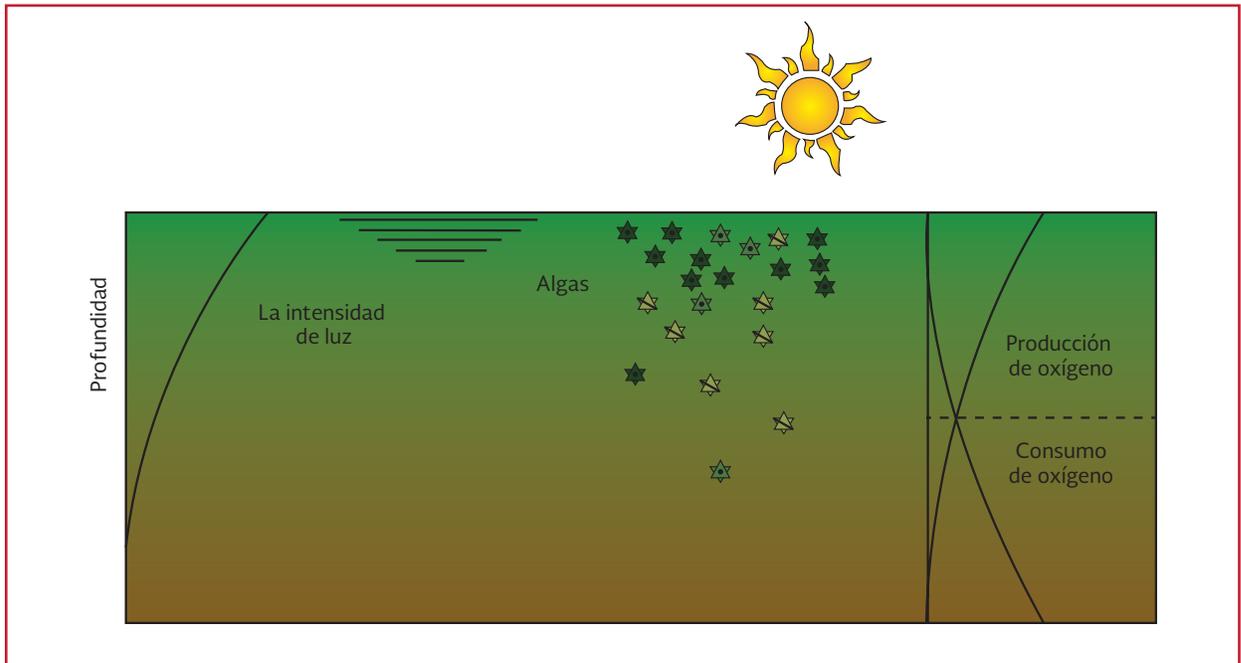
Durante el día, debido a la intensidad de energía de la luz, la mayoría de las algas se encuentran cerca de la superficie del estanque, una zona de alta producción de oxígeno. Con la profundidad de la laguna, la energía de la luz disminuye, no tanto la reducción de la concentración de algas. El rango de mayor intensidad de luz se presenta en la capa superficial de la laguna ( $< 50$  cm), el resto de la profundidad de la laguna estará prácticamente oscuro.

Hay un punto en la profundidad de la laguna en el que la producción y el consumo de oxígeno es igual, a este punto se le llama oxipausa (ver Ilustración 2.11). Por encima de la oxipausa predominan las condiciones aerobias, mientras que por debajo de ella predominan las condiciones anóxicas o anaerobias. El nivel de la oxipausa varía durante las 24 horas del día, como una función de la variabilidad de la fotosíntesis durante este periodo. Por la noche, el nivel de la oxipausa se eleva en el estanque, mientras que durante el día disminuye.

La Ilustración 2.12 presenta la variación horaria de oxígeno disuelto en tres puntos de una laguna de estabilización terciaria, en donde pueden observarse concentraciones de oxígeno disuelto por encima de 2 mg/L entre las 08:00 y las 16:00 horas, disminuyendo el oxígeno disuelto entre las 18:00 y las 06:00 horas.

En las lagunas facultativas y de maduración es conveniente realizar la medición de oxígeno disuelto a diferentes profundidades y realizar un perfil de su comportamiento, para definir la

Ilustración 2.11 Algas, intensidad de luz y oxígeno disuelto como una función de la profundidad de la laguna



capa aerobia de la laguna. La Ilustración 2.13 presenta un perfil de oxígeno disuelto en un punto de una laguna terciaria; puede observarse la capa aerobia en los primeros 25 cm de profundidad.

El oxígeno disuelto es requerido para la respiración de microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida aerobia. La toma de muestras debe realizarse con mucho cuidado.

Ilustración 2.12 Variación horaria de oxígeno disuelto en una laguna de estabilización terciaria

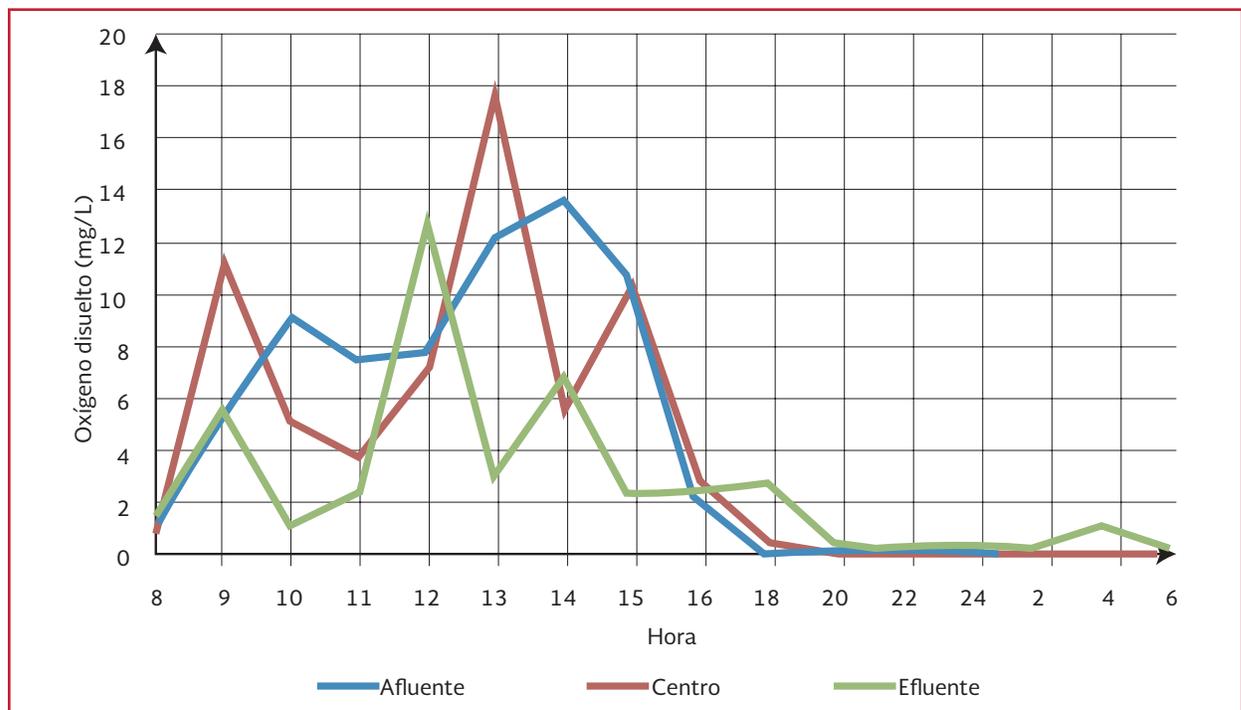


Ilustración 2.13 Perfil de oxígeno disuelto en un punto cercano a la estructura de salida de una laguna facultativa

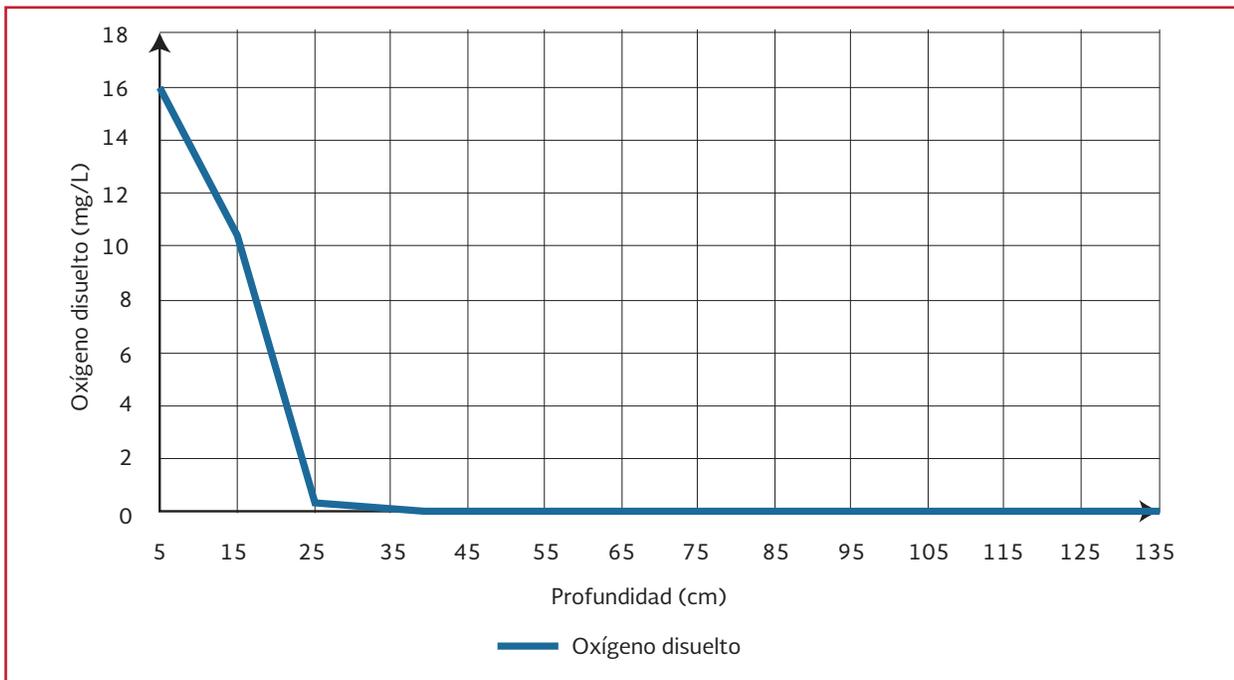
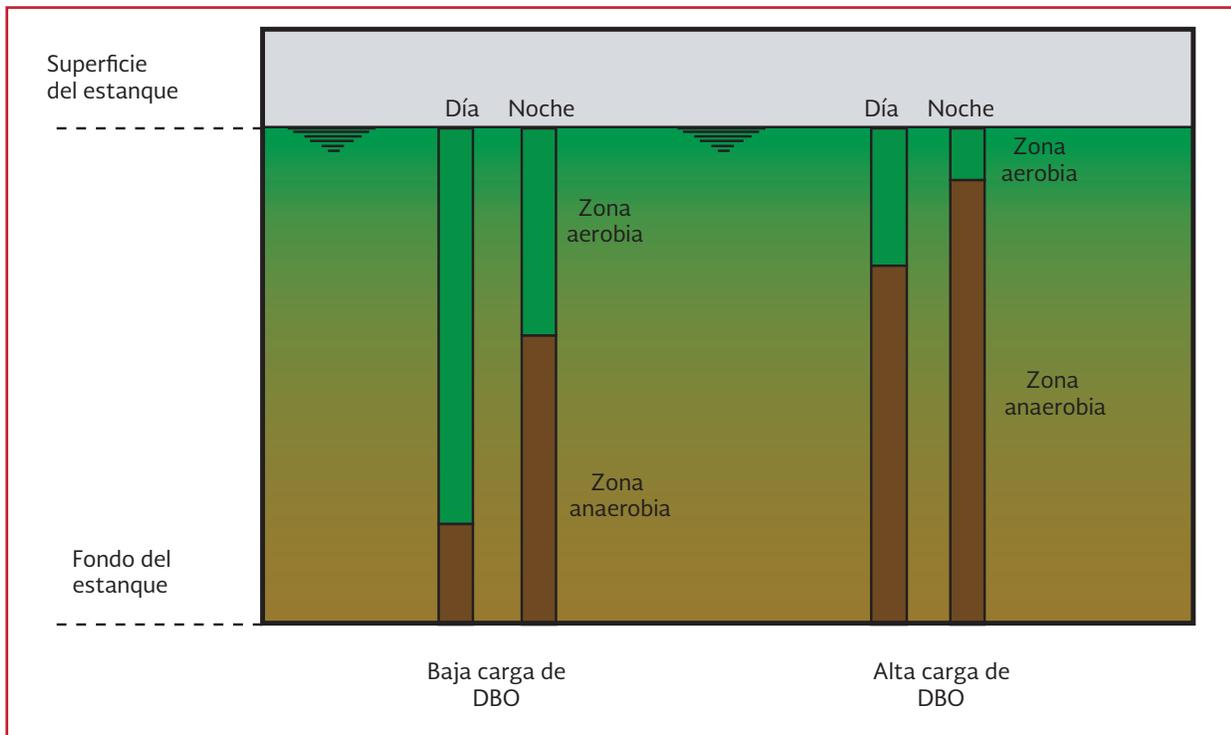


Ilustración 2.14 Influencia de la carga orgánica aplicada a la laguna y la hora del día sobre el espesor de las capas aerobias y anaerobias



Cuando no se cuenta con un equipo de medición de oxígeno disuelto, puede tomarse la muestra de agua en frascos para DBO de boca chica de 300 mL con tapón esmerilado de vidrio; no debe contener burbujas de aire.

La determinación de oxígeno disuelto debe ser en forma inmediata. El espesor de la zona aerobia, además de la variación a lo largo del día, también varía con las condiciones de carga del estanque. Estanques con una mayor carga de DBO tenderán a tener una capa anaerobia más grande, que prácticamente puede tomar toda la profundidad del estanque durante la noche. La Ilustración 2.14 presenta un esquema de la influencia de las condiciones de carga sobre el espesor de la capa aerobia.

#### 2.1.7. POTENCIAL DE ÓXIDO-REDUCCIÓN

El potencial de óxido-reducción (redox) permite observar de manera indirecta hacia dónde se desplaza el equilibrio en las reacciones de óxido-reducción que suceden en los cuerpos de agua o reactores biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales. La oxidación es la pérdida de electrones y la reducción es la ganancia de electrones.

Valores positivos (200 mV) de redox muestran una oxidación de materia orgánica a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en un medio aerobio (lagunas aerobias); y valores negativos (-300 mV) son originados por su reducción en un ambiente anóxico (-520 a -530 mV) o anaerobio (lagunas anaerobias).

Los residuos carbonosos serán la fuente más importante de electrones en un sistema de

lagunas y el oxígeno, cuando está presente, sería el aceptor más importante de electrones.

Una medición redox representa el potencial de un sistema para donar electrones y es expresada como volts o como el logaritmo negativo de la capacidad de electrones. En la práctica la medición del potencial de redox es ampliamente considerado como difícil y poco fiable, por lo que rara vez se informa en la literatura de los sistemas lagunares (Shilton, 2005). Como regla general, ante cualquier pH dado, el potencial redox se determina por la disponibilidad y el tipo de aceptor de electrones. Así, donde el oxígeno es abundante, el potencial redox es alto. Dado que las reacciones redox consumen o generan protones, el pH también afecta el potencial redox (Shilton, 2005).

#### 2.1.8. CLOROFILA

Las algas tienen la habilidad de producir oxígeno a través del mecanismo de la fotosíntesis. Para que se realice este fenómeno se requiere de luz solar, agua, nutrientes y bióxido de carbono. Al consumir este último compuesto, se incrementa la alcalinidad del agua, lo que favorece la mortandad de bacterias en las lagunas facultativas y de maduración.

La concentración de algas en una laguna facultativa y de maduración depende de la carga orgánica y de la temperatura. En estas lagunas el rango de concentración de clorofila "a" se encuentra entre 500 a 2 000  $\mu\text{g/L}$ . Para su determinación se requiere la implementación de la técnica de la PTAR en el laboratorio, por un técnico capacitado en el muestreo y análisis del parámetro. En caso de no contar con laboratorio ni personal técnico capacitado para el muestreo

y el análisis del parámetro, este puede solicitarse a un laboratorio externo acreditado en el muestreo y análisis de clorofila “a”.

En las lagunas de maduración el crecimiento de algas es usualmente bajo y tiende a decrecer con el número de lagunas en serie.

Para la prevención y control de altas concentraciones de algas en el efluente de una laguna, se tienen las siguientes alternativas: colocar mamparas en la laguna, colocar una mampara antes del tubo de descarga o dar postratamiento al efluente para su remoción. Por ejemplo, filtros de roca, de arena, humedales, microtamices o flotación con aire disuelto. En el subcapítulo 4.5 se presenta la Tabla 4.5, que presenta los problemas por alta concentración de algas y sus posibles soluciones.

### 2.1.9. COLIFORMES FECALES

En las lagunas facultativas y de maduración, en condiciones óptimas de operación, se lleva a cabo la reducción de uno a dos ciclos logarítmicos. Debe tenerse el control de la operación, principalmente para no sobrecargar las lagunas, para ello es importante realizar la medición del gasto y de la concentración de la materia orgánica, medida como DBO, para poder comparar con los límites de la carga orgánica superficial de diseño de la laguna y realizar las actividades de operación y mantenimiento requeridas.

La determinación de coliformes fecales en agua es un parámetro de primordial importancia en la evaluación del funcionamiento de las lagunas de estabilización, ya que éstos indican el grado

de contaminación bacteriana que tiene un agua residual. Las muestras para el análisis bacteriológico deben tomarse en frascos o bolsas estériles. El análisis bacteriológico de la muestra debe practicarse inmediatamente después de su recolección, o no exceder las 24 horas; durante el periodo entre el muestreo y el análisis debe conservarse la muestra a 4° C, para inhibir la actividad bacteriana y no obtener resultados falsos ni dudosos (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1987).

