

En esta sección hace falta las páginas 94-95 por problemas del original.

7. Lagunas de maduración

INTRODUCCION

Las lagunas de maduración tienen como objetivo primordial la eliminación de bacterias patógenas. Estas lagunas operan siempre al menos como lagunas secundarias, es decir, como mínimo el agua residual ha pasado otro tratamiento antes de ser introducida en ellas.

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

Además de su efecto desinfectante, las lagunas de maduración cumplen otros objetivos, como son la nitrificación del nitrógeno amoniacal, cierta eliminación de nutrientes, clarificación del efluente y consecución de un efluente bien oxigenado.

TRATAMIENTO EN LAGUNAS DE MADURACION

En cuanto a su aspecto físico, las lagunas de maduración son muy similares a las facultativas, y en muchas ocasiones tienen incluso el mismo tamaño y profundidad



Foto 1.2. Efluente de una laguna de maduración (cortesía de TRAGSA)

Debido a que la alimentación de estas lagunas presenta un alto grado de estabilización de la materia orgánica, la demanda de oxígeno disuelto es mucho menor que en las facultativas, y la fotosíntesis y aireación superficial permiten obtener un ambiente aerobio en toda la columna de agua (Dinges, 1982; Mara, 1976; W. H. O., 1987).

A continuación veremos los factores que influyen sobre los distintos aspectos de la depuración alcanzada en este tipo de lagunas.

Eliminación de patógenos

Como veíamos en el capítulo dedicado al agua residual, las bacterias coliformes se utilizan como indicadores de la calidad del agua desde el punto de vista de su contaminación por microorganismos patógenos, es decir, causantes de enfermedades. Su eliminación en las lagunas de maduración se debe a la acción combinada de varios factores, que en conjunto crean unas condiciones muy desfavorables para su supervivencia (Bowles y col., 1979). Los factores que afectan a la desaparición de microorganismos patógenos en las lagunas de maduración pueden dividirse en las categorías siguientes:

TABLA 7.1.
Factores que influyen en la eliminación de patógenos en lagunas de maduración

Físicos
— Temperatura.
— Sedimentación.
Físico-químicos
— Salinidad
— pH.
— Oxígeno disuelto
— Intensidad de la radiación solar
Bioquímicos
— Concentración de nutrientes.
— Presencia de tóxicos
Biológicos
-- Presencia de predadores.

- **Físicos:** La temperatura y sedimentación son los dos factores más importantes (Gannon y col., 1983). La sedimentación consiste en la incorporación al fondo de la laguna de agregados de microorganismos, debido a que su peso específico es mayor que el del agua. Una vez que se produce su depósito en el fondo, estos agregados son atacados por bacterias que se desarrollan en la capa de fango, y finalmente desaparecen. Como ocurre con todos los procesos biológicos, la temperatura es un factor muy importante en la velocidad de desaparición de microorganismos patógenos. La velocidad de eliminación de patógenos aumenta con la temperatura (Lantrip, 1983). Por tanto, la eficacia en la reducción de patógenos es máxima durante los meses de verano.
- **Físico-químicos:** La salinidad del agua, pH, concentración de oxígeno disuelto e intensidad de la luz solar son los factores físico-químicos más influyentes.

El tiempo de supervivencia de los microorganismos patógenos varía inversamente con la salinidad del medio (Mitchell y Chamberlin, 1978). Puesto que las lagunas de maduración son la última etapa del tratamiento, la evaporación en estas lagunas y en las etapas anteriores determina un aumento en la concentración de sales que resulta beneficioso desde este punto de vista. Sin embargo, este aumento de salinidad puede ser perjudicial si el efluente va a utilizarse en riegos.

La eliminación de patógenos aumenta con el pH de la laguna. Como veíamos en el capítulo anterior, la actividad del fitoplancton da lugar a un aumento del pH, mientras que la actividad metabólica de las bacterias genera CO_2 que provoca una descenso en el pH. Puesto que en las lagunas de maduración la carga orgánica es muy baja, se produce una generación muy escasa de CO_2 . Por otra parte, la actividad fotosintética suele ser bastante elevada, por lo que globalmente se suele apreciar un aumento de pH con respecto a las lagunas facultativas, que se traduce en un medio más desfavorable para la supervivencia de los microorganismos patógenos (Mitchell y Chamberlin, 1978).

La presencia de oxígeno disuelto, y sobre todo el efecto de choque del paso entre lagunas facultativas con concentraciones bajas o moderadas de oxígeno a lagunas

de maduración con concentraciones elevadas, da lugar a un aumento en la velocidad de eliminación de patógenos (Kott, 1982).

Uno de los principales factores es la intensidad de la luz (Kapucinski y Mitchell, 1981; Krinsky, 1977; Stracki, 1980). La eliminación de patógenos es mucho más rápida en presencia de luz, por lo que debe evitarse la construcción de lagunas de maduración profundas en las que buena parte de la columna de agua se encuentra en la oscuridad. Por la misma razón, la eliminación de patógenos es mucho más eficaz en días despejados, especialmente al comienzo del verano, cuando la duración del día es máxima.

- **Factores bioquímicos.** La concentración de nutrientes, presencia de compuestos tóxicos y predadores son los principales factores bioquímicos implicados en la eliminación de patógenos

La limitación en nutrientes es un factor muy importante, no sólo por su efecto directo sobre la posibilidad de crecimiento de los microorganismos patógenos, sino por la competencia con otros microorganismos mejor adaptados que aquellos al medio (Mitchell y Chamberlin, 1978; Dutka y Kwan, 1983). La escasa concentración de materia orgánica en estas lagunas constituye un serio obstáculo para la supervivencia de los microorganismos heterótrofos como los que se pretende eliminar en esta etapa del tratamiento (bacterias, protozoos y hongos)

Las algas secretan sustancias tóxicas que afectan a los microorganismos patógenos, algunas de ellas muy activas en presencia de la luz (Mitchell y Chamberlin, 1978)

Por último, la presencia de predadores como protozoos, bacteriófagos, microcrustáceos y rotíferos da lugar a una fuerte reducción en las bacterias patógenas (Dinges, 1982)

Nitrificación

Aunque la conversión biológica de nitrógeno amoniacal a nitratos puede iniciarse en las lagunas facultativas cuando la concentración de oxígeno disuelto es suficientemente elevada, el medio aerobio propio de las lagunas de maduración es mucho más adecuado para el desarrollo de las bacterias nitrificantes. Esta conversión tiene gran importancia para impedir el acceso del nitrógeno amoniacal a cursos de agua receptores donde puedan tener efectos tóxicos sobre la fauna (muchos peces presentan una tolerancia muy baja a la presencia de amoníaco en el agua) (U. S. Environmental Protection Agency, 1984)

Por otra parte, aunque las oscilaciones de oxígeno disuelto durante el día son menos acusadas que en las lagunas facultativas, también se producen descensos durante la noche. Cuando estos descensos dan lugar a concentraciones nulas de oxígeno se inicia el ciclo nitrificación-desnitrificación, que conduce a una pérdida neta de nitrógeno hacia la atmósfera. Con este fenómeno se consigue una reducción neta de nutrientes, con efectos beneficiosos para los cursos de agua donde vaya a verterse el efluente final.

Reducción de nutrientes

El descenso en la concentración de nutrientes solubles observado en las lagunas de maduración se debe fundamentalmente al consumo por el fitoplancton, posible desnitrificación durante la noche y a la precipitación de sales insolubles de fósforo que se incorporan al sedimento.

Además de los efectos principales de las lagunas de maduración recogidos en este capítulo, estas lagunas pueden suplir en parte el mal funcionamiento de las lagunas facultativas, permitiendo así obtener un efluente de calidad aceptable durante épocas del año en las que la depuración es muy lenta, o ayudando a absorber puntas de carga y caudal. Aunque esto no es el objetivo para el que se constituyen las lagunas de maduración, puede resultar muy conveniente su presencia ante situaciones excepcionales. Por otra parte, las lagunas de maduración garantizan que el efluente final va a contener una cantidad aceptable de oxígeno disuelto durante todo el año, especialmente en situaciones de sobrecarga.

Finalmente, otro efecto de las lagunas de maduración es la clarificación del efluente, sobre todo cuando se cuenta con varios módulos en serie. Este efecto se consigue debido a la sedimentación de las algas, presencia de predadores como la pulga de agua y el empobrecimiento del agua en nutrientes que impide nuevos crecimientos de microorganismos.

DISEÑO DE LAGUNAS ANAEROBIAS

El diseño de lagunas anaerobias se lleva a cabo mediante procedimientos empíricos. Los parámetros de diseño más adecuados para lagunas anaerobias son la carga volumétrica y el tiempo de retención hidráulico, ya que como vimos en el capítulo 5, la depuración en medio anaerobio es independiente de los fenómenos de superficie (oxidación, fotosíntesis) que desempeñan un papel primordial en las lagunas facultativas y de maduración (W. H. O., 1987; Mara, 1976; Middlebrooks y col., 1982; Gloyna, 1973).