En el subcapítulo 2.2, referente a la inspección, monitoreo y frecuencia de muestreo de los parámetros de seguimiento en la operación de un sistema lagunar, se presentan de la Tabla 2.4 a la Tabla 2.6, donde se indica la frecuencia de muestreo de los parámetros a seguir, dependiendo del tipo de laguna.

En el caso de que un sistema lagunar haya sido diseñado para que su efluente cumpla con el criterio del parámetro de coliformes fecales indicado en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la concentración de coliformes fecales sea mayor al criterio, se recomienda realizar una evaluación del sistema lagunar para determinar la causa, con un monitoreo intensivo que comprenda los siete días de la semana (Tabla 2.4 a Tabla 2.6, en donde se indican los parámetros a analizar de acuerdo con el tipo de laguna del sistema), revisando los parámetros de diseño del sistema lagunar (por ejemplo, caudal de diseño, cargas orgánicas volumétricas y superficiales según corresponda al tipo de laguna), realizar una batimetría (determinación del volumen de lodo acumulado en las lagunas) para determinar el volumen útil de la laguna y realizar el cálculo del tiempo de residencia hidráulico para cada laguna.

### 2.1.10. VIENTO

El viento favorece el mezclado en una laguna de estabilización. Debe ser tomado en cuenta para la ubicación de la laguna. “La energía del viento disipada en mezcla es función de la extensión superficial de la laguna; por ello las lagunas de mayor área tienden a tener un mejor mezclado que las laguna de menor área” (Romero Rojas, 1999). La ausencia de mezclado en una laguna puede ocasionar la sedimentación de las algas.

Siempre que sea posible, las lagunas deben construirse en lugares donde la acción de los vientos

dominantes no esté en dirección de las viviendas. Las lagunas anaerobias, las cuales pueden expedir malos olores, como medida de precaución, deben construirse por lo menos a 500 o 1 000 m de la comunidad. (Rolim Mendoca, 2000).

El mezclado es importante para mantener las condiciones aerobias en la laguna y provee el intercambio de nutrientes y gases entre fotótrofos y heterótrofos (Ilustración 2.15). Este intercambio es impedido cuando la laguna se convierte a estratificada. Este fenómeno ocurre bajo condiciones de calor en ausencia de circulación

Ilustración 2.15 Microbiología de la laguna facultativa

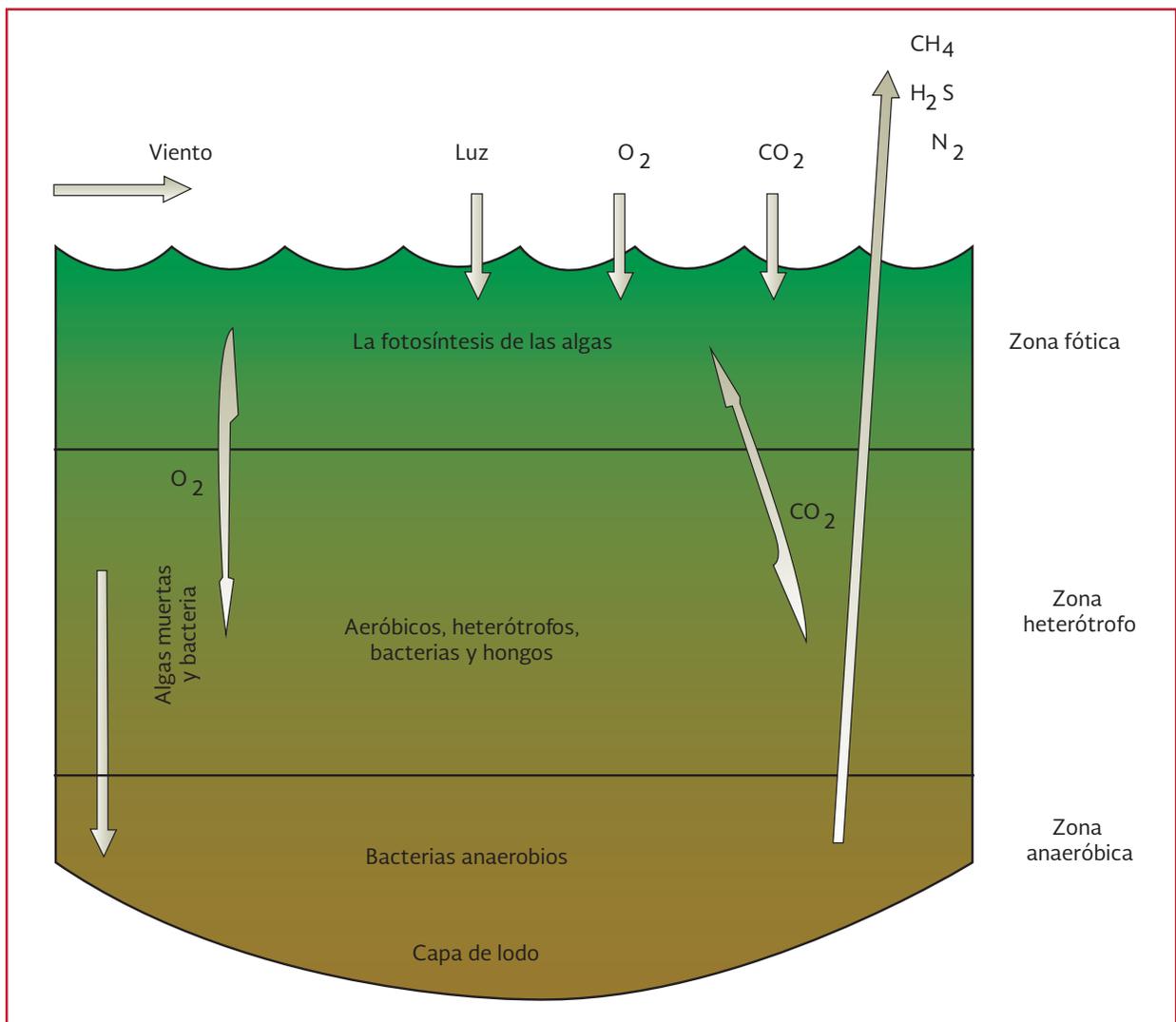
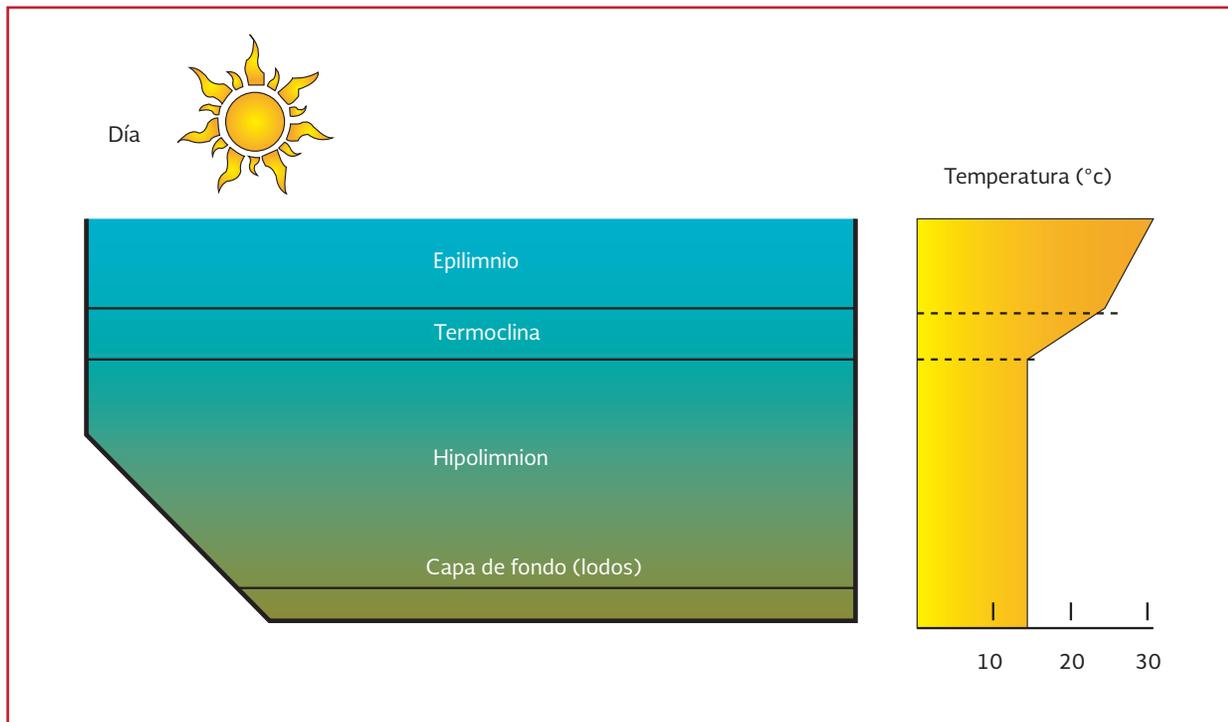


Ilustración 2.16 Estratificación en lagunas de oxidación



natural. La estratificación sucede debido al establecimiento de una diferencia de temperatura entre la capa caliente superior (o epilimnion) y la capa inferior y más fría, llamada hipolimnion. La zona entre el epilimnion y el hipolimnion es llamada la termoclina, y se caracteriza por una fuerte disminución de la temperatura (Ilustración 2.16).

### 2.1.11. RADIACIÓN SOLAR

Las lagunas facultativas y de maduración dependen de la radiación solar, la que depende de la ubicación del sitio (latitud) y de condiciones ambientales como la nubosidad, que en alguna medida reducen la luz disponible.

La energía solar contribuye a la producción de oxígeno a través de la fotosíntesis, ya que la energía utilizada por las algas proviene de

la parte visible del espectro de radiación solar (que varía con la latitud), particularmente entre longitudes de onda de 4 000 a 7 000 angstroms (Rolim Mendoca, 2000). De 2 a 7 por ciento de la radiación visible es utilizada por las algas, que para acelerar la fotosíntesis no necesitan de una exposición continua a la energía solar. La nubosidad reduce la disponibilidad de luz en alguna medida.

### 2.1.12. EVAPORACIÓN

La evaporación determina la reducción del gasto del efluente y en casos extremos puede ocasionar que el efluente sea nulo (Rolim Mendoca, 2000).

El balance hídrico está dado por la ecuación:

$$Q_e = Q_i + (P_r + P_c) - (EP_e) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

- $Q_e$  = Gasto en el efluente  
 $Q$  = Gasto, en  $m^3/d$   
  
 $Q_i$  = Gasto en el afluente  
 $P_r$  = Precipitación que cae sobre la laguna  
 $P_c$  = Infiltración del agua subterránea en la laguna (ocurre cuando el nivel freático está por encima del fondo de la laguna)  
 $E$  = Evaporación  
 $P_e$  = Pérdidas por infiltración (ocurre cuando el nivel freático está por debajo del fondo de la laguna y no hay impermeabilización alguna del mismo)

La evaporación es una pérdida de agua que provoca una mayor concentración de sustancias contaminantes, aumentando la salinidad del medio. Un sustrato concentrado por encima del valor determinado puede dar como resultado salinidad perjudicial para el equilibrio osmótico en las paredes celulares de los microorganismos y, en consecuencia, para el equilibrio biológico. La evaporación está íntimamente ligada a las condiciones climáticas locales, dependiendo principalmente de los vientos, del grado de humedad del aire y de la temperatura del aire y del agua.

### 2.1.13. PRECIPITACIÓN

Las precipitaciones medias y altas pueden ocasionar la reducción del tiempo de residencia hidráulica en una laguna y la disminución de la concentración de bacterias y algas que realizan el proceso, ocasionando una baja en la eficiencia de remoción esperada.

Una consecuencia de las precipitaciones pluviales es el aumento repentino del gasto, lo cual podrá acarrear hacia el efluente grandes cantidades de sólidos y un arrastre significativo de la población de algas y de materiales inorgánicos, principalmente arcilla. Para minimizar estos problemas, las lagunas deben estar provistas de una caja de alimentación, con rebose lateral, para desviar hacia el cuerpo receptor las contribuciones que excedan la capacidad de tratamiento de la instalación. Para contener inundaciones, las lagunas deben estar dotadas de zanjas desviadoras de aguas de lluvia, que deberán mantenerse limpias y conservadas (Rolim Mendoca, 2000).

### 2.1.14. TOXICIDAD

Metales pesados, pesticidas, desinfectantes, sulfitos y desechos industriales pueden causar una desestabilización en los procesos, por lo que en aguas residuales que contengan dichos tóxicos

Tabla 2.1 Factores ambientales para la fermentación del metano

Variable	Optima	Extrema
Temperatura, °C	30-35	25-40
pH	6.8-7.4	6.2-7.8
Potencial de óxido-reducción, mV	-520-530	-490-550
Ácidos volátiles, mg/L como ácido acético	50-500	> 500
Alcalinidad, $mgL^{-1}$ como $CaCO_3$	2 000-3 000	1 000-5 000

deberá realizarse algún pretratamiento, antes de ser descargadas en el sistema lagunar.

El material tóxico, aunque sea en pequeñas concentraciones, puede inactivar la población microbiana, disminuyendo la eficiencia del tratamiento del proceso. Por ello, es necesario identificar el origen de las fuentes y realizar un estudio particular del caso.

Yáñez Cossío (1992) menciona: “Las descargas de aguas residuales industriales pueden afectar los procesos de tratamiento, su control está fuera del alcance de un manual preliminar de operación y mantenimiento”.

Este aspecto deberá ser seguido con base en mediciones horarias del pH y observaciones visuales de color y apariencia del desecho crudo (Yáñez Cossío, 1992).

## 2.1.15. INDICADORES DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA LAGUNA

### 2.1.15.1. Anaerobia

Se considera buen funcionamiento de una laguna anaerobia, si en el estanque se observa generación de biogás y una coloración gris; el efluente de esta laguna debe presentar una coloración café oscuro o gris. En la Tabla 2.2 se presentan

factores ambientales para la fermentación del metano.

### 2.1.15.2. Facultativa

El efluente de una laguna facultativa deberá presentar una coloración verde oscuro brillante y no deberá detectarse ningún olor, para considerarse en buen funcionamiento. La Ilustración 2.17 muestra la coloración del efluente de la laguna, además, puede observarse el deterioro de la estructura y el crecimiento de vegetación.

Ilustración 2.17 Muestra del color verde en el efluente de una laguna facultativa



Tabla 2.2 Parámetros de control en las lagunas de estabilización (rango normal)

Parámetro	Anaerobia	Facultativa	Maduración
Color	Café	Verde oscuro	Verde claro
Olor	Sí	No	No
pH	6.5-7.5	8-9	8-9
Temperatura del agua	20-25° C	20-25° C	20-25° C
Temperatura ambiente	18-35° C	18-35° C	18-35° C
Oxígeno disuelto	0	> 6 mg/L	6-35 mg/L

Ilustración 2.18 Coloración verde del efluente de una laguna



#### 2.1.15.3. Maduración

El efluente de una laguna de maduración deberá presentar una coloración verde, un pH alcalino (mayor a 8) y no se deberá detectar olor. La Ilustración 2.18 muestra la coloración verde del efluente de una laguna de estabilización.

Los principales parámetros de control que deben determinarse se indican en la Tabla 2.3 y son parámetros de control en lagunas de estabilización (rango normal), con una frecuencia diaria.

#### 2.1.16. PROFUNDIDAD DE LODO EN UNA LAGUNA

Para estimar la profundidad y calcular el volumen de lodos en una laguna de estabilización, se requiere de la medición anual de la profundidad de lodos. Para ello se lleva a cabo el siguiente procedimiento: se coloca una tira de toalla blanca en un extremo de una varilla (distancia de acuerdo con la profundidad de la laguna en la que se realice la prueba) y se fija; en seguida se introduce perpendicularmente la varilla en el

agua hasta alcanzar el fondo de la laguna, se deja la varilla de 3 a 5 minutos para permitir que el lodo se marque en la toalla blanca y puedan distinguirse las diferentes capas que se forman en ella. Después de este tiempo se retira la varilla y se mide la longitud de cada capa formada y se anota en la hoja de registro.

La medición debe realizarse como mínimo en cinco puntos distribuidos en la laguna: uno en el centro, dos cercanos a la entrada y dos a la salida de la laguna. Es recomendable realizar una batimetría. Para esta prueba también puede utilizarse una varilla pintada de blanco. La Ilustración 2.19 presenta un esquema de la ubicación de puntos de medición de lodos en una laguna de estabilización. La Ilustración 2.20 muestra la marca de la profundidad de lodos en una varilla.

Aunque la acumulación de lodos no ha sido notable en lagunas aerobias o facultativas que no reciben grandes cargas orgánicas, los depósitos de lodos se han encontrado en las proximidades de la estructura de entrada. Los lodos acumulados alrededor de la entrada de la laguna pueden ser impulsados a la superficie por los gases que se forman por la descomposición anaerobia de los sólidos. Estas masas flotantes pueden ser movidas hacia las esquinas de la laguna.

## 2.2. INSPECCIÓN, MONITOREO Y FRECUENCIA DE MUESTREO

El programa y la frecuencia de muestreo dependen del tipo de laguna que se esté evaluando.