A pesar de esto, existen varios procedimientos basados en la carga superficial necesaria para mantener una laguna en condiciones anaerobias, aunque los datos sugeridos por distintos autores varían enormemente. Por ejemplo, Eckenfelder (1970) presenta datos relativos a lagunas anaerobias con cargas superficiales entre 280-4.500 kg DBO₅/ha día y profundidades entre 2,5-5 m, en las que se alcanzan reducciones en la DBO₅ entre 50-80 %. Otros estudios (Yáñez, 1980) sugieren un límite inferior de 1.000 kg DBO₅/ha día para mantener el medio anaerobio. La Agencia de Protección de Medio Ambiente de Estados Unidos sugiere un intervalo de 220-1.100 kg DBO₅/ha día (U. S. Environmental Protection Agency, 1977).

En cuanto a procedimientos basados en la carga volumétrica, se han sugerido distintos intervalos y límites. En la tabla 8.1 se han recogido algunos de estos datos y los estudios de los que proceden.

TABLA 8.1
Intervalos de carga volumétrica recomendados para el diseño de lagunas anaerobias

Carga volumétrica g DBO ₅ /m ³ /día	Referencia
40-250	Bradley y Senra, 1976.
125	Gloyna, 1973.
<300	Mara, 1976.
368-500	Parker, 1970.
90-350	Oswald, 1968.
200-500	Cooper, 1968.

Por último, el tiempo de retención hidráulica es el parámetro de diseño más utilizado para lagunas anaerobias. Sin embargo, y como ocurre en los casos anteriores, la variabilidad de los datos presentados por distintos autores es muy grande. Por tanto, el proyectista debe seleccionar cuidadosamente entre los diferentes métodos existentes aquellos que se hayan deducido en las condiciones más similares a las de la planta que se proyecta. En la tabla 8.2 se han recogido los intervalos de tiempo de retención recomendados por distintos autores. Los datos más elevados (50 días) corresponden a observaciones experimentales en climas fríos y deben, en consecuencia, interpretarse teniendo en cuenta que la actividad anaerobia se paraliza prácticamente por debajo de 10° C (W. H. O., 1987).

TABLA 8.2
Tiempos de retención hidráulica recomendados para el diseño de lagunas anaerobias

Tiempo de retención (días)	Referencia
5-50	Eckenfelder, 1970.
5	Mara, 1976.
2-5	Parker y cols., 1959
30-50	Eckenfelder, 1961.
2-5	Malina y Ríos, 1976.

En cuanto a la eliminación de materia orgánica como DBO_5 , los valores encontrados oscilan entre 50 % en invierno y 80 % en verano, con temperaturas superiores a 25° C (W. H. O., 1987). Basándose en los resultados obtenidos en el estudio de fosas sépticas en Estados Unidos y Zambia, se ha sugerido la siguiente fórmula empírica para la reducción de materia orgánica en lagunas anaerobias en función del tiempo de residencia (Middlebrooks y col., 1982):

$$L_p = \frac{L_0}{k_n (L_p/L_0)^n R + 1} \quad (8.1)$$

donde L_0 = DBO_5 del influente (mg/l);
 L_p = DBO_5 del efluente (mg/l);
 R = tiempo de retención (días);
 n = exponente empírico, adimensional, y
 k_n = coeficiente de diseño, adimensional.

Esta ecuación se considera válida en climas tropicales y subtropicales.

Como puede verse a partir de los datos anteriores, la gran variabilidad en los métodos propuestos por diferentes autores introduce un elevado nivel de incertidumbre a la hora del diseño de lagunas anaerobias. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de reunir datos fiables en España que permitan establecer los intervalos aceptables de diseño para las condiciones ambientales en distintas regiones.

Con el fin de proporcionar unas líneas maestras básicas para el diseño de lagunas anaerobias, la Organización Mundial de la Salud (W. H. O., 1987) propone los siguientes criterios para temperaturas superiores a 22° C:

- Carga volumétrica inferior a 300 g DBO_5/m^3 día, y/o
- Tiempo de retención del orden de 5 días;
- Eliminación de DBO_5 del orden del 50 %;
- Profundidad entre 2,5 y 5 m.

Estos criterios son conservativos, pero proporcionan una primera aproximación al diseño en ausencia de datos específicos. Además, la OMS recomienda que se cuente con al menos dos lagunas anaerobias en paralelo para asegurar la continuidad de la operación en caso de limpieza y retirada de los fangos en una de las dos unidades. La frecuencia con que ha de llevarse a cabo esta limpieza

Se calcula en base a una acumulación media de 40 litros de fango por persona y año. Se recomienda que la limpieza se lleve a cabo cuando el volumen de fangos acumulado es igual a la mitad del volumen de la laguna anaerobia. Por tanto, el intervalo en años en que debe limpiarse la laguna es el siguiente:

$$T = \frac{\text{Volumen de la laguna (m}^3\text{)}}{2 (\text{velocidad de acumulación de fango, m}^3/\text{hab./año}) (\text{población})} \quad (8.2)$$