Ilustración 2.19 Medición de la profundidad de lodos en una laguna de estabilización

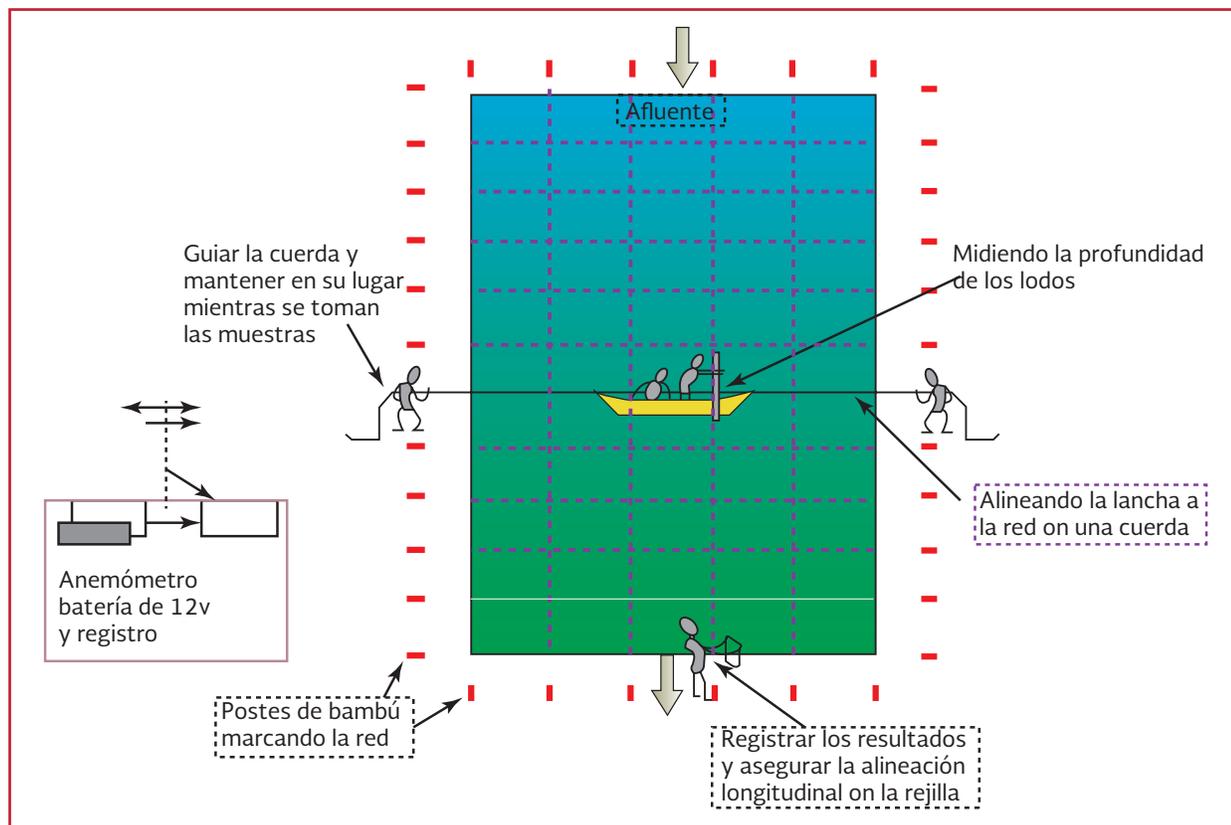


Ilustración 2.20 Varilla que muestra la profundidad de lodo en una laguna



do. Para cada laguna deberá tomarse muestra en el afluente, en el efluente y en el cuerpo de agua. Los programas de muestreo y su frecuencia se presentan de la Tabla 2.4 a la Tabla 2.6. La Tabla 2.7 presenta el rango normal de los parámetros de operación en lagunas de estabilización. Con respecto a la metodología de muestreo y análisis de parámetros, deberán seguirse las especificaciones dadas por las normas oficiales mexicanas y los métodos estándares cuando en las normas no se indique. Para la medición y toma de muestras en el proceso se requiere personal capacitado, una lancha y equipo de seguridad para el muestreo. La Ilustración 2.21 presenta los puntos de muestreo de un sistema lagunar conformado por tres lagunas en serie.

### 2.3. ACTIVIDADES RUTINARIAS

En las lagunas de estabilización deben realizarse operaciones más sencillas que en otros tipos de procesos biológicos.

Debe evitarse el desarrollo de plantas que puedan perforar los taludes que fueron impermeabilizados con una lámina de plástico recubierta con una capa de tierra. Los taludes de tierra también pueden resultar dañados por animales que construyen sus madrigueras en ellos y por la escorrentía. El operador debe inspeccionar los taludes para detectar señales de erosión, desarrollo de grietas y agujeros causados por animales (Rolim Mendoca, 2000).

Ilustración 2.21 Puntos de muestreo en un sistema lagunar

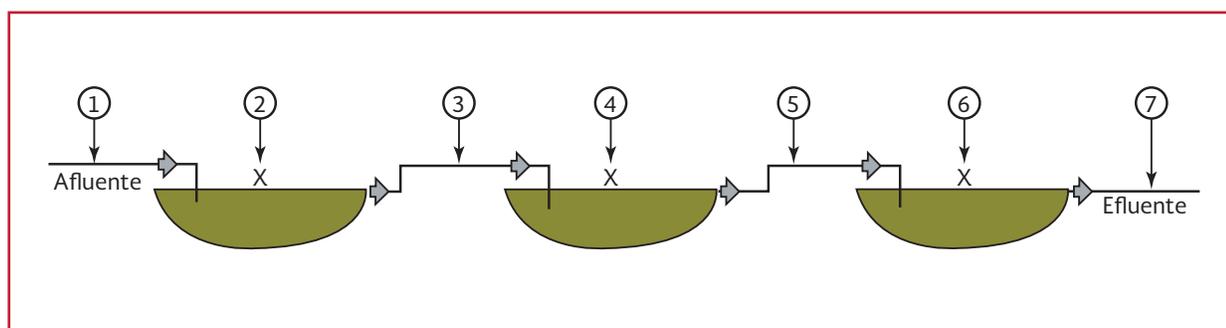


Tabla 2.3 Programa de muestreo de una laguna anaerobia

Parámetro	Sitio de muestreo	Tipo de muestra	Frecuencia
Medición de gasto	A, E	in situ	Diaria
Color	A,E, P	in situ	Diaria
Olor	A,E, P	in situ	Diaria
Materia flotante	A,E, P	in situ	Diaria
pH	A, E,	simple	Diaria
Temperatura del agua	A, E	simple	Diaria
Temperatura del ambiente	A, E	simple	Diaria
Conductividad eléctrica	A, E	simple	Diaria
Alcalinidad total	A, E	simple	1/semana
Demanda bioquímica de oxígeno total y soluble	A, E	Simple (6)	1/semana
Demanda química de oxígeno total y soluble	A, E	compuesta	1/semana
Sólidos sedimentables	A, E	compuesta	1/semana
SST	A, E	compuesta	1/semana
SSV	A, E	compuesta	1/semana
N-NH <sub>3</sub>	A, E	compuesta	1/mes
S y sulfatos	A, E	compuesta	1/mes
N-total	A, E	compuesta	1/mes
P-total	A, E	compuesta	1/mes
Huevos de helminto	A, E	simple	2/mes
Coliformes fecales	A, E	Simple (6)	1/semana
Profundidad de lodos	P	in situ	1/ mes

A= afluente a la laguna E= efluente de la laguna P=proceso

Las actividades rutinarias son (Rolim Mendoca, 2000; Escalante et al., 2006; Yáñez Cossío, 1992):

- Inspeccionar los taludes para detectar señales de erosión, desarrollo de grietas y agujeros causados por animales
- En el caso de que la laguna esté impermeabilizada con geomembranas, ins-

peccionar el sellado de las uniones de las mismas

- Limpieza periódica de las obras de llegada, canales de acceso, pretratamiento (rejillas y desarenador), estructuras de entrada, de interconexión y salida de las lagunas, para remover las películas biológicas formadas en las paredes

Tabla 2.4 Programa de muestreo en laguna facultativa

Parámetro	Sitio de muestreo	Tipo de muestra	Frecuencia
Medición de gasto	A, E	in situ	Diaria
Color	A, E, P	in situ	Diaria
Olor	A, E, P	in situ	Diaria
Materia flotante	A, E, P	in situ	Diaria
pH	A, E	in situ, simple	Diaria
Temperatura del agua	E	in situ, simple	Diaria
Temperatura del ambiente	Proceso	in situ, simple	Diaria
Oxígeno disuelto	A, E	in situ, simple	Diaria
Perfiles de oxígeno disuelto	Proceso	in situ, simple	1/mes
Perfiles de temperatura	Proceso	in situ, simple	1/mes
Demanda bioquímica de oxígeno	A, E	Simple (6)	1/semana
Demanda química de oxígeno	A, E	compuesta	1/semana
SST	A, E	compuesta	1/semana
SSV	A, E	compuesta	1/semana
Sólidos sedimentables	A, E	compuesta	1/semana
Clorofila "a"	A, Proceso, E	compuesta	1/mes
NTK y N-NH <sub>3</sub>	A, E	compuesta	1/mes
P-total	A, E	compuesta	1/mes
Coliformes fecales	A, E	Simple (6)	1/semana
Huevos de helminto	A, E	simple	2/mes
Profundidad de lodos	Proceso	in situ	1/cada 3 meses

A= afluente a la laguna E= efluente de la laguna P=proceso

Tabla 2.5 Programa de muestreo en laguna de maduración

Parámetro	Sitio de muestreo	Tipo de muestra	Frecuencia
Medición de gasto	A, E	in situ	Diaria
pH	A, E	simple	Diaria
Temperatura del agua	A, E	simple	Diaria
Temperatura del ambiente	P	in situ	Diaria
Color	A, E, P	in situ	Diaria
Olor	A, E, P	in situ	Diaria
Materia flotante	E	simple	Diaria
Oxígeno disuelto	A, E, P	simple	Diaria
Perfiles de oxígeno disuelto	P	in situ	1/mes
Perfiles de temperatura	P	in situ	1/mes
Demanda bioquímica de oxígeno total y soluble	A, E	compuesta	1/semana
Demanda química de oxígeno total y soluble	A, E	compuesta	1/semana
Sólidos sedimentables	A, E	compuesta	1/semana
SST y SSV	A, E	compuesta	1/semana
Clorofila "a"	A, P, E	simple	1/semana
NTK y N-NH <sub>3</sub>	A, E	compuesta	1/mes
P-total	A, E	compuesta	1/mes
Coliformes fecales	A, E	Simple (6)	1/semana
Huevos de helminto	A, E	simple	2/mes
Profundidad de lodos	P	in situ	1/cada 3 meses

A= afluente a la laguna E= efluente de la laguna P=proceso

Tabla 2.6 Rango normal de los parámetros de operación de lagunas

Parámetro físico	Rango Normal	Valores extremos	Significado
Temperatura	20-25°C	Mínimo 1° C Máximo 3° C	Inactivación del proceso Mortandad de algas
pH	Anaerobia 6.5-7.5 Facultativa 8-9	Mínimo 6.5 > 9.5	Condiciones anaerobias Se puede incrementar carga
Oxígeno disuelto	Anaerobia 0 mg/L Facultativa 6-35 mg/L	0 mg/L 35 mg/L	Condiciones anaerobias Sobresaturación
Conductividad eléctrica	400 $\mu\text{hoscm}^{-1}$	1 200 $\mu\text{hoscm}^{-1}$	Alta salinidad Reúso restringido
Sólidos suspendidos volátiles	40-120 mg/L	>200 mg/L	Presencia alta de algas
Nitrógeno amoniacal	0.05-30 mg/L	-----	Valores mayores al rango indican mortandad de algas
Nitrógeno total	0.05-40 mg/L	<0.05 mg/L Máximo > 40 mg/L	Puede provocar falta de algas y zooplancton Puede provocar nitrificación del efluente
Fosfato total	3-15 mg/L	Mínimo < 1 mg/L Máximo > 30 mg/L	Permanencia de algas filamentosas escasas de fotosíntesis Laguna que se acolmata rápido
Clorofila a	500-2000 $\mu\text{g/L}$	-----	Valor nulo significa condiciones anaerobias, Valores grandes, condiciones aerobias

- Limpieza de natas, vegetación y material flotante de las lagunas; limpieza de material vegetal en los diques
- Riego de la grama sembrada en los taludes y poda de la misma
- Limpieza de los sedimentos y material de acarreo en las cunetas de coronación y canal de desvío
- Medición del gasto en entrada y salida de cada laguna de estabilización; verificación y control de los niveles de las lagunas
- Disposición de los residuos sólidos removidos
- Registros de indicadores visuales (olor, color, materia flotante, espumas, estado de los taludes, aspecto general de la

planta de tratamiento, entre otros)

- Registro del número de operadores y el tiempo en que se realizan las operaciones

Shilton (2005) y Lloyd (2005) mencionan qué cantidad de personal se recomienda para las lagunas de estabilización. Fueron definidos por Arthur (1983) de acuerdo con la población, y por lo tanto, el tamaño y la complejidad de la planta. La Tabla 2.7 presenta una relación del personal requerido de acuerdo con la población atendida por el sistema lagunar.

En Lloyd (2006) se menciona la importancia del personal adecuado para la rutina de operación y mantenimiento. El número de personal depende de los siguientes aspectos:

- Tipo de obras de entrada (por ejemplo, el equipo mecanizado requiere de un técnico electromecánico)
- Las instalaciones con laboratorio requieren de un técnico
- Para mantenimiento, el corte de césped manual requiere de más de personal

La Tabla 2.8 presenta la descripción de la ropa de protección para el personal de operación y mantenimiento. También se menciona que se

requiere de un almacén apropiado para guardar la ropa en un sitio de la oficina (Lloyd, Andreas & Kandiah, 2006).

La Tabla 2.9 presenta el equipo mínimo requerido para la realización de mediciones de campo. Cabe mencionar que los equipos deberán ser calibrados antes de realizar las mediciones, y el personal debe estar capacitado en el muestreo y medición de los parámetros a realizar.

Tabla 2.7 Personal para los sistemas de lagunas de estabilización

Población atendida	10 000	25 000	50 000	100 000	250 000
Jefe/supervisor	-	-	1	1	1
Ingeniero mecánico	-	-	-	1	1
Técnico de laboratorio	-	1	1	1	2
Asistente del jefe	-	1	2	2	2
Trabajadores	1	2	4	6	10
Chofer	-	1	1	1	2
Vigilante	1	1	2	3	5
Total	2	6	11	15	23

Tabla 2.8 Ropa de protección para el personal de operación y mantenimiento en lagunas de estabilización

Ropa de trabajo	Overol	Impermeable
Botas de trabajo (con casquillo)	Botas de goma	-
Guantes de protección	Guantes de goma	-
Sombrero duro	Gafas de protección plásticas	Máscara de la nariz y la boca

Tabla 2.9 Equipo de medición de parámetros de campo

Parámetro de medición	Equipo
pH	Potenciómetro
Conductividad y sólidos disueltos totales	Conductímetro
Oxígeno disuelto	Medidor de oxígeno disuelto
Temperatura	Termómetro



# 3

## MANTENIMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

### 3.1. MANTENIMIENTO DE TALUDES, CAMINOS Y CERCAS

Los taludes de los sistemas lagunares son los elementos más sensibles al deterioro. Los cuidados que requieran dependen del material del que están conformados. Las lagunas pueden estar o no impermeabilizadas, dependiendo del terreno en el que hayan sido construidas.

En lagunas impermeabilizadas con malla de polietileno resistentes a la intemperie, se requiere de la inspección de la cubierta impermeable de los taludes interiores para detectar posibles deterioros y rupturas.

Se recomienda:

- Rellenar las grietas con tierra y/o arcilla y en seguida igualar el terreno y compactarlo
- Eliminar las malezas que crecen en los taludes, en especial las plantas acuáticas
- Mantener una distancia mínima de 30 cm entre el nivel máximo de agua en las lagunas y las plantas cultivadas en los taludes interiores, en el caso de que existan; las gramíneas deben mantenerse cortadas

- Si existen zonas arborizadas en las proximidades de la laguna, hay que impedir el desarrollo de árboles hasta por lo menos a 150 m de la laguna y nunca deben cultivarse setos alrededor de éstas (Rolim Mendoca, 2000)
- Mantenimiento de los diques para minimizar el efecto erosivo de las aguas de lluvias, como curado de grietas y de la capa de la rodadura
- Mantenimiento de las instalaciones asociadas a la planta, como edificaciones, caminos de acceso, mallas, etcétera

La Ilustración 3.1 muestra los bordos de una laguna en buen estado. La Ilustración 3.2 presenta una imagen con falta de mantenimiento en el bordo, debido a la presencia de grava y material de construcción suelto sobre la geomembrana.

La Ilustración 3.3 presenta el crecimiento de vegetación cerca de los bordos de la laguna, que debe ser retirado para evitar que se dañe la geomembrana.

La Ilustración 3.4 presenta una vista de la entrada a una laguna de maduración, en donde se observa la necesidad de mantenimiento en los caminos de acceso, en las rejillas. Por otra parte, se observa que el tubo de entrada del afluente a

Ilustración 3.1 Vista de los bordes de dos lagunas



la laguna se encuentra cercana a la superficie. Para profundizar se recomienda revisar el libro *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: lagunas de estabilización*.

### 3.2. RETIRO DE LODOS EN LAGUNAS ANAEROBIAS Y FACULTATIVAS

En Rolim Mendoca (2000) se menciona que la acumulación del lodos en algunas lagunas anaerobias en climas tropicales puede llevarse a cabo en un periodo entre 2 a 5 años; a una tasa de acumulación del lodo que varía de 0.03 a 0.04 m<sup>3</sup>/(hab año).

De acuerdo con IMTA (1994), en las lagunas anaerobias es necesario remover los lodos cuan-

do ocupen un tercio de su volumen. Por eso, para el cálculo del número de años para la estimación de la remoción de lodos se presenta la Ecuación 3.1, en la que la tasa de acumulación de lodos es de 0.04 m<sup>3</sup>/(hab año).

$$n = \frac{V}{3Ps} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

- $n$  = Periodo de limpieza, en años
- $V$  = Volumen de la laguna anaerobia, m<sup>3</sup>
- $s$  = Tasa de acumulación del lodo, m<sup>3</sup>/(hab año)
- $P$  = Población contribuyente, hab.

Ilustración 3.2 Bordo con falta de mantenimiento, se observa grava y material de construcción sobre la geomembrana



Ilustración 3.3 Vegetación cercana a la geomembrana



Ilustración 3.4 Vista de entrada a una laguna de maduración



Para el retiro del lodo por vía seca se hace pasar el efluente a una de las otras unidades y la limpieza puede efectuarse por vía seca. La capa líquida de la superficie de la laguna se elimina mediante bomba, y una vez que el lodo queda expuesto al aire, se deja secar por evaporación. La duración de este proceso dependerá de las condiciones climáticas y, por lo tanto, es recomendable efectuar esta operación durante el verano. Una vez que la capa de lodo se ha secado, se retira y se almacena (Rolim Mendoca, 2000).

La remoción de lodos por vía húmeda puede llevarse a cabo utilizando una bomba de lodos montada en una balsa. El lodo puede ser descargado dentro de una laguna de lodos adyacente o en contenedores que lo transporten a su disposición final (IMTA, 1994). El principal in-

conveniente de este método es la gran cantidad de lodos contenidos, que hay que sacar antes de que sea posible su utilización. Además, es necesaria la disponibilidad de grandes áreas para la construcción de lechos de secado de lodos. Rolim Mendoca (2000) menciona que este método se utiliza cuando no se dispone de ninguna otra unidad que reemplace a la laguna anaerobia durante la operación de limpieza, y que en estas condiciones, el retiro del lodo debe hacerse lo más rápido posible.

Respecto del retiro del lodo de las lagunas facultativas, la tasa de acumulación del lodo es prácticamente la misma adoptada para las lagunas anaerobias. Gloyna (1971) afirma que su variación está comprendida entre 0.03 y 0.05 m<sup>3</sup>/(hab año). La disminución de la profundi-

dad de las lagunas facultativas es de aproximadamente 30 cm cada 25 o 30 años.

La acumulación del lodo se debe a la materia orgánica digerida y a la arena que no es retirada por los desarenadores durante el pretratamiento preliminar. Según Arceivala (1981), la arena constituye aproximadamente 50 por ciento del lodo total que se acumula en las lagunas.

Cuando el sistema lagunar no cuenta con lagunas anaerobias, es decir, cuando la laguna facultativa funciona como primaria, se produce una acumulación del lodo más rápida en el fondo de ésta, si se compara con una laguna facultativa

secundaria. Puesto que el área de las lagunas facultativas es normalmente mucho mayor que el de las anaerobias, el retiro del lodo puede hacerse paralizando la laguna a limpiar, cuando se ha producido una acumulación de 50 a 100 cm de lodo. Se vacía el agua almacenada y el sedimento se deja secar por evaporación.

La mayor superficie de fondo desaconseja el uso de las técnicas de retiro de lodo por vía húmeda, ya comentadas para las lagunas anaerobias.

La Ilustración 3.5 muestra una laguna azolvada con crecimiento de vegetación en bordes y en la laguna, lo que requiere de mantenimiento.

Ilustración 3.5 Laguna azolvada, crecimiento de vegetación en bordes y dentro de la laguna



Tabla 3.1 Resumen de las principales actividades para el mantenimiento de los sistemas de Lagunas de estabilización de residuos

Ubicación	Actividad	Frecuencia
Obras de entrada	Pantallas de entrada: eliminación de sólidos	Diario
	Canales grano: eliminación de arenilla	Diario
	Transferencia de sólidos y arena a una zona designada de almacenamiento o eliminación	Diario
	Bombas: engrase/lubricación e inspección	Según sea necesario
	Mantenimiento de registros de bombeo	Diario
Lagunas	Mantener el flujo y la remoción de sólidos acumulados en las estructuras de entrada, salida, canales de conexión y desbordamiento de vertederos	Diario
	Eliminación y dispersión de la basura flotante	Según sea necesario
	Mantenimiento de los diques de la laguna por el corte de hierba y la reparación de los daños causados por animales excavadores y de la acción de las olas.	Inspección semanal
	Controlar la cría de insectos mediante la oscilación de los niveles de la laguna y la eliminación de macrófitas emergentes de las lagunas.	Según sea necesario
	Operación y engrase de válvulas para el drenaje de la laguna	Mensual
Sitio general	Limpieza y la seguridad de la planta	Semanal
	Inspección y reparación de la cerca perimetral, setos y caminos de acceso	Trimestral
	Pintura de estructuras corrosibles	Anual
	Mantenimiento de registros	Diario y semanal

# 4

## PROBLEMAS COMUNES Y ACCIONES CORRECTIVAS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

### 4.1. OLORES

La generación de olores en una laguna de estabilización puede deberse a una sobrecarga del sistema, la cual podría haberse generado por el incremento del gasto (mayor a la capacidad de diseño); por el incremento en la concentración de contaminantes del agua residual a tratar (por ejemplo, de la materia orgánica); por la presencia de descargas no contempladas en el diseño (por ejemplo, descargas de rastros, descargas de aguas residuales de la industria de alimentos o de agroquímicos, de granjas agrícolas o porcícolas, etcétera).

La formación de malos olores es más común durante el invierno que durante el verano, debido a que disminuye la velocidad del crecimiento bacteriano y consecuentemente disminuye la velocidad de los procesos de autopurificación. De aquí la necesidad de diseñar para el periodo más frío.

Aunque parezca extraño, se ha presentado el caso de insuficiencia de nutrientes en las aguas residuales, por lo que se ha requerido su introducción con el fin de complementar la dieta de los microorganismos, ya que de no ser así, éstos tampoco pueden desarrollarse de forma adecuada.

Los malos olores también pueden generarse por la presencia de microorganismos, como las algas verde-azules, que se acumulan en la superficie, en especial en alguna esquina, con lo que impiden la penetración de los rayos solares, afectando la fotosíntesis de las algas verdes productoras de oxígeno. Las algas verde-azules deben removerse tan pronto como se presenten.

La Ilustración 4.1 y la Ilustración 4.2 presentan lagunas anaerobias con crecimiento de vegetación.

#### 4.1.1. PROBLEMAS DE MALOS OLORES POR SOBRECARGA

Una laguna sobrecargada genera malos olores. La sobrecarga de una laguna puede ser ocasionada por varios factores: incremento del gasto de diseño, de la concentración de la materia orgánica (DBO) en el afluente o por acumulación de lodos sedimentables. Como consecuencia de lo anterior, se genera una reducción del volumen de la laguna y su tiempo de residencia hidráulica.

En un sistema lagunar, las estructuras de control deben permitir operar con diferentes niveles de

Ilustración 4.1 Laguna anaerobia con crecimiento de vegetación

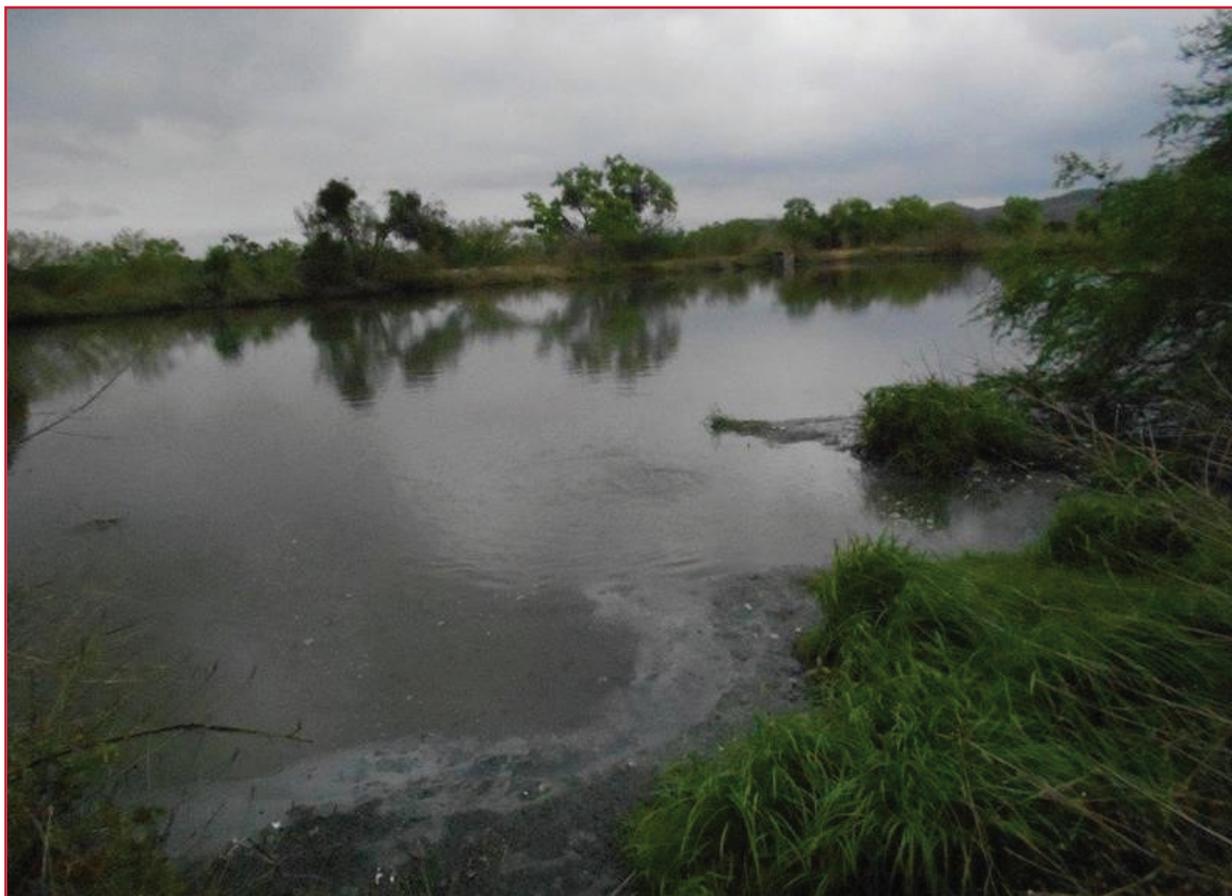


Ilustración 4.2 Laguna anaerobia con crecimiento de vegetación en bordos



agua, control de la velocidad de flujo, el cierre completo, drenaje completo y el cambio de dirección del flujo para permitir la operación en serie o en paralelo. La Ilustración 4.3 presenta diagramas de sistemas lagunares conformadas por dos y tres lagunas, que ofrecen alternativas en la distribución de gasto para ser operadas en serie o en paralelo. La Ilustración 4.4 muestra diagramas de flujo del agua residual para cuatro estanques de lagunas: operan en serie en el caso de operar con baja carga; operan dos lagunas en serie y en paralelo para una carga media; y operan tres lagunas en paralelo que descargan a una sola laguna en serie para las tres primeras.

#### 4.1.2. PROBLEMAS DE MALOS OLORES POR SUSTANCIAS TÓXICAS

Los malos olores también pueden formarse por la presencia de sustancias tóxicas, como metales pesados, pesticidas y solventes, que inhiben el desarrollo de los microorganismos. Deben identificarse las descargas que contienen dichos contaminantes y dárles un tratamiento específico (después de realizar un estudio), según sea el caso.

La sensibilidad de las algas y las bacterias a sustancias tóxicas presentes en el agua residual puede afectar el funcionamiento y la eficiencia de las lagunas. Las bacterias, sobre todo las metanogénicas, pueden ser inhibidas por algunos metales pesados, amoníaco y sulfuros. Las algas presentes en las lagunas de estabilización pueden también ser afectadas por el amoníaco, el cual inhibe la actividad fotosintética y reduce la producción de oxígeno (sobre todo a pH elevados de 8.5 o más). Los sulfuros pueden ser tó-

xicos a las algas, sobre todo a pH 7 (cuando la forma no ionizada del  $H_2S$  predomina).

#### 4.1.3. PROBLEMAS DE MALOS OLORES CAUSADOS POR CORTOCIRCUITOS

En las lagunas que presentan cortocircuitos en su funcionamiento, llegan a detectarse malos olores. En este caso deberá revisarse la ubicación de las estructuras de entrada y salida de las lagunas y el número de ellas. La Tabla 4.1 presenta causas, medidas de prevención y control de olores en lagunas de estabilización.

### 4.2. PROLIFERACIÓN DE INSECTOS

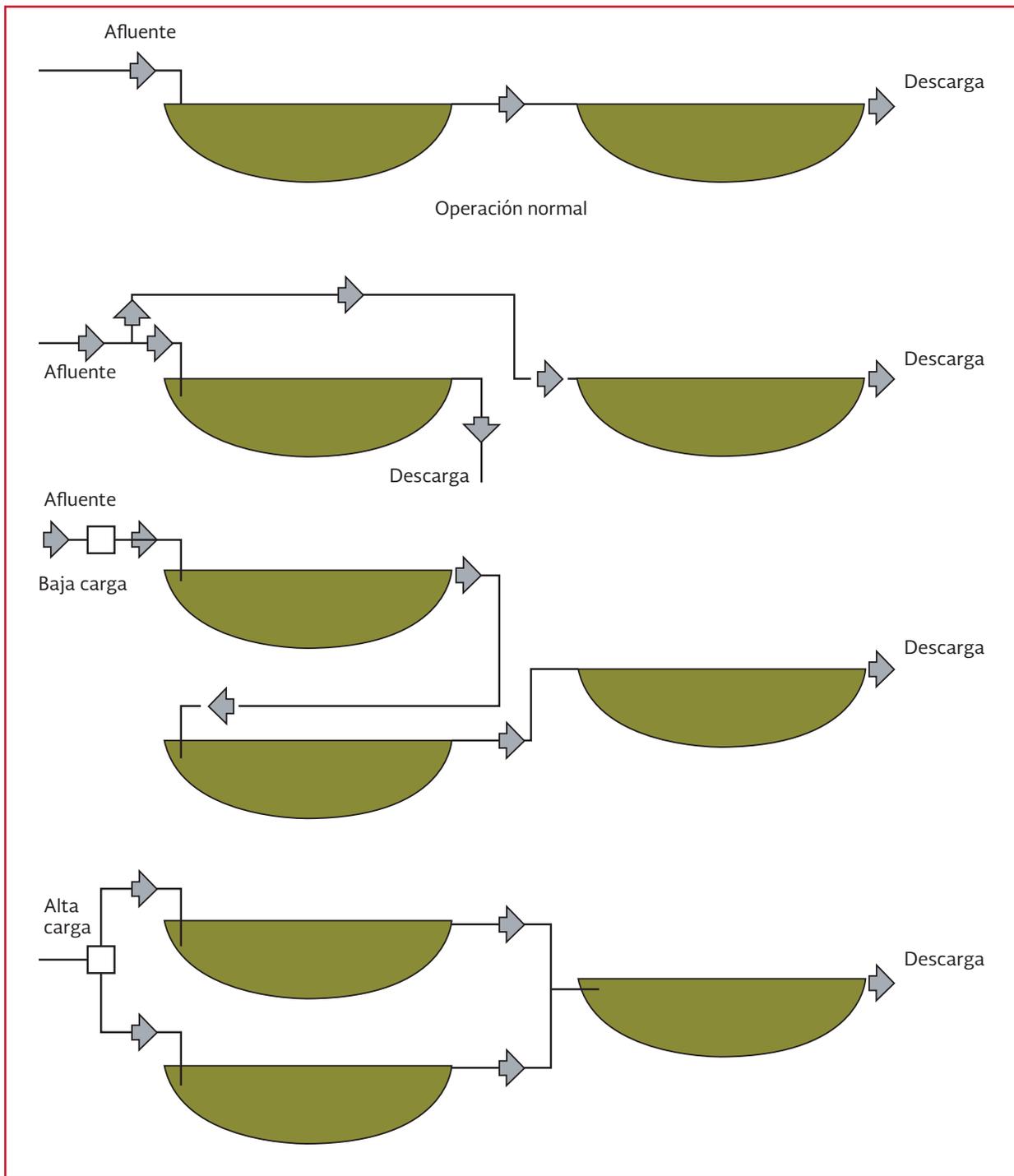
La proliferación de mosquitos, moscas y otros insectos no debe presentarse si no existe materia flotante y orgánica, por lo que pueden controlarse con la limpieza de la vegetación y de desechos orgánicos en las orillas de las lagunas. En caso de que los mosquitos depositen sus huevos en la orilla, encima del revestimiento, puede bajarse el nivel del agua un poco para que sequen.

La Tabla 4.2 presenta problemas de proliferación de insectos y sus posibles soluciones.