DISEÑO DE LAGUNAS FACULTATIVAS

Se han propuesto numerosos métodos de diseño de lagunas facultativas, que pueden clasificarse en las categorías siguientes:

1. Métodos empíricos. Estos métodos consisten en relaciones matemáticas sencillas deducidas de las observaciones experimentales realizadas en un determinado estanque de estabilización, o en un grupo de ellos que trabajan en condiciones muy similares, tanto respecto a la climatología como a la alimentación. Puesto que en estas circunstancias se puede hacer abstracción de todas las variables iguales, el método empírico utiliza como variables de diseño sólo un grupo reducido de los factores que afectan a la depuración en lagunas, especialmente caudal, tiempo de residencia y carga aplicada. El parámetro fundamental de diseño lo constituye la reducción en una de las medidas de la carga orgánica, normalmente demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

2. Métodos «racionales». Este grupo de métodos debe su nombre al hecho de que se ha intentado ofrecer en ellos una explicación en términos cinéticos de lo que ocurre en los estanques de estabilización. Normalmente se basan también en la reducción experimentada por una sola variable indicativa de la carga orgánica, y se fundamentan en hipótesis restrictivas, que facilitan en gran medida los cálculos, a costa de pérdida de rigor en la caracterización de los estanques. Entre estas hipótesis se encuentran las siguientes:

- La composición de la alimentación se considera constante a lo largo del año.
- El régimen hidráulico corresponde a un modelo ideal de flujo.
- No se producen sedimentaciones parciales de la materia orgánica hacia el fango del fondo, es decir, no se define el sistema detrítico.
- Las pérdidas por infiltración en el terreno y evaporización se consideran despreciables, o se compensan por los aportes por precipitación.

Las lagunas funcionan en régimen estacionario

- La cinética de la depuración es de primer orden, con una constante de velocidad que se define normalmente como función exponencial de la temperatura.

3. Modelos matemáticos. Aunque en realidad son una subcategoría de los métodos racionales, estos métodos de diseño presentan características muy diferentes en

cuanto a las hipótesis utilizadas para describir la depuración en lagunas. Fundamentalmente, en ellos se considera que las lagunas son sistemas dinámicos, con cinéticas complejas y regímenes no ideales de flujo. Estos métodos se basan en la modelización matemática de las interacciones físico-químicas y biológicas responsables de la depuración en lagunas. Su complejidad es mucho mayor, ya que describen en forma dinámica la relación simbiótica existente entre bacterias y fitoplancton, para lo que es necesario llevar a cabo un balance de materia de las distintas especies químicas y biológicas presentes en el sistema (Fritz y col., 1979; Ferrata y Harleman, 1980; Buhr y Miller, 1983; Soniya y Fuji, 1984; Moreno y col., 1988).

A continuación se describen brevemente los métodos empíricos y racionales más utilizados hasta la fecha para el diseño de lagunas facultativas.

Métodos empíricos

Entre los métodos empíricos, la utilización de un intervalo admisible de carga superficial es el criterio de diseño que los proyectistas utilizan con más frecuencia. Como ocurría en las lagunas anaerobias, existe una gran diversidad de intervalos recomendados por distintos autores, como consecuencia de la variedad de situaciones en las que éstos se han deducido. La Organización Mundial de la Salud (W. H. O., 1987) recomienda para climas templados un intervalo de 200-400 kg DBO₅/ha día.

Otros métodos empíricos consisten en ecuaciones deducidas a partir de los datos recogidos en varias lagunas que operan en condiciones similares. Entre estos métodos, los más conocidos son los siguientes:

- *Ecuación de Arceivala* (W. H. O., 1987). Esta ecuación relaciona la carga superficial admisible con la latitud de la laguna. Se dedujo a partir de datos recogidos en India, y en principio, por tanto, es aplicable al diseño en este país, y en un intervalo de latitud entre 8° N-36° N:

$$L \text{ (Kg DBO}_5\text{/ha día)} = 375 - 6,25 \text{ (latitud)}$$

En esta ecuación, la latitud viene a representar las variaciones en temperatura en las distintas zonas. Desde este punto de vista, esta ecuación y la de McGarry-Pescod que veremos a continuación son conceptualmente análogas.