### 4.3. CRECIMIENTO DE VEGETACIÓN

La vegetación que llegara a crecer en los taludes o bordes de la laguna, como la maleza, debe retirarse y debe mantenerse limpia el área. Esto evitará la presencia de roedores

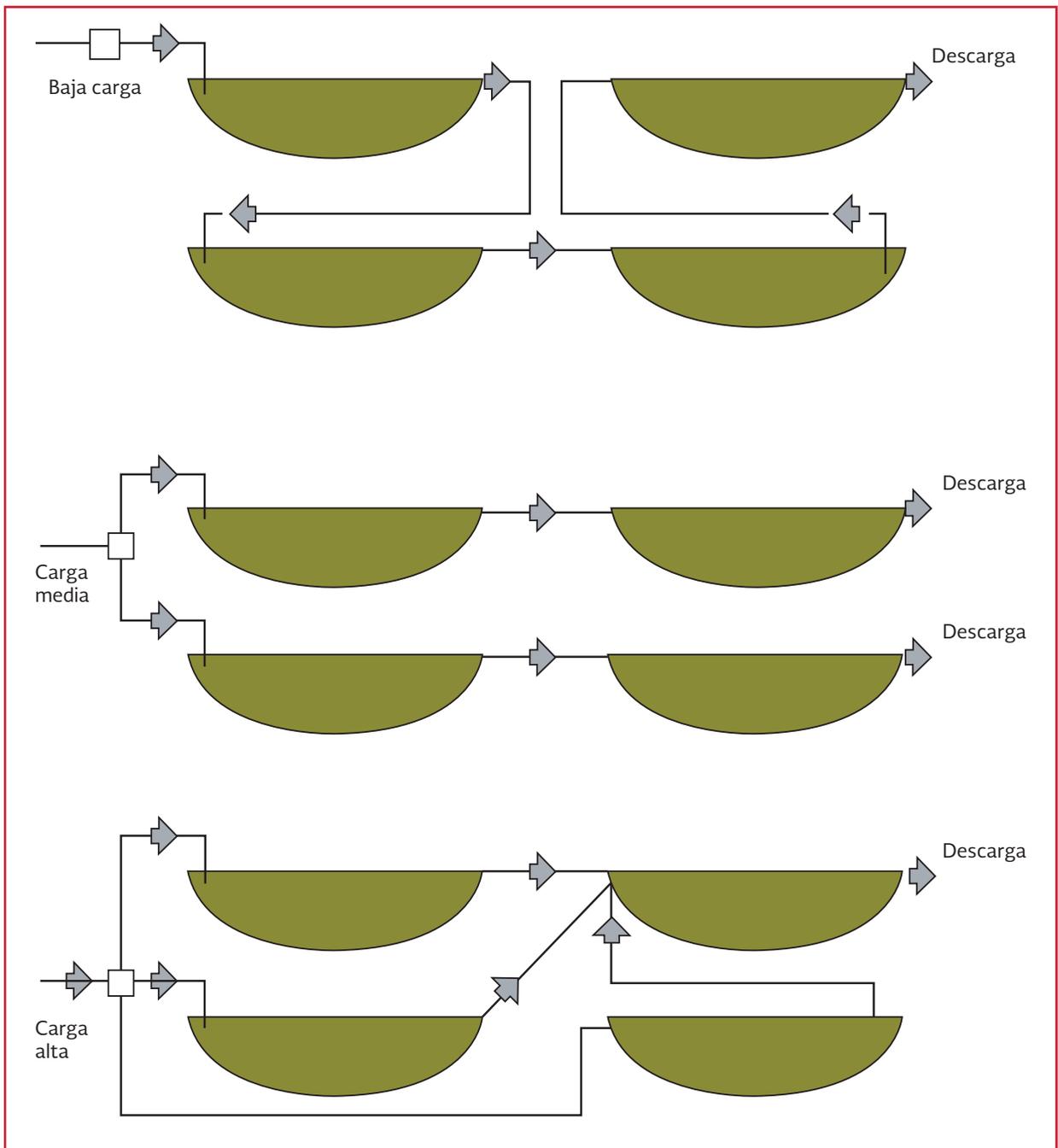
Ilustración 4.3 Flujo del agua residual para dos y tres estanques de lagunas



y otros animales que proliferan en presencia de maleza. La vegetación dentro de la laguna debe ser removida, debido a que bloquea la penetración de la luz solar en las lagunas facultativas y de maduración.

La Tabla 4.3 presenta problemas de crecimiento de vegetación en las lagunas y sus posibles soluciones. En la Ilustración 4.5 puede observarse el crecimiento de vegetación y de algas en una laguna de estabilización.

Ilustración 4.4 Flujo del agua residual para cuatro estanques de lagunas



La Ilustración 4.6 muestra una laguna de estabilización con mamparas y crecimiento de vegetación en las mamparas.

La Ilustración 4.7 presenta una laguna facultativa con crecimiento de vegetación.

Tabla 4.1 Problemas de malos olores en lagunas de estabilización y posibles soluciones

Problema	Causas	Medidas de prevención y control
Malos olores en lagunas anaerobias	Sobrecarga de aguas residuales y corto tiempo de residencia hidráulico. Muy baja carga y un tiempo de residencia hidráulico excesivamente alto (la laguna se comporta como facultativa, con la presencia de OD en el líquido)	Recircular el efluente de la laguna facultativa o de maduración a la entrada de la laguna anaerobia (relación de recirculación de aproximadamente 1/6). Mejorar la distribución del afluente a la laguna (distribución por tubos perforados por la parte inferior de la laguna) En caso de sobrecarga, aplicar ocasionalmente by-pass a la laguna facultativa (si soporta el incremento de la carga) En caso de largos tiempos de residencia, operar con sólo una laguna anaerobia (si hay dos o más lagunas en paralelo)
Malos olores causados por sobrecarga en las lagunas facultativas	Sobrecarga de agua residual, causando disminución del pH, cambios en el color del efluente de verde a verde amarillento (predominancia de rotíferos y crustáceos), aparición de zonas grises cerca del afluente y malos olores	Cambiar la operación de las lagunas de serie a paralelo Retirando temporalmente la laguna problemática de su funcionamiento (siempre que haya al menos dos lagunas en paralelo) Recircular el efluente en una proporción de 1/6 Considerar la adopción de múltiples entradas, para evitar rutas preferenciales En caso de constantes sobrecargas, considerar la inclusión de aireadores en la laguna
Malos olores causados por malas condiciones atmosféricas en las lagunas facultativas	Periodos largos con clima nublado y bajas temperaturas	Reducir la profundidad del agua Poner en operación una laguna en paralelo Instalar aireadores de superficie cerca de la entrada.
Malos olores causados por sustancias tóxicas en las lagunas facultativas	Sustancias tóxicas de descargas industriales, que generan condiciones anaerobias repentinas en la laguna	Realizar un análisis fisicoquímico completo del afluente, para identificar los posibles compuestos tóxicos Identificar, en el área de la zona de captación, la industria que causa la descarga, tomando las medidas provistas por la legislación Aislar la laguna afectada Colocar una segunda unidad en operación en paralelo, previsto con aireación, si es posible
Malos olores causados por cortocircuitos hidráulicos en las lagunas facultativas	Mala distribución del afluente Zonas muertas que resultan de la excesiva utilización de los contornos cuando dan forma a la laguna Presencia de vegetación acuática en la laguna	Colectar muestras en varios puntos de la laguna (v.g. OD) para verificar si hay diferencias significativas de una laguna a otra En caso de haber múltiples entradas, proporcionar una distribución uniforme del gasto del afluente en todas las entradas En caso de una entrada sencilla, construir nuevas entradas Cortar y remover la vegetación acuática En caso de zonas muertas, introducir aireación para causar un pequeño mezclado
Malos olores causados por masas de algas flotantes	Excesiva floración de algas, que impide la penetración de luz solar y causa problemas asociados con la mortalidad de la población excesiva	Chorro de agua con manguera Destrucción por rastrillo Remoción por tamices

Tabla 4.2 Problemas de proliferación de insectos de las lagunas y sus posibles soluciones

Problema	Causas	Medidas de prevención y control
Proliferación de insectos	Material cribado o arena no eliminados adecuadamente Crecimiento de la vegetación donde el nivel del agua está en contacto con la pendiente interna Capa de nata y aceite siempre presentes Mantenimiento escaso	Manejo adecuado del material removido de los tamices y desarenadores Cortar la vegetación Revolver, con un rastrillo o chorro de agua, la capa de material flotante que cubre las lagunas
Proliferación de insectos	Presencia de vegetación en la pendiente interna de la laguna que está en contacto con el nivel del agua	Reducir el nivel del agua Operar la laguna con variación en el nivel del agua Proteger la pendiente interna con placas de concreto, geomembranas, etcétera Destruir la nata

Ilustración 4.5 Crecimiento de vegetación y de algas en una laguna de estabilización



Ilustración 4.6 Laguna facultativa con mamparas y crecimiento de vegetación en la mamparas



Tabla 4.3 Problemas de crecimiento de la vegetación en las lagunas y sus posibles soluciones

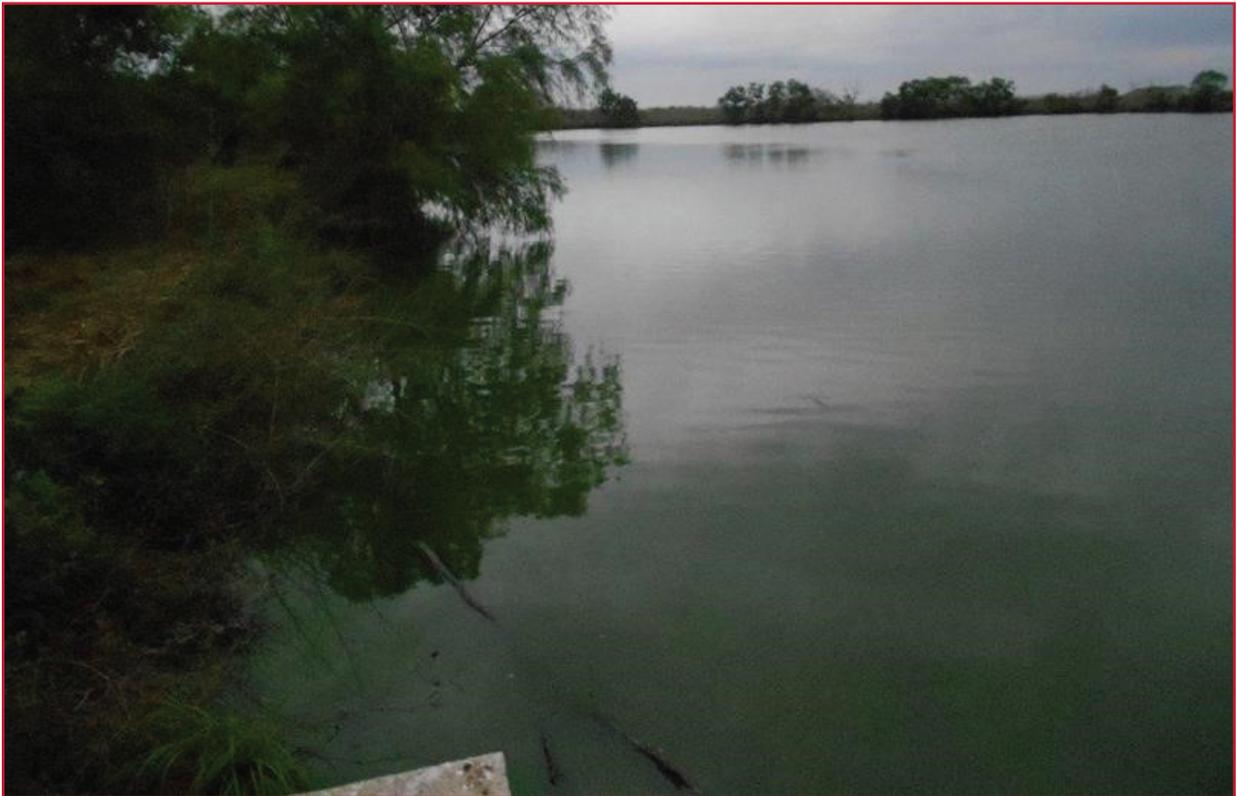
Problema	Causas	Medidas de prevención y control
Crecimiento de la vegetación	Mantenimiento inadecuado	Vegetación acuática (que crece en la pendiente interior): remoción total, evitando que caiga en la laguna Vegetación terrestre (que crece en la pendiente externa): remover las malezas del suelo.
Vegetación en el interior de la laguna	Nivel operativo bajo de la laguna (debajo de 60 cm) Infiltración excesiva Bajo gasto de agua residual	Operar las lagunas con un nivel superior a 90 cm Cortar la vegetación de los bordes internos, evitando que se caiga en la laguna Proteger la pendiente interna con placas de concreto, geomembranas, etcétera Remover la vegetación que se encuentra en el interior de la laguna con canoas o dragas (bajar el nivel del agua para facilitar la operación) Reducir la permeabilidad de la laguna con una capa de arcilla (si es posible)

#### 4.4. REMOCIÓN DE NATAS

La remoción de natas y sólidos flotantes debe hacerse diariamente o cuando sea necesario, para que no se extiendan demasiado sobre el área superficial de las lagunas, donde pueden

causar problemas de malos olores, por su descomposición y por la formación de lugares adecuados para la cría de insectos. Por lo general, la dirección del viento hace que las natas y sólidos flotantes se acumulen en las esquinas de las lagunas. El operador requerirá de herramien-

Ilustración 4.7 Crecimiento de vegetación en laguna facultativa



tas para remover las natas y una carretilla para transportarlas. Esta operación se considera rutinaria en las lagunas, por lo que es una actividad diaria.

En la Tabla 4.4 se presentan los problemas más comunes detectados en lagunas, las cau-

sas y sus posibles soluciones. En la Ilustración 4.8 se observa presencia de natas en una laguna y afectación al borde de la laguna. La Ilustración 4.9 presenta la imagen de una laguna de estabilización que presenta crecimiento de vegetación dentro de la laguna y afectación del bordo.

Tabla 4.4 Principales problemas de operación de las lagunas y sus posibles soluciones

Problema	Causas	Medidas de prevención y control
Superficie de la laguna anaerobia cubierta con una capa de nata	Nata y grasas	Ninguna medida debe tomarse: la capa de nata es normal en lagunas anaerobias, ayuda a mantener la ausencia de oxígeno, a controlar la temperatura y a impedir la liberación de malos olores
Natas y material flotante (que impide el paso de la energía solar) en lagunas facultativas	Excesiva floración de algas (forman un color verdoso en la superficie) Descarga de un material no deseado (por ejemplo, basura) Grumos de lodo liberados de la parte inferior Poca circulación y la influencia del viento	Romper las natas con chorros de agua o con un rastrillo (al quebrar las natas generalmente se hunde) Remover las natas con un tamiz de tela Romper o remover los grumos de lodo Remover los obstáculos físicos para la penetración del viento (de ser posible)

Ilustración 4.8 Laguna con materia flotante, crecimiento de maleza y deterioro del borde



#### 4.5. ALTA CONCENTRACIÓN DE ALGAS

La alta concentración de cierta especie de algas en el efluente puede suceder como una respues-

ta de condiciones ambientales favorables para su crecimiento. Para su prevención y control pueden colocarse mamparas en la laguna, antes del tubo de descarga, o dar postratamiento al efluente para su remoción.

Ilustración 4.9 Laguna de estabilización con crecimiento de vegetación y afectación del borde



Tabla 4.5 Problemas de alta concentración de algas y sus posibles soluciones

Problema	Causas	Medidas de prevención y control
Manchas verdes donde el nivel del agua está en contacto con la pendiente	Proliferación de algas, en vista de la poca profundidad en la sección del nivel de agua y pendiente	Remover las colonias de algas
Altas concentraciones de algas (SS) en el efluente	Condiciones ambientales que favorecen el crecimiento de ciertas poblaciones de algas	Remover el efluente sumergido a través de baffles, que retienen las algas Usar múltiples celdas en series, con un pequeño tiempo de residencia en cada celda Implementar el postratamiento del efluente de la laguna, para remover el exceso de sólidos suspendidos
Presencia de algas filamentosas y musgos, el cual limitan la penetración de la luz solar	Sobre diseño de las lagunas Reducir la carga del afluente según la temporada	Incrementar la carga de la unidad, a través de la reducción del número de lagunas en operación Utilizar la operación en series

Ilustración 4.10 Entrada de agua al canal de recolección



La Tabla 4.5 presenta los problemas por alta concentración de algas y sus posibles soluciones. La Ilustración 4.10 muestra un afluente con presencia de algas.

#### 4.6. PRESENCIA DE CIANOBACTERIAS

La presencia de cianobacterias ocurre cuando se presenta un tratamiento que no es completado, existe sobrecarga orgánica y hay desbalance de nutrientes. Sperling Von (1996) menciona que para la prevención y control de las cianobacterias debe adicionarse sulfato de cobre en dosis adecuadas, previo estudio.

La Tabla 4.6 presenta las causas que pueden originar la presencia de cianobacterias y sus posibles soluciones.

#### 4.7. CORTOCIRCUITOS HIDRÁULICOS

Los cortocircuitos en las lagunas de estabilización pueden ser ocasionados por varios factores como son:

- La colocación de estructuras de entrada y salida
- El número de estructuras de entrada y salida

Tabla 4.6 Problemas de presencia de cianobacterias en lagunas y sus posibles soluciones

Problema	Causas	Medidas de prevención y control
Presencia de cianobacterias	Tratamiento incompleto Sobrecarga Desbalance de nutrientes	Romper la floración de algas Balance de nutrientes Evitar sobrecarga

Ilustración 4.11 Laguna de estabilización con varias estructuras de entrada



- Ausencia de viento, que favorece el mezclado en la laguna
- Por estratificación termal en la laguna

Posibles soluciones: rediseñar las estructuras de entrada y salida; incrementar el número de estructuras de entrada y salida (la Ilustración 4.11 presenta una laguna facultativa con varias estructuras de entrada); colocar mamparas (la Ilustración 4.12 presenta una laguna facultativa con mamparas); recircular el efluente (la Ilustración 4.13 presenta esquemas de recirculación en lagunas de estabilización).

La Ilustración 4.14 muestra el deterioro del bordo libre de la laguna por la acción del viento. La Ilustración 4.15 muestra la acumulación de basura en una estructura de una laguna que requiere operación y mantenimiento. La Ilustración 4.16 muestra una laguna de estabilización

con crecimiento de malezas en el bordo libre.

La Ilustración 4.17 muestra una estructura superficial de una laguna y presencia de vegetación en el bordo libre de la misma.

La Ilustración 4.18 muestra la estructura de salida de una laguna de estabilización que requiere operación y mantenimiento.

En la Ilustración 4.19 puede observarse la presencia de una coloración diferente al color verde esperado en una laguna facultativa.

La Tabla 4.7 presenta otros posibles problemas, causas y soluciones en lagunas de estabilización.

La Tabla 4.8 presenta indicadores para la solución de problemas en lagunas de estabilización.

Ilustración 4.12 Laguna de estabilización con mamparas



Ilustración 4.13 Esquemas de alternativas de recirculación de efluentes en lagunas de estabilización

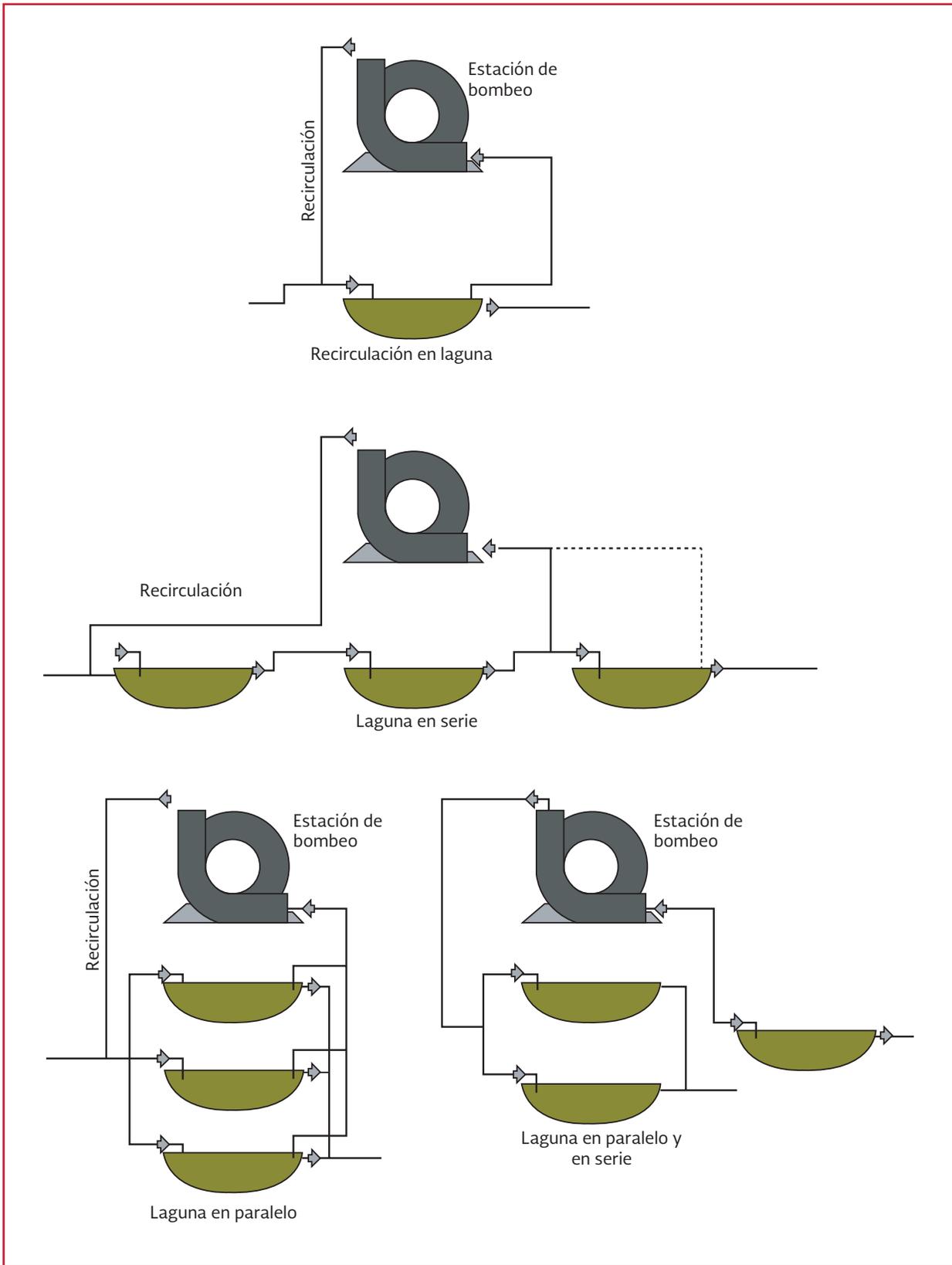


Ilustración 4.14 Laguna de estabilización con diferentes esquemas de recirculación



Ilustración 4.15 Estructura de una laguna con acumulación de basura



Ilustración 4.16 Laguna de estabilización que presenta malezas en el borde de concreto



Ilustración 4.17 Estructura superficial en una laguna y presencia de vegetación en los bordos



Ilustración 4.18 Estructura de salida de una laguna de estabilización que requiere operación y mantenimiento



Ilustración 4.19 Coloración en laguna facultativa



Tabla 4.7 Principales problemas de operación de las lagunas facultativas y sus posibles soluciones

Problema	Causas	Medidas de prevención y control
Tendencia progresiva de la reducción del OD (OD debajo de 3 mg/L en los meses cálidos)	Baja penetración de la luz solar Bajo tiempo de residencia Alta carga de DBO Agua residual industrial toxica	Remover la vegetación flotante Reducir la carga en la primera laguna a través de la operación en paralelo Introducir aireación alternativa Recircular el efluente final
Tendencia progresiva de la reducción del pH (pH ideal arriba de 8), con mortalidad de algas verdes	Sobrecarga Periodos largos con condiciones atmosféricas adversas Organismos que comen algas	Ver medidas relacionadas con la baja concentración de OD o a los malos olores debido a la sobrecarga

Tabla 4.8 Indicadores importantes para la solución de problemas en lagunas de estabilización

Apariencia de la laguna	Olor	Observación microscópica	Problema	Solución
Claro	Ninguno	Poco material suspendido	Ninguno	Ninguno
Marrón	Terroso	Flóculos bacterianos pequeños	Ninguno, por lo general buena operación	Ninguno
Gris-negro, lodo flotante y burbujas de gas en la superficie de la laguna	Fosa séptica o alcantarillado	Sulfuros precipitados en flóculos; bacterias de azufre a menudo filamentosas	Sobrecarga de materia orgánica Baja concentración de oxígeno disuelto Lodo en el afluente y cortocircuitos	Añadir deflectores o lagunas adicionales Mejorar entrada y salida de la recirculación de diseño Eliminar la acumulación de lodos
Verde	Herboso o terroso	Florece algas verdes	Floraciones de algas, pH con frecuencia > 9 Largos tiempo de residencia Carga inferior de materia orgánica	Recirculación Adición de una laguna de sedimentación Descarga del lodo
Esteras flotantes de algas verde-azul	A pescado	Florece bacterias verde-azules	Véase más arriba	Retire las lagunas de la operación, disminuir la profundidad del agua para disminuir TRH; Precaución: puede aumentar la generación de algas
Vetas rojizas	Ninguno o a fosa séptica	Altas cantidades De Daphnia	Crecimiento excesivo de daphnia, a menudo después de la floración de algas	Recircular
Totalmente de color rojo o rosa	Fosa séptica (olor a huevo podrido)	bacterias de azufre (Chromatium spp.)	Anaeróbico Sobrecarga de materia orgánica exagerada y baja aireación	Aumentar recirculación

# 5

## ARRANQUE Y ESTABILIZACIÓN DEL PROCESO

### 5.1. ACTIVIDADES DE VERIFICACIÓN ANTES DEL ARRANQUE DE UNA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN

Es recomendable realizar una serie de actividades de verificación en la laguna antes de realizar el arranque de su funcionamiento, por ejemplo:

- Verificar la ausencia de vegetación en los taludes y en el fondo de la laguna
- Verificar el estado apropiado de las unidades de entrada, rejillas, unidades de medición de gastos, unidades de paso y estructuras de salida
- Revisión del estado adecuado de las pantallas o baffles cuando existan

Las condiciones recomendadas para la realización del arranque son:

- Planeación del arranque en la época más cálida del sitio, debido a que a mayor temperatura se reduce el tiempo de aclimatación
- En la PTAR debe contarse con la siguiente documentación: juego de planos de la construcción, especificaciones técnicas de los equipos, fotografías de

la fase constructiva, formatos de registro de datos operacionales, diagrama de flujo del proceso

- Revisión del manual de operación y mantenimiento de la PTAR (sistema lagunar), actualizado si hubo variaciones durante la construcción del sistema
- Personal capacitado para la operación y el mantenimiento
- Contar con las herramientas y el equipo para la realización de la operación y el mantenimiento
- Tener el equipo para la medición de parámetros de campo, como temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto
- Bitácoras de registro

### 5.2. RECOMENDACIONES PARA EL LLENADO DE LAS LAGUNAS

El llenado de las lagunas debe realizarse lo más rápido posible, para evitar el crecimiento de vegetación y la erosión de taludes por bajo nivel del agua.

El llenado de la laguna debe realizarse con agua bombeada de un arroyo cercano o de un sistema de suministro público (Sperling Von, 2007).

- Llene el estanque con una profundidad mínima de agua, de preferencia hasta alcanzar 1 metro
- Cierre los dispositivos de salida
- Comience la introducción de las aguas residuales hasta alcanzar la profundidad del agua establecida en el diseño

La adopción de este procedimiento:

- Previene el crecimiento sin control de la vegetación, que se produce en condiciones de baja profundidad del agua
- Permite la prueba de impermeabilidad de los sistemas
- Permite la corrección de problemas ocasionales resultantes de una compactación deficiente (antes de la introducción de las aguas residuales)

Para el llenado de la laguna con una mezcla de agua bombeada desde el río y agua residual a tratar es necesario que (Sperling Von, 2007):

- Mezcle del agua residual y del agua (dilución en una proporción igual o mayor a 1/5)
- Llene el estanque a una profundidad de aproximadamente 0.60 m
- Espere algunos días, hasta la aparición visible de algas
- En los días subsecuentes, adicione más agua residual, o mezcla de agua residual y agua, hasta que ocurra el crecimiento floreciente de algas
- Interrumpa la operación por un periodo de 7 a 14 días
- Llene la laguna con agua residual hasta el nivel de operación
- Interrumpa la operación

- Espere el establecimiento de una población de algas (7 a 14 días)
- Alimente la laguna con agua residual

Cuando el agua no esté disponible, las lagunas pueden ser llenadas con agua residual cruda y no ser alimentadas durante 3 o 4 semanas, para el desarrollo de la población de microorganismos. La liberación de algunos olores en este periodo ha sido mencionada en Sperling Von (2007).

El periodo de carga debe ser monitoreado por personal con experiencia en el proceso. El periodo de carga total puede tardar 60 días, hasta que se establezca una comunidad biológica equilibrada en el proceso.

### 5.3. ARRANQUE DE OPERACIÓN DE LAGUNAS ANAEROBIAS

Cuando el sistema lagunar inicie con una laguna anaerobia es recomendable llenarla con agua cruda y dejarla en reposo por un tiempo de 20 días, incrementando la carga en forma gradual. Es necesario, asimismo, mantener un pH de 7.

Sperling Von (2007) menciona que el arranque de operación de lagunas anaerobias requiere seguir los siguientes puntos:

- Realizar la alimentación siguiendo las recomendaciones en la sección 5.1
- Mantener el pH del medio en el rango de 7.2-7.5
- Las lagunas anaerobias deberán iniciar su arranque después de las lagunas facultativas
- Sí hay más de una laguna anaerobia en

paralelo, primero sólo una laguna deberá realizar su arranque

Una vez llenada la laguna anaerobia, debe verificarse que el pH de la laguna durante el mes siguiente se encuentre entre los valores 7.2 y 7.5, para favorecer el desarrollo de las bacterias metanogénicas.

Cuando la concentración de materia orgánica en el afluente del sistema es muy baja, alimente la laguna anaerobia hasta que la carga aplicable a la laguna sea de por lo menos 0.1 kg DBO/(m<sup>3</sup> d).

#### 5.4. ARRANQUE DE OPERACIÓN DE LAGUNAS FACULTATIVAS

Para sistemas lagunares que inicien con una laguna facultativa, se procede a llenar con agua de río o agua limpia hasta un nivel mínimo de 1 m. A continuación se alimenta con agua residual a un gasto de un décimo de su diseño, manteniendo un pH de 7. Debe medirse el oxígeno disuelto (OD). Se estima que el crecimiento bacteriano y algal se desarrollará en un periodo de 7 a 30 días, al término del cual se alimentará con el gasto total.

Sperling Von (2007) menciona que para el arranque de la operación de lagunas facultativas es necesario seguir los siguientes puntos:

- Realizar la alimentación siguiendo las recomendaciones de las secciones 5.1 y 5.2
- Mantener el pH del proceso en el rango de 7.2-7.5
- Medición diaria de oxígeno disuelto

Las lagunas facultativas iniciarán su funcionamiento siguiendo el pH y el OD. En caso de que el pH sea menor de 7 o si la concentración de OD es muy pequeña, deberá suspenderse la alimentación del agua residual hasta que se reestablezcan las condiciones.

#### 5.5. ARRANQUE DE OPERACIÓN DE SISTEMAS DE LAGUNAS EN SERIE

Para el llenado de las lagunas subsecuentes a una laguna facultativa, se llenarán a una altura de 1 m con agua limpia, después se llenarán con el gasto de las lagunas anteriores, de la parte superior de las mismas.

Además es necesario evitar que las lagunas disminuyan su nivel a menos de 1 m; igualar los niveles de operación de las lagunas que conforman el sistema; no descargar hasta que todas las lagunas estén llenas a su nivel de operación; y realizar incrementos del nivel de las lagunas en intervalos de 15 cm.

Los parámetros a medir y observar durante el periodo de arranque de una laguna son los indicados en la Tabla 2.3: olor, color, gasto, temperatura ambiente y temperatura del agua, pH y OD, con una frecuencia diaria. Los resultados de la observación y de la medición podrán ser comparados con los indicados en la Tabla 2.3, de condiciones normales en lagunas de estabilización.

En el afluente a las lagunas hay que dar seguimiento al parámetro de DBO cada semana. Una vez que el sistema lagunar esté en operación continua, los parámetros a seguir adicional-

mente a los de medición diaria, son los indicados de la Tabla 2.4 a la Tabla 2.6, de monitoreo y frecuencia de muestreo de lagunas anaerobia, facultativa y de maduración, respectivamente.

En la Ilustración 5.1 puede observarse el inicio del llenado de una laguna y la cubierta de la geomembrana. En la Tabla 5.1 se presenta un listado de actividades de verificación antes del arranque de una laguna de estabilización.

La Tabla 5.2 presenta un ejemplo de formato de registro de seguimiento del arranque de una laguna de estabilización.

Acerca de los programas de seguridad y salud sugeridos para plantas de tratamiento, se menciona lo siguiente (WPCF, 1990):

Los programas de seguridad y de salud difieren entre las plantas, pero la mayoría contiene los mismos tres elementos clave:

- Una política de seguridad y salud por escrito
- Un comité de política de seguridad y salud
- La formación o capacitación en seguridad y salud

Tabla 5.1 Actividades de verificación antes del arranque de una laguna de estabilización

Actividad	Laguna anaerobia	Laguna Facultativa	Laguna de maduración
Ausencia de vegetación en los taludes de la laguna			
Ausencia de vegetación en el fondo de la laguna			
Estado apropiado de las unidades de:			
Entrada			
Rejillas			
Unidades de medición de gastos			
Unidades de interconexión			
Estructuras de salida			
Pantallas o baffles (cuando existan)			
Contar con la siguiente documentación:			
Juego de planos de la construcción			
Especificaciones técnicas de los equipos			
Fotografías de la fase constructiva			
Formatos de registro de datos operacionales			
Diagrama de flujo del proceso			
Manual de operación y mantenimiento del sistema lagunar actualizado			
Personal capacitado en la operación y mantenimiento			
Equipo para la medición de parámetros de campo:			
Temperatura			
pH			
Conductividad			
Oxígeno disuelto			
Existencia de herramientas y equipo para la realización de la operación y mantenimiento (ver Tabla 2.8)			
Bitácoras de registro			

Un buen programa proporcionará los servicios de asistencia médica y primeros auxilios. Un manual

de seguridad y salud proporcionará información que podría prevenir accidentes o lesiones.

Ilustración 5.1 Llenado de una laguna y cubierta con geomembrana



Tabla 5.2 Formato registro de seguimiento del arranque de una laguna de estabilización

Parámetros visuales (medición diaria)	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Olor							
Color							
Nubosidad							
Precipitación							
Parámetros de medición (medición diaria)							
Gasto							
pH							
Temperatura del agua							
Temperatura del ambiente							
Sólidos disueltos totales							
Oxígeno disuelto							
DBO (semanal)							
DQO (semanal)							
SST (semanal)							
SSV (semanal)							

*Nota: Los puntos de medición deben ser en el afluente y en el proceso de cada laguna. A partir del llenado de la laguna y cuando se genere el efluente, se incluirá este punto en las mediciones*



# 6

## SEGURIDAD E HIGIENE

### 6.1. MANUAL DE SEGURIDAD Y SALUD

El manual de seguridad y salud permite a cada empleado un acceso rápido a información valiosa que puede prevenir un accidente o lesión. El manual contiene generalmente la siguiente información:

- Políticas de seguridad y salud
- Reglas de seguridad y salud
- Procedimientos de emergencia y números telefónicos de emergencia

### 6.2. RESPONSABILIDADES DE HIGIENE Y SEGURIDAD

Un programa de higiene y seguridad es utilizado por la administración para asignar responsabilidades de prevención de accidentes y enfermedades relacionados con el trabajo, y para asegurarse que se cumplan dichas responsabilidades. Las consideraciones de higiene y seguridad deben ser incorporadas en el diseño de cada proceso y todos los procedimientos de operación y mantenimiento.