- *Método de McGarry y Pescod* (1970). El análisis de datos operativos de lagunas facultativas situadas en zonas geográficas muy diversas muestra que la carga superficial máxima que puede aplicarse a una laguna antes de que ésta entre en anaerobiosis se relaciona con la temperatura media mensual del aire en la forma siguiente:

$$L_{\text{max}} = 11.2 (1,054)^T$$

Puesto que la carga admisible máxima aumenta con la temperatura, en el diseño se utiliza la aproximación más conservativa, para la cual se toma la temperatura media del mes más frío. Sin embargo, la carga máxima admisible calculada de esta forma daría lugar a una laguna que estaría en el límite de lo tolerable al menos durante un mes al año. Para evitar anaerobiosis es necesario intro-

ducir un factor de seguridad (Mara, 1976), con lo que la ecuación anterior quedaría:

$$L_{max} = 7,5 (1,054)^T \quad (8.5)$$

TABLA 8.3
Métodos empíricos de diseño de lagunas facultativas

Método	Criterio o ecuación	Intervalo de aplicabilidad
Organización Mundial de la Salud, 1987. Arceivala, 1970	Carga superficial 200-400 kg DBO ₅ /ha/día. L (kg. DBO ₅ /ha/día) = 375-6,25 (latitud)	Climas templados y cálidos. India Lat.: 6° N - 36° N.
McGarry-Pescod.	L_{max} (kg. DBO ₅ /ha/día) = 11,2 (1.054) ^T	Carga superficial: 140-280 kg/ha/día.
McGarry-Pescod modificado (Mara, 1976).	L_{max} (kg. DBO ₅ /ha/día) = 7,5 (1.054) ^T	Carga superficial: 140-280 kg/ha/día.
Larsen, 1974.	$MOT = (2,468^{RED} + 2,468^{TTC} + 23,9/TEMPR + 150,0/DRY) \times 10^6$	Climas templados.
Gluyas, 1973.	$V = 3,5 \times 10^{-3} QL_0 \theta^{(35-T)/10}$	Climas cálidos y templados.

En estudios subsiguientes se ha puesto de manifiesto que esta ecuación no resulta adecuada para el diseño de lagunas que reciben poca carga (14,1-27,2 kg/Ha. día) (Finney y Middlebrooks, 1982). Sin embargo, para cargas superficiales unas diez veces superiores en climas cálidos se considera que este método produce resultados adecuados (W. H. O., 1987).

- *Método de Larsen.* El área necesaria para conseguir una reducción prefijada en materia orgánica en una laguna de estabilización facultativa se calcula mediante la expresión siguiente:

$$MOT = (2,468^{RED+37} + 2,468^{TTC} + 23,9/TEMPR + 150,0/DRY) 10^6 \quad (8.6)$$

donde las distintas variables se definen en la forma siguiente:

$$MOT = \frac{\text{Área (radiación solar)}^{1/3}}{\text{Caudal influente (DBO}_5 \text{ infl.)}^{1/3}}$$

$$RED = \frac{DBO_{5 \text{ infl}} - DBO_{5 \text{ eff}}}{DBO_{5 \text{ infl}}}$$

$$TTC = \frac{\text{Velocidad viento (DBNO}_5 \text{ infl.)}^{1/3}}{(\text{radiación solar})^{1/3}}$$

$$TEMPR = \frac{\text{Temperatura agua}}{\text{Temperatura aire}}$$

DRY = humedad relativa

El cálculo del área necesaria se hace aplicando esta ecuación en las condiciones más desfavorables: intensidad de la radiación solar y temperatura media en invierno, carga orgánica máxima, etc. (Larsen, 1974).

- *Método de Gloyna*. Este método se desarrolló a partir de numerosos experimentos en lagunas y ensayos de laboratorio. Este autor recomienda utilizar como variable de diseño la demanda bioquímica de oxígeno a tiempo infinito o la demanda química de oxígeno, justificando esta elección en los elevados tiempos de retención en las lagunas facultativas. Sin embargo, la DBO₅ se puede utilizar en el caso de efluentes pretratados, como sería el caso cuando se cuenta con una primera etapa en lagunas anaerobias. Para aguas residuales urbanas no tratadas, la demanda bioquímica a tiempo infinito varía entre 1,1×DBO₅ y 1,7×DBO₅ (Gloyna, 1973). La ecuación de diseño propuesta es la siguiente:

$$V = 3,5 \times 10^{-5} Q L_u \theta^{(55-T)} f f' \quad (8.7)$$

- donde V = volumen de la laguna, m³;
 Q = caudal de agua residual, l/día;
 L_u = demanda bioquímica de oxígeno a tiempo infinito o demanda química de oxígeno, mg/l;
 θ = coeficiente de temperatura, adimensional;
 T = temperatura del agua, ° C;
 f = factor de toxicidad para las algas;
 f' = factor de corrección por compuestos químicos reductores.

En cuanto a la profundidad de la laguna, se determina una vez calculado el volumen necesario en base al tipo de agua residual, contenido en sólidos sedimentales, temperatura y condiciones climáticas.

La OMS recomienda el uso de los métodos de Gloyna o de McGarry-Pescod, en función de la carga orgánica a depurar y de la localización geográfica de las lagunas, cuando no se dispone de datos específicos fiables (W. H. O., 1987).