### 6.3. RESPONSABILIDADES DE GESTIÓN

Una política de higiene y seguridad comienza en la parte superior, por ejemplo, si se trata de un consejo de ciudad, una comisión de la ciudad o un superintendente de la planta. La política establece la actitud básica hacia la gestión de la higiene y la seguridad; su eficacia depende de la participación directa y permanente de la gestión.

La prevención de accidentes y enfermedades ocupacionales se consigue a través del control del ambiente de trabajo y el rendimiento de los empleados. La administración es responsable de establecer e implementar estos controles. Las responsabilidades de gestión específicas incluyen:

- Formular por escrito una política de higiene y seguridad
- Proporcionar una política de higiene y seguridad en el trabajo
- Aplicar una política de higiene y seguridad en el trabajo
- Establecer objetivos de seguridad, higiene y salud

- Proporcionar una capacitación o formación adecuada
- Delegar de autoridad en el área para asegurar que el programa se ejecute correctamente
- Crear un comité de seguridad, higiene y salud

#### 6.4. RESPONSABILIDADES DE SUPERVISIÓN

El supervisor o jefe de planta es la persona clave en el programa de higiene y seguridad, porque esta persona se mantiene en contacto diario con los operadores de planta y otros empleados. La actitud hacia la seguridad y la salud adecuada y los intereses de cada empleado dependen de la capacidad y de los esfuerzos del supervisor o jefe de planta, quien debe instruir personalmente a los operadores acerca de los métodos y procedimientos de seguridad, además de velar porque:

- Cada empleado esté familiarizado y entienda lo establecido acerca de la seguridad de la planta, las normas y los procedimientos de salud e higiene
- Los métodos correctos se utilicen en la operación y mantenimiento de equipos
- Haya salvaguardias y el equipo adecuados y porque los procedimientos sean utilizados por los operadores
- Solamente el personal calificado y capacitado pueda estar asignado a tareas específicas

En Yáñez Cossío (1992) se menciona que “El superintendente y Jefe de Operación y Mantenimiento son las personas responsables por el desarrollo de un programa de prevención de accidentes y seguridad en el trabajo, de acuerdo con las normas de la Institución encargada”.

Por otra parte, en Shilton (2005) se menciona que en cada sistema lagunar pequeño es deseable proveer instalaciones básicas para operadores y visitantes, incluyendo:

- Oficina del operador con escritorio, baño, lavabo, ducha y botiquín de primeros auxilios
- Ropa protectora, incluyendo chalecos salvavidas para toma de muestras en laguna
- Aros salvavidas, colocados en lugares estratégicos adyacentes a cada laguna
- Almacenamiento seguro para las herramientas y equipos
- El manual de operación debería incluir un inventario de herramientas requerido para el mantenimiento
- La seguridad de la PTAR requiere de una valla alta, que rodee toda la planta con puertas de acceso
- Letreros de advertencia deberán estar colocados en la valla, que indiquen que se trata de una “Planta de tratamiento de aguas residuales, peligro para la salud, ninguna persona puede entrar sin autorización de (nombre)”

- Las normas de higiene deben ser definidas para proteger a los trabajadores, con avisos de seguridad y salud que se muestren en los puntos clave en las obras, como son la puerta principal y la oficina.
- Además de las instalaciones mencionadas, la ropa de protección para el personal debe incluir los siguientes elementos: overol, impermeable, botas de trabajo (con cubierta de acero en la punta), botas de hule, guantes de protección, guantes de hule, arneses, máscara de nariz y boca, casco de seguridad, lentes protectores de plástico
- Uniformes de trabajo, cascos, capas, guantes, canoas e impermeables deben permanecer en el sitio de trabajo
- Herramientas, como palas, rastrillos y dispositivos para la remoción de espumas deben lavarse con agua potable antes de guardarse
- Cortadas, rasguños y quemaduras deben atenderse de inmediato
- No debe invitar a amigos a visitarlo, para evitar accidentes
- La entrada del sitio debe mantenerse cerrada cuando no existan visitas autorizadas. Deben recordarse los riesgos higiénicos para los visitantes.
- En las proximidades de la laguna deben estar disponibles una embarcación, cuerdas y salvavidas
- Revisar los esquemas de vacunación requerida de acuerdo con el tipo de trabajo

Rolim Mendoca (2000) menciona que todo sistema de lagunas de estabilización debe cercarse para evitar la presencia de intrusos o animales extraviados. Además, describe las normas de seguridad básicas que debe seguir un operador bien entrenado de un sistema de lagunas de estabilización, de las cuales se presentan las siguientes:

- Lavarse las manos antes de beber o comer y antes de encender un fósforo

La Ilustración 6.1 presenta la malla de protección de una laguna de estabilización.

La Ilustración 6.2 muestra la puerta de entrada a un sistema lagunar y su caseta de vigilancia.

Ilustración 6.1 Malla perimetral de una laguna



Ilustración 6.2 Entrada y caseta de vigilancia de la planta de tratamiento de aguas residuales



## CONCLUSIONES DEL LIBRO

El tratamiento mediante lagunas de estabilización es uno de los más utilizados en México. A pesar de los requerimientos de terreno para su construcción, el costo por metro cúbico de agua residual tratada es menor que en las plantas de tratamiento intensivas o mecanizadas. Aunque su operación es simple, en todos los casos se requieren actividades operativas.

Es importante que tanto los responsables administrativos como los operadores de dichos sistemas sean conscientes de la importancia de dar seguimiento al proceso, así como de la medición de los principales factores y parámetros que pueden interferir en el proceso y su registro correspondiente.

Como en todas las plantas de tratamiento, el diseño, la operación y el mantenimiento adecuado del pretratamiento es indispensable para minimizar los riesgos que pudieran deteriorar la eficiencia del tratamiento en las lagunas de estabilización.

Cada planta tiene sus particularidades, por lo tanto, el programa de operación y mantenimiento debe adaptarse a cada condición. El presente libro incluye las actividades de operación rutinarias y de mantenimiento que normalmente deben realizarse, así como los problemas comunes y las sugerencias de las acciones correctivas. También incluye recomendaciones generales para el arranque de operación de los sistemas, así como guías anexas para el seguimiento del tratamiento.



# A

## A.1. FORMATOS DE OPERACIÓN

Tabla A.1 Ejemplo de una hoja de informe de operación semanal. Fuente

Reporte de mantenimiento de rutina semanal. Inicio de semana (fecha):								
Obras (nombre/localización):								
Actividad de mantenimiento	Turno	Lun	Mar	Miér	Jue	Vier	Sáb	Dom
1. Limpieza de rejilla de entrada	1º							
Observaciones:								
2. Limpieza de los canales de arena	1º							
Observaciones:								
3. Traslado de los sólidos y la arena	1º							
Observaciones:								
5. Limpieza de la laguna entrada/salida	1º							
Observaciones:								
Personal de turno (rúbrica)								
Confirmación de las actividades de mantenimiento realizadas (firma del supervisor):								

Tabla A.2 Ejemplo de una lista de operación y mantenimiento en las lagunas

Operación Laguna:	F	Laguna:					Semana del:	
		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Observaciones en los perímetros de las lagunas								
Observar acumulación de nata en la superficie de la laguna y en las cajas de salida de descarga	S							
Signos de animales de madriguera	D							
Condiciones anaerobias: señaladas por el olor y el color negro, lodos flotantes, gran número de burbujas de gas	D							
Crecimiento de malas hierbas en el agua	D							
Evidencia de erosión del dique	D							
Existencia de fugas en el dique	D							
Daños en la cerca	D							
Evidencia de cortocircuito	D							
Pretratamiento								
Limpieza de la entrada y rejillas	D							
Disposición adecuada de la basura								
Revisión del medidor de gasto de entrada	D							
Observaciones en la laguna en descarga intermitente								
Olor	S							
Presencia de plantas acuáticas	S							
Profundidad	S							
Condición del dique	S							
Gasto (afluente)	D							
Lluvias	SN							
Observaciones en la laguna en descarga continua								
Clima	D							
Gasto	D							
Condición de todas las celdas	D							
Profundidad de todas las celdas	D							
Efluente de la laguna	D							
Muestra puntual de OD y pH	D							
Muestreo compuesto de DBO y SST	SN							
Pruebas microbianas	SN							
Equipo mecánico								
Revisar el equipo mecánico y realizar el mantenimiento preventivo programado en las siguientes piezas de equipo de acuerdo con las recomendaciones del fabricante:								
Estaciones de bombeo:								
Retirar residuos	D							
Checar las bombas de operación	D							
Limpieza de flotadores y otros dispositivos de control	S							
Lubricar equipos	SN							
Dispositivos desmenuzadores:								

Tabla A.2 Ejemplo de una lista de operación y mantenimiento en las lagunas (continuación)

Operación Laguna:	F	Laguna:					Semana del:	
		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Comprobar cortadores	S							
Lubricar	SN							
Dispositivos de medición:								
Revisar y limpiar flotadores	D							
Verificar la exactitud	S							
Válvulas y compuertas:								
Comprobar si están ajustados correctamente	D							
Abrir y cerrar para asegurarse de que están en funcionamiento	S							

*D = Diario*

*S = Semanal*

*SN = Según sea necesario*

Tabla A.3 Formato para la descripción física del sistema lagunar

Nombre del sistema:	
Población:	
Municipio:	
Estado:	
Estación meteorológica:	
Periodo de observación:	
Longitud:	Temperatura:
Latitud	Precipitación:
Altitud	Evaporación:
Población servida:	
Industria servida:	
Población equivalente (gDBO/día)/(54g DBO/hab día):	
Fecha de construcción:	
Fecha de inicio de operación:	
Número de lagunas:	
Número de lagunas en serie:	

Croquis del sistema lagunar:

- Simbología
- M=medidor de gasto
  - R=recirculación
  - I=afluente
  - E=efluente
  - x =dirección del gasto
  - A=anaerobia
  - F=facultativa
  - M=maduración
  - Mf=micrófitas flotantes o enraizadas
  - At=alta tasa
  - L=longitud (m)
  - W=ancho (m)
  - Z=profundidad (m)
  - B=bordo libre
  - S=pendiente
  - 1=dirección del viento dominante

Nota: Poner dimensiones de los bordos

Tabla A.4 Formato para la descripción física del sistema lagunar

Nombre del sistema:
Población:
Municipio:
Estado:
Pretratamiento
Rejillas:
Desarenador:
Sedimentador primario:
Otro:
Gasto
Medidor de:
Equipo para recirculación:
Diámetro del tubo:
Potencia:
Gasto de recirculación:
Factor de recirculación:
Postratamiento
Remoción de algas:
Cloración:
Filtración:
Otros:
Descripción de las lagunas individuales:
Laguna:
Largo (L):
Ancho (W):
Profundidad (Z):
Mampara
Número de mamparas:
Largo de mamparas:
Espaciamiento entre mamparas:
Relación $W_m/W_{lag}$ (ancho de mamparas/ancho de laguna):
Relación $L_{lag}/L_m$ (largo de laguna/espaciamiento entre mamparas):
Diseño físico
Impermeabilización:
Geomembrana                      Arcilla                      Otra
Entrada:
Tubería simple
Tubería múltiple:
Profundidad:
Salida:
Tubería simple
Tubería múltiple
Profundidad

Tabla A.5 Formato para la descripción física del sistema lagunar a evaluar

<b>Nombre del sistema:</b>		
Población:		
Municipio:		
Estado:		
<b>Registros</b>		
Datos de calidad	SÍ	NO
Periodo de monitoreo:		
<b>Tipo de muestreo</b>		<b>Tipo de muestra</b>
Superficial:		Simple:
Inmersión a:		Compuesta:
		Columna:
Frecuencia de muestreo:		
Parámetros analizados:		
<b>Condiciones particulares de descarga:</b>		
Uso del efluente final		
Agrícola:		
Superficie irrigada		
Cultivos		
Producción (Ton/Ha)		
Piscícolas:		
Especies		
Producción		
Descarga:		
Cuerpo receptor		
Recarga de acuíferos		
Tipo de acuífero:		
Libre	Confinado	Semiconfinado
Uso del acuífero:		
Calidad promedio del afluente		
DBO (total)		DQO (total)
DBO (soluble)		DQO (soluble)
SST		Coliformes fecales
Huevos de helminto		
Calidad promedio del efluente final		
DBO (total)		DQO (total)
DBO (soluble)		DQO (soluble)
SST		Coliformes fecales
Huevos de helminto		

## A.2. FORMATOS DE MANTENIMIENTO

Tabla A.6 Ejemplo de una hoja de informe de operación y mantenimiento semanal

Reporte de mantenimiento de rutina semanal. Inicio de semana (fecha):								
Obras (nombre/localización):								
Actividad de mantenimiento	Turno	Lun	Mar	Miér	Jue	Vier	Sáb	Dom
1. Limpieza de rejilla de entrada	1 <sup>ro</sup>							
Observaciones:								
2. Limpieza de los canales de arena	1 <sup>ro</sup>							
Observaciones:								
3. Traslado de los sólidos y la arena	1 <sup>ro</sup>							
Observaciones:								
4. Mantenimiento de las bombas	1 <sup>ro</sup>							
Observaciones:								
5. Limpieza de la laguna entrada/salida	1 <sup>ro</sup>							
Observaciones:								
6. Tareas de mantenimiento adicional	1 <sup>ro</sup>							
Observaciones:								
Personal de turno (rúbrica)								
Confirmación de las actividades de mantenimiento realizadas (firma del supervisor)								

Tabla A.7 Ejemplo de una lista de operación y mantenimiento en las lagunas

Operación y mantenimiento	Semana del:							
	F	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Observaciones en los perímetros de las lagunas								
Observar acumulación de nata en la superficie de la laguna y en las cajas de salida de descarga	S							
Signos de animales de madriguera	D							
Condiciones anaeróbicas: señaladas por el olor y el color negro, lodos flotantes, gran número de burbujas de gas	D							
Las malas hierbas que crecen en agua	D							
Evidencia de erosión del dique	D							
Fugas del dique	D							
Daños de la cerca	D							
Evidencia de cortocircuito	D							
Pretratamiento								
Limpiar la entrada y las rejillas y disponer adecuadamente de la basura	D							
Revisión del medidor de gasto de entrada	D							
Observaciones en la laguna en descarga intermitente								
Olor	S							
Presencia de plantas acuáticas	S							
Profundidad	S							
Condición del dique	S							
Gasto (afluente)	D							
Lluvias	SN							
Observaciones en la laguna en descarga continua								
Clima	D							
Gasto	D							
Condición de todas las celdas	D							
Profundidad de todas las celdas	D							
Efluente de la laguna	D							
Muestra puntual de OD y pH	D							
Muestreo compuesto de DBO y SST	SN							
pruebas microbianas	SN							
Equipo mecánico								
Revisar el equipo mecánico y realizar el mantenimiento preventivo programado en las siguientes piezas de equipo de acuerdo con las recomendaciones del fabricante:								

Tabla A.7 Ejemplo de una lista de operación y mantenimiento en las lagunas (continuación)

Operación y mantenimiento	F	Semana del:						
		Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Estaciones de bombeo:								
Retirar residuos	D							
Checar las bombas de operación	D							
Limpieza de flotadores, y otros dispositivos de control	S							
Lubricar de equipos	SN							
Dispositivos desmenzadores:								
Comprobar cortadores	S							
Lubricar	SN							
Dispositivos de medición:								
Revisar y limpiar flotadores	D							
Verificar la exactitud	S							
Válvulas y compuertas:								
Comprobar si están ajustado correctamente	D							
Abrir y cerrar para asegurarse de que están en funcionamiento	S							

*D = Diario*

*S= Semanal*

*SN = Según sea necesario*



# BIBLIOGRAFÍA

- Angehrn, M. e. (1984). Ultraviolet Disinfection of water, Aqua No.2, pp 109-115.
- Barry Lloyd, J., Andreas Leitner, R., & Gugescharajah, K. (2006). Surveillance for Improvement of Waste Stabilisation Ponds. First edition. Librari of Congress. ISBN: 9972-2843-0-1.
- Bitton, G. (2005). Wastewater Microbiology. Department of Environmental Engineering Science. . University of Florida, Gainesville. 3 edition. Ed. Wiley-Liss. ISBN: 0-471-30985-0.
- CONAGUA. (1994). Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Potabilización y tratamiento, IMTA. Primera edición. ISBN: 968-7417-00-5.
- CONAGUA. (2011). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Primera edición. Editorial Mc Graw-Hill. ISBN: 0-07-289087-8.
- Dinges, R. (1978). Upgrading Stabilization Ponds Effluent by Wastewater. Hyacinth Culture, J. WPCF.
- EPA. (1983). Municipal Wastewater Stabilization Ponds, Design Manual. .
- EPA, 1992. (s.f.). Environmental Protection Agency "Guidelines for Water Reuse". EPA/628/R-92/004.
- EPA,2011. (s.f.). Principles of Design and Operations of Wastewater Treatment Pond Systems for Plant Operators, Engineers, and Managers. Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory. EPA/600/R-11/088. United States.
- Escalante Estrada, V. E., Moeller Chávez, G., Rivas Hernández, A., & Pozo Román, F. (2006). Diseño, operación mantenimiento y evaluación de sistemas lagunares. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1ra. edición. ISBN: 968-5536-79-1.
- Escalante Estrada, V. E., Rivas Hernández, A., & Moeller Chávez, G. (2000). Manual de evaluación de lagunas de estabilización. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1ra. edición. ISBN: 968-7417-35-8.
- Escalante V., R. E. (2006). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de lodos activados. Jiutepec, Morelos: IMTA.
- Grady, C. P., & Lim, H. C. (1980). Biological Wastewater Treatment Theory and Applications. Marcel Dekker, New York.
- Grady, L. D. (2011). Biological Wastewater Treatment, Third Edition.
- Group, T. P. (1990). Manuals of practice for water pollution control. Alexandria, Va.
- IMTA.(1994).Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Libro