Métodos racionales

Los métodos más utilizados en esta categoría son los siguientes:

- Marais (1970) y Eckenfelder (1972), entre otros, proponen la expresión siguiente, basada en la hipótesis de mezcla completa, estado estacionario y cinética de depuración de primer orden:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{k(V/Q_0) + Q_0/Q_0} \quad (8.8)$$

- donde C = DBO₅ del efluente, mg/l;
 C₀ = DBO₅ del influente, mg/l;
 k = constante cinética de primer orden, día⁻¹;
 V = volumen de la laguna,
 Q₀ = caudal de alimentación, m³ día⁻¹;
 Q_e = caudal de salida, m³ día⁻¹.

Tabla 8.4
Métodos racionales de diseño de lagunas facultativas

Método	Ecuación	Hipótesis
Marais, 1970 Eckenfelder, 1972	$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{k\tau + 1}$	Mezcla completa. Estado estacionario. Cinética 1.º orden.
Thirumurthi, 1974.	$\frac{C}{C_0} = e^{-k\tau}$	Flujo pistón. Estado estacionario. Cinética 1.º orden.
Uhlmann, 1979.	$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{(1 + k\tau/n)^n}$	Reactores en serie en mezcla completa. Estado estacionario. Cinética 1.º orden.
Thirumurthi, 1974. Uhlmann, 1979.	$\frac{C}{C_0} = \frac{4ae^{1/2}d}{(1+a)^2 e^{n/2d} - (1-a)^2 e^{-n/2d}}$	Flujo en dispersión. Estado estacionario. Cinética 1.º orden.

La forma más frecuente de la ecuación anterior es:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{k\tau + 1} \quad (8.9)$$

donde se han hecho las simplificaciones siguientes

$V/Q_0 = \tau$, tiempo de residencia hidráulica, y
 $Q_e = Q_0$, los caudales de entrada y salida son iguales.

- En otros casos (Thirumurthi, 1974) la ecuación de diseño se basa en las hipótesis de régimen estacionario, flujo, pistón y cinética de primer orden. La expresión correspondiente sería:

$$\frac{C}{C_0} = e^{-k\tau}$$

- Cuando se adopta el modelo de tanques en mezcla completa en serie para describir el flujo en las lagunas, junto a las hipótesis de régimen estacionario y cinética de primer orden, la expresión de diseño es (Uhlmann, 1979):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{(k\tau/n)^n} \quad (8.11)$$

- Uhlmann (1979) y Thirumurthi (1974) sugieren el método basado en considerar el estanque como sujeto a flujo de dispersión, en régimen estacionario y cinética de primer orden, al que consideran más preciso al considerar un régimen de flujo no ideal en las lagunas.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{4ae^{1/2}d}{(1+a)^2 e^{n/2d} - (1-a)^2 e^{-n/2d}} \quad (8.12)$$

donde k = constante cinética, día⁻¹,

$$a = (1 + kd)^{1/2};$$

$d = D/UL_t = 1/Pe$, coeficiente de dispersión adimensional.

U = velocidad media del fluido, m/h,

L_t = longitud del trayecto hidráulico, m;

Pe = número de Peclet, adimensional,

D = coeficiente de dispersión axial, m²/h

La evaluación de cualquiera de estas expresiones pasa por la definición de la constante de velocidad. Normalmente, ésta se considera función únicamente de la temperatura. Para definir esta dependencia se utiliza una modificación de la ecuación de Arrhenius, válida para pequeños intervalos de temperatura, como los que se producirían en lagunas de estabilización (en España, entre 5-30° C. aproximadamente):

$$k = k_0 \theta^{(T-T_0)} \quad (8.13)$$

donde k_0 = valor de la constante de velocidad a la temperatura de referencia T_0 , día⁻¹,

T = temperatura, ° C,

En otras ocasiones, el efecto de factores como toxicidad, intensidad luminosa o características hidráulicas se engloba dentro de la constante de velocidad (Thurumuthi, 1974). Los factores ambientales se incluyen así dentro del método de diseño mediante la definición de un ambiente standard, que consiste en:

- Temperatura de 20° C en la laguna.
- Carga orgánica de 672 kg de DBO₅/ha día
- Ausencia de agentes químicos tóxicos.
- Radiación solar mínima de 100 cal/cm² día.
- Ausencia de carga orgánica debida a la regeneración desde el fango acumulado en el fondo.

La constante de velocidad en este caso se define en la forma siguiente:

$$k = k_{20} C_{T_2} C_{C_0} C_{T_{0x}} \quad (8.14)$$

donde C_{T_2} = factor de corrección por temperatura, definido conforme a la ecuación de Arrhenius modificada (ecuación 5);

C_{C_0} = factor de corrección por carga orgánica aplicada, calculado en la forma:

$$C_{C_0} = 1 - 0,083/k_{20} \log (672/L); \quad (8.15)$$

L = carga orgánica, kg/ha día;

$C_{T_{0x}}$ = factor de corrección por presencia de compuestos tóxicos, cuyo valor es la unidad en ausencia de efluentes industriales

Como puede observarse, ninguno de los métodos descritos se basa en un análisis

detallado de los procesos físicos y bioquímicos responsables de la depuración. Por otra parte, las hipótesis en las que se basan sólo se cumplen en casos especiales o no se cumplen en absoluto, como ocurre con la hipótesis de funcionamiento en estado estacionario. Por tanto, estos métodos pueden ser adecuados para un análisis preliminar de los estanques de estabilización o para dar una idea aproximada de sus dimensiones durante el diseño. Normalmente, la aplicación de cualquiera de estos métodos da lugar a lagunas sobredimensionadas. De esta forma se evitan problemas de sobrecarga, aparición de olores y anaerobiosis. Cuando se quiere optimizar el diseño para evitar una excesiva ocupación de terreno es necesario utilizar métodos más complejos, es decir, los modelos matemáticos citados anteriormente, y de los que no nos ocuparemos en este manual.

DISEÑO DE LAGUNAS DE MADURACION

Como vimos en el capítulo 7, el objetivo fundamental de las lagunas anaerobias es la reducción de bacterias patógenas. Por tanto, el diseño se basa en los modelos cinéticos para la eliminación de estas bacterias, representadas, por lo general, por medio de los coliformes fecales.

La mayoría de los modelos de simulación de calidad de aguas superficiales utilizan una cinética de primer orden para representar la desaparición de coliformes del medio acuático (Baca y Arnett, 1976; Chen y col., 1976; Smith, 1978; Hydroscience, 1971; Tetra Tech, 1976). La ecuación que se recomienda más a menudo para el diseño de lagunas de maduración se basa en suponer una cinética de eliminación de patógenos de primer orden, así como un régimen de flujo en mezcla completa en la laguna. En estas condiciones, la ecuación de diseño es la siguiente (Mara, 1976; W. H. O., 1987):

$$N_e = \frac{N_i}{1 + k_b t^*} \quad (8.16)$$

donde N_e = número de coliformes fecales/100 ml en el efluente;
 N_i = número de coliformes fecales/100 ml en el influente;
 k_b = constante de velocidad para la eliminación de coliformes, día⁻¹;
 t^* = tiempo de retención, días.

Si se desea construir varias lagunas de maduración en serie, la ecuación de diseño sería:

$$N_e = \frac{N_i}{(1 + k_b t^*_{1}) (1 + k_b t^*_{2}) \dots (1 + k_b t^*_{n})} \quad (8.17)$$

donde t^*_n es el tiempo de retención en la laguna n.

La constante de velocidad k_b depende de la temperatura. Esta dependencia suele describirse en la forma siguiente:

$$k_b = k_{20} \theta^{(T-20)} \quad (8.18)$$

donde k_{70} = constante de velocidad a 20° C, día⁻¹,
 θ = coeficiente de temperatura, adimensional.

Como se vio en el capítulo 7, la presencia de coliformes está afectada por la intensidad luminosa. Con objeto de incluir este factor en el balance, Chamberlin y Mitchell (1978) introdujeron la siguiente definición de la velocidad específica de desaparición de coliformes:

$$k = k_1 I_0 e^{-kz} \quad (8.19)$$

donde k_1 = constante de proporcionalidad específica para cada microorganismo, cm²/cal,
 I_0 = energía luminosa a nivel de la superficie de la laguna, cal/cm² hr,
 k = coeficiente de extinción, m⁻¹,
 z = profundidad, m.

Dado que según esta ecuación, la velocidad específica se anula en la oscuridad, se ha desarrollado otra ecuación alternativa (Lantrip, 1983), que combina componentes dependientes e independientes de la intensidad luminosa. Esta ecuación expresa la velocidad específica en función de la temperatura, salinidad e intensidad luminosa:

$$k = \frac{(0,8 + 0,006 (\%AM))}{24} \cdot 1,07^{(T-20)} + k_1 I \quad (8.20)$$

donde %AM = salinidad, expresada como tanto por ciento de agua de mar;
 T = temperatura, ° C.

Normalmente, no se consideran en el diseño la intensidad luminosa o la salinidad, y se adopta un valor constante para k_b , que depende únicamente del microorganismo que se considere. Los valores utilizados habitualmente son $k_b = 2$ d⁻¹ para *Escherichia Coli* y $k_b = 0,8$ d⁻¹ para *Salmonella Typhi* (Mara, 1976).