- II. Proyecto 3a. Sección: Potabilización y Tratamiento. Tratamiento. Lagunas de estabilización.
- IMTA. (2003). Operación y mantenimiento de sistemas lagunares. Centro de capacitación del IMTA en San Roque, N. L. SEMARNAT. Primera edición.
- Lara, C., Díaz, J., Usaquén, O. L., & Forero, L. (2002). Postratamiento del efluente de un RAFA por medio de un humedal artificial. Seminario internacional sobre tratamiento de aguas residuales y biosólidos. Ediciones Uniboyacá. ISBN: 958-95234-2-0.
- Ledbetter, j. O. (1989). Air pollution from aerobic waste treatment.
- Lloyd, B. (2005). Operation, maintenance and monitoring, Pond Treatment Technology. London, UK: IWA Publishing.
- Lloyd, J. B., Andreas, R. L., & Kandiah, G. (2006). Surveillance for Improvement of Waste Stabilisation Ponds. British Library. 1 edition. U.K. ISBN: 9972-2843-0-1.
- Metcalf, & Eddy. (2003). Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th edition. McGraw Hill, New York. ISBN: 0-07-041878-0.
- Middlebrooks, E., Middlebrooks, C., Reynold, J., Watters, G., Reed, S., & Dennis, G. (1988). Wastewater stabilization Lagoon Desing, Performance and Upgrading. Macmillan Pub.
- Moeller Ch. G., S. Y. (2011). Tratamiento de Aguas Residuales. Jiutepec, Morelos, México: IMTA.
- Moeller Gabriela., S. L. (2011). Tratamiento de aguas residuales. . Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del agua. .
- NMX-AA-003. (1980). Aguas residuales- Muestreo. Que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas.
- O'Brien, J. (1981). Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment. J. Environmental Engineering Div. ASCE, Vol. 107.
- Ramírez González , A., Pozo Román , F., & Sandoval Yoal, L. (2007). Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales por lagunas, lodos activados y filtros rociadores. Ed. IMTA.
- Rolim Mendoca, S. (2000). Sistemas de lagunas de estabilización. McGraw Hill. ISBN: 958-41-0090-4.
- Romero Rojas, J. A. (1999). Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. 3ra. Edición. Ed. Alfaomega. ISBN: 970-15-0403-8.
- S., R. R. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: 3a Ed. Editorial Reverté S. A.
- Schleypen, P. (1994). Advanced wastewater Treatment Plants in Lagoons Combined with Biological Contactors. Waste Science Technology, Vol. 29.
- SEDUE. (1985). Operación y mantenimiento de lagunas aireadas. Ed. Impresora azteca.
- SEMARNAT. (1987). NMX- AA42- SEMARNAT-1987, Calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli presuntiva.
- SEMARNAT. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

- Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Diario Oficial de la Federación.
- Shilton, A. (2005). Pond Treatment Technology. IWA Publishing.
- Sperling Von, M. (1996). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2da ed., DESA-UFMG. Belo Horizonte, 243 pp.
- Sperling Von, M. (2007). Waste Stabilization Ponds. IWA, 1 Edition. ISBN: 1843391635.
- Sullivan, R. J. (1983). Safety and Health in wastewater system. Alexandria Va.
- Water Pollution Control Federation. (1991). Operation of municipal wastewater treatment plants. Alejandria, Virginia.
- WHO. (1987). Wastewater Stabilization Ponds. WHO Environmental Technical Publication. No. 10.
- WPCF. (1977). Wastewater Treatment Plant Design., Manual of Practice., Lancaster Press Inc. .
- WPCF. (1990). Operation of municipal wastewater treatment plants, Manual of Practice No. 11- Volume I, Second Edition. Alexandria, Virginia 22314-1994 U.S.A.
- Yañez Cossío, F. (1992). Lagunas de estabilización, Ministerio de Salud Pública. Subsecretaría de Saneamiento Ambiental. Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias ISBN 9978-42-518-7.
- Water Pollution Control Federation. (1991). Operation of municipal wastewater treatment plants. Alejandria, Virginia



# TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m <sup>3</sup>	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m <sup>3</sup> /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm <sup>3</sup> /h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
cm	centímetro	Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
m	metro	°C	grados Celsius
ml	mililitro	psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
l	litro	cm/s	centímetro por segundo
m <sup>3</sup>	metro cúbico	m/s	metro por segundo
s	segundo	HP	caballo de fuerza (medida de energía)
h	hora	kW	kilowatt
d	día	UNT	unidades nefelométricas de turbiedad
mg/l	miligramo por litro		

## Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
<b>Sistema Inglés</b>	<b>Sistema métrico</b>	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

## Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm <sup>2</sup> = 100 mm <sup>2</sup>	0.15	in <sup>2</sup>
1 m <sup>2</sup> = 10 000 cm <sup>2</sup>	1.19	yd <sup>2</sup>
1 hectárea (ha) = 10 000 m <sup>2</sup>	2.47	acres
1 km <sup>2</sup> = 100 ha	0.38	mi <sup>2</sup>
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>2</sup>	6.45	cm <sup>2</sup>
1 ft <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup>	0.09	m <sup>2</sup>
1 yd <sup>2</sup> = 9 ft <sup>2</sup>	0.83	m <sup>2</sup>
1 acre = 4 840 yd <sup>2</sup>	4 046.90	m <sup>2</sup>
1 milla <sup>2</sup> = 640 acres	2.59	km <sup>2</sup>

## Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm <sup>3</sup>	0.06	in <sup>3</sup>
1 dm <sup>3</sup> = 1 000 cm <sup>3</sup>	0.03	ft <sup>3</sup>
1 m <sup>3</sup> = 1 000 dm <sup>3</sup>	1.30	yd <sup>3</sup>
1 litro (L) = 1 dm <sup>3</sup>	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in <sup>3</sup>	16.38	cm <sup>3</sup>
1 ft <sup>3</sup> = 1 728 in <sup>3</sup>	0.02	m <sup>3</sup>
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

## Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 onza (oz) = 437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

## Temperatura

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F -$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
<b>Longitud</b>				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
<b>Presión/esfuerzo</b>				
Kilogramo fuerza/cm <sup>2</sup>	kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada <sup>2</sup>	lb/ plg <sup>2</sup> , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H <sub>2</sub> O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
<b>Fuerza/ peso</b>				
kilogramo fuerza	kg <sub>f</sub>	9.80	newton	N
<b>Masa</b>				
libra	lb	0.45	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>	9.80	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
libra /ft <sup>3</sup>	lb/ft <sup>3</sup>	157.08	N/m <sup>3</sup>	N/m <sup>3</sup>
<b>Potencia</b>				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
<b>Viscosidad dinámica</b>				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
<b>Viscosidad cinemática</b>				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m <sup>2</sup> /s (St)
<b>Energía/ Cantidad de calor</b>				
caloría	cal	4.18	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>

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	ha	mi <sup>2</sup>	acre	ft <sup>2</sup>	in <sup>2</sup>
cm <sup>2</sup>	1.00						0.001	0.155
m <sup>2</sup>	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km <sup>2</sup>			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi <sup>2</sup>			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft <sup>2</sup>	929.03	0.09					1.000	0.007
in <sup>2</sup>	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	L	ft <sup>3</sup>	gal. EUA	acre-ft	in <sup>3</sup>	yd <sup>3</sup>
cm <sup>3</sup>	1.000		0.001				0.061	
m <sup>3</sup>		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft <sup>3</sup>		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in <sup>3</sup>	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd <sup>3</sup>		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm <sup>3</sup> /s	gal/día	gal/min	l/min	m <sup>3</sup> /día	m <sup>3</sup> /h	ft <sup>3</sup> /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm <sup>3</sup> /s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m <sup>3</sup> /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m <sup>3</sup> /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft <sup>3</sup> /s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo			
de	a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie		1.000	0.206
l/s/m		4.840	1.000

Permeabilidad							
de	a	cm/s	gal/día/Pie <sup>2</sup>	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie <sup>2</sup>			1.000		0.041		0.055
millón gal/día/acre				1.000	0.935		
m/día		0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s		30.480			26 334.72	1.000	
Darcy			18.200		0.740		1.000

Peso									
de	a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)		1.000	0.065						
Gramo (g)		15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)			1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)			453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)		437.500	28.350			1.000			
t corta				907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga				1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica				1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia									
de	a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV		1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP		1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW		1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W				0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s					1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s		0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s		1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s		5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión								
de	a	atmósfera	Kg/cm <sup>2</sup>	lb/in <sup>2</sup>	mm de Hg	in de Hg	m de H <sub>2</sub> O	ft de H <sub>2</sub> O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm <sup>2</sup>		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in <sup>2</sup>		0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg		0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg		0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua		0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua		0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía									
de	a	CV hora	HP hora	kW hora	J	ft.lb	kgm	BTU	kcal
CV hora		1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora		1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora		1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J					1.000	0.738	0.102		
ft.lb					1.356	1.000	0.138		
kgm					9.806	7.233	1.000		
BTU					1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal					4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad				
de	a	cm <sup>2</sup> /s	gal/día/pie	m <sup>2</sup> /día
cm <sup>2</sup> /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m <sup>2</sup> /día		0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.176	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F} = 9/5^{\circ}\text{C} + 32$
Fahrenheit a Centígrados	$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$
Réaumur a Centígrados	$^{\circ}\text{C} = 5/4 ^{\circ}\text{R}$
Fahrenheit a Réaumur	$^{\circ}\text{R} = 4/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$
Réaumur a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F} = (9/4^{\circ}\text{R}) + 32$
Celsius a Kelvin	$^{\circ}\text{K} = 273.15 + ^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit a Rankine	$^{\circ}\text{Ra} = 459.67 + ^{\circ}\text{F}$
Rankine a Kelvin	$^{\circ}\text{K} = 5/9^{\circ}\text{Ra}$

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	epm a ppm	ppm a epm	epm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO <sub>3</sub>
calcio Ca <sup>+2</sup>	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe <sup>+2</sup>	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg <sup>+2</sup>	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K <sup>+1</sup>	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na <sup>+1</sup>	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO <sub>3</sub> ) <sup>-2</sup>	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) <sup>-1</sup>	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) <sup>-1</sup>	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrate (NO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO <sub>4</sub> ) <sup>-3</sup>	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup>	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl <sub>2</sub> )	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) <sub>2</sub>	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO <sub>4</sub> )	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe <sub>2</sub> (CO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO <sub>3</sub> )	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl <sub>2</sub> )	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) <sub>2</sub>	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO <sub>4</sub> )	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO<sub>3</sub> = partes por millón de carbonato de calcio



# ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Esquema de una laguna anaerobia	2
Ilustración 1.2 Laguna anaerobia	2
Ilustración 1.3 Esquema de una laguna facultativa	3
Ilustración 1.4 Esquema de una laguna facultativa	3
Ilustración 1.5 Imagen de una laguna facultativa	5
Ilustración 1.6 Esquema del funcionamiento de una laguna facultativa	5
Ilustración 1.7 Esquema de una laguna de maduración	6
Ilustración 1.8 Imagen de una laguna de maduración	6
Ilustración 2.1 Variación del gasto del afluente a una planta de tratamiento de aguas residuales	9
Ilustración 2.2 Variación de la temperatura del agua en una laguna de estabilización	12
Ilustración 2.3 Variación de la temperatura ambiente en una laguna de estabilización primaria	13
Ilustración 2.4 Variación de la temperatura del agua en una laguna de estabilización terciaria	13
Ilustración 2.5 Perfil de temperatura en una laguna facultativa	14
Ilustración 2.6 Variación del pH en una laguna de estabilización primaria	16
Ilustración 2.7 Variación de pH en una laguna de estabilización terciaria	16
Ilustración 2.8 Variación de la conductividad en una laguna de estabilización primaria	17
Ilustración 2.9 Variación de la conductividad en una laguna de estabilización terciaria	17
Ilustración 2.10 Concentración de oxígeno disuelto en una laguna	18
Ilustración 2.11 Algas, intensidad de luz y oxígeno disuelto como una función de la profundidad de la laguna	19
Ilustración 2.12 Variación horaria de oxígeno disuelto en una laguna de estabilización terciaria	19
Ilustración 2.13 Perfil de oxígeno disuelto en un punto cercano a la estructura de salida de una laguna facultativa	20
Ilustración 2.14 Influencia de la carga orgánica aplicada a la laguna y la hora del día sobre el espesor de las capas aerobias y anaerobias	20
Ilustración 2.15 Microbiología de la laguna facultativa	23
Ilustración 2.16 Estratificación en lagunas de oxidación	24
Ilustración 2.17 Muestra del color verde en el efluente de una laguna facultativa	26
Ilustración 2.18 Coloración verde del efluente de una laguna	27
Ilustración 2.19 Medición de la profundidad de lodos en una laguna de estabilización	28
Ilustración 2.20 Varilla que muestra la profundidad de lodo en una laguna	29
Ilustración 2.21 Puntos de muestreo en un sistema lagunar	30
Ilustración 3.1 Vista de los bordes de dos lagunas	36
Ilustración 3.2 Bordo con falta de mantenimiento, se observa grava y material de construcción sobre la geomembrana	37
Ilustración 3.3 Vegetación cercana a la geomembrana	37

Ilustración 3.4 Vista de entrada a una laguna de maduración	38
Ilustración 3.5 Laguna azolvada, crecimiento de vegetación en bordes y dentro de la laguna	39
Ilustración 4.1 Laguna anaerobia con crecimiento de vegetación	42
Ilustración 4.2 Laguna anaerobia con crecimiento de vegetación en bordos	42
Ilustración 4.3 Flujo del agua residual para dos y tres estanques de lagunas	44
Ilustración 4.4 Flujo del agua residual para cuatro estanques de lagunas	45
Ilustración 4.5 Crecimiento de vegetación y de algas en una laguna de estabilización	47
Ilustración 4.6 Laguna facultativa con mamparas y crecimiento de vegetación en la mamparas	48
Ilustración 4.7 Crecimiento de vegetación en laguna facultativa	49
Ilustración 4.8 Laguna con materia flotante, crecimiento de maleza y deterioro del borde	50
Ilustración 4.9 Laguna de estabilización con crecimiento de vegetación y afectación del bordo	50
Ilustración 4.10 Entrada de agua al canal de recolección	51
Ilustración 4.11 Laguna de estabilización con varias estructuras de entrada	52
Ilustración 4.12 Laguna de estabilización con mamparas	53
Ilustración 4.13 Esquemas de alternativas de recirculación de efluentes en lagunas de estabilización	54
Ilustración 4.14 Laguna de estabilización con diferentes esquemas de recirculación	55
Ilustración 4.15 Estructura de una laguna con acumulación de basura	55
Ilustración 4.16 Laguna de estabilización que presenta malezas en el borde de concreto	56
Ilustración 4.17 Estructura superficial en una laguna y presencia de vegetación en los bordos	56
Ilustración 4.18 Estructura de salida de una laguna de estabilización que requiere operación y mantenimiento	57
Ilustración 4.19 Coloración en laguna facultativa	57
Ilustración 5.1 Llenado de una laguna y cubierta con geomembrana	63
Ilustración 6.1 Malla perimetral de una laguna	68
Ilustración 6.2 Entrada y caseta de vigilancia de la planta de tratamiento de aguas residuales	68

## TABLAS

Tabla 2.1 Factores ambientales para la fermentación del metano	25
Tabla 2.2 Parámetros de control en las lagunas de estabilización (rango normal)	26
Tabla 2.3 Programa de muestreo de una laguna anaerobia	30
Tabla 2.4 Programa de muestreo en laguna facultativa	31
Tabla 2.5 Programa de muestreo en laguna de maduración	31
Tabla 2.6 Rango normal de los parámetros de operación de lagunas	32
Tabla 2.7 Personal para los sistemas de lagunas de estabilización	33
Tabla 2.8 Ropa de protección para el personal de operación y mantenimiento en lagunas de estabilización	33
Tabla 2.9 Equipo de medición de parámetros de campo	33
Tabla 3.1 Resumen de las principales actividades para el mantenimiento de los sistemas de Lagunas de estabilización de residuos	40
Tabla 4.1 Problemas de malos olores en lagunas de estabilización y posibles soluciones	46
Tabla 4.2 Problemas de proliferación de insectos de las lagunas y sus posibles soluciones	47
Tabla 4.3 Problemas de crecimiento de la vegetación en las lagunas y sus posibles soluciones	48
Tabla 4.4 Principales problemas de operación de las lagunas y sus posibles soluciones	49
Tabla 4.5 Problemas de alta concentración de algas y sus posibles soluciones	51
Tabla 4.6 Problemas de presencia de cianobacterias en lagunas y sus posibles soluciones	52
Tabla 4.7 Principales problemas de operación de las lagunas facultativas y sus posibles soluciones	58
Tabla 4.8 Indicadores importantes para la solución de problemas en lagunas de estabilización	58
Tabla 5.1 Actividades de verificación antes del arranque de una laguna de estabilización	62
Tabla 5.2 Formato registro de seguimiento del arranque de una laguna de estabilización	63
Tabla A.1 Ejemplo de una hoja de informe de operación semanal. Fuente	71
Tabla A.2 Ejemplo de una lista de operación y mantenimiento en las lagunas	72
Tabla A.3 Formato para la descripción física del sistema lagunar	74
Tabla A.4 Formato para la descripción física del sistema lagunar	75
Tabla A.5 Formato para la descripción física del sistema lagunar a evaluar	76
Tabla A.6 Ejemplo de una hoja de informe de operación y mantenimiento semanal	77
Tabla A.7 Ejemplo de una lista de operación y mantenimiento en las lagunas	78