La Organización Mundial de la Salud (W. H. O., 1987) recomienda un tiempo de retención mínimo de 5 días si se cuenta con una sola laguna de maduración, y 3 días por laguna cuando hay dos o más operando en serie.

**A este documento le falta
la parte 8, por problemas
del original**

**PARTE II
PUESTA EN MARCHA, MANTENIMIENTO Y CONTROL
DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION**



detallado de los procesos físicos y bioquímicos responsables de la depuración. Por otra parte, las hipótesis en las que se basan sólo se cumplen en casos especiales o no se cumplen en absoluto, como ocurre con la hipótesis de funcionamiento en estado estacionario. Por tanto, estos métodos pueden ser adecuados para un análisis preliminar de los estanques de estabilización o para dar una idea aproximada de sus dimensiones durante el diseño. Normalmente, la aplicación de cualquiera de estos métodos da lugar a lagunas sobredimensionadas. De esta forma se evitan problemas de sobrecarga, aparición de olores y anaerobiosis. Cuando se quiere optimizar el diseño para evitar una excesiva ocupación de terreno es necesario utilizar métodos más complejos, es decir, los modelos matemáticos citados anteriormente, y de los que no nos ocuparemos en este manual.

DISEÑO DE LAGUNAS DE MADURACION

Como vimos en el capítulo 7, el objetivo fundamental de las lagunas anaerobias es la reducción de bacterias patógenas. Por tanto, el diseño se basa en los modelos cinéticos para la eliminación de estas bacterias, representadas, por lo general, por medio de los coliformes fecales.

La mayoría de los modelos de simulación de calidad de aguas superficiales utilizan una cinética de primer orden para representar la desaparición de coliformes del medio acuático (Baca y Arnett, 1976; Chen y col., 1976; Smith, 1978; Hydrosience, 1971; Tetra Tech, 1976). La ecuación que se recomienda más a menudo para el diseño de lagunas de maduración se basa en suponer una cinética de eliminación de patógenos de primer orden, así como un régimen de flujo en mezcla completa en la laguna. En estas condiciones, la ecuación de diseño es la siguiente (Mara, 1976; W. H. O., 1987):

$$N_e = \frac{N_i}{1 + k_b t^*} \quad (8.16)$$

donde N_e = número de coliformes fecales/100 ml en el efluente;
 N_i = número de coliformes fecales/100 ml en el influente;
 k_b = constante de velocidad para la eliminación de coliformes, día⁻¹;
 t^* = tiempo de retención, días.

Si se desea construir varias lagunas de maduración en serie, la ecuación de diseño sería:

$$N_e = \frac{N_i}{(1 + k_b t^*_1)(1 + k_b t^*_2) \dots (1 + k_b t^*_n)} \quad (8.17)$$

donde t^*_n es el tiempo de retención en la laguna n.

La constante de velocidad k_b depende de la temperatura. Esta dependencia suele describirse en la forma siguiente:

$$k_b = k_{20} 0^{(T-20)} \quad (8.18)$$

donde k_{20} = constante de velocidad a 20° C, día⁻¹;
 θ = coeficiente de temperatura, adimensional.

Como se vio en el capítulo 7, la presencia de coliformes está afectada por la intensidad luminosa. Con objeto de incluir este factor en el balance, Chamberlin y Mitchell (1978) introdujeron la siguiente definición de la velocidad específica de desaparición de coliformes:

$$k = k_1 I_0 e^{-\beta z} \quad (8.19)$$

donde k_1 = constante de proporcionalidad específica para cada microorganismo, cm²/cal;
 I_0 = energía luminosa a nivel de la superficie de la laguna, cal/cm². hr;
 β = coeficiente de extinción, m⁻¹;
 z = profundidad, m.

Dado que según esta ecuación, la velocidad específica se anula en la oscuridad, se ha desarrollado otra ecuación alternativa (Lantrip, 1983), que combina componentes dependientes e independientes de la intensidad luminosa. Esta ecuación expresa la velocidad específica en función de la temperatura, salinidad e intensidad luminosa:

$$k = \frac{(0,8 + 0,006 (\%AM))}{24} 1,07^{(T-20)} + k_1 I \quad (8.20)$$

donde %AM = salinidad, expresada como tanto por ciento de agua de mar;
 T = temperatura, ° C.

Normalmente, no se consideran en el diseño la intensidad luminosa o la salinidad, y se adopta un valor constante para k_b , que depende únicamente del microorganismo que se considere. Los valores utilizados habitualmente son $k_b = 2$ d⁻¹ para *Escherichia Coli* y $k_b = 0,8$ d⁻¹ para *Salmonella Typhi* (Mara, 1976).

La Organización Mundial de la Salud (W. H. O., 1987) recomienda un tiempo de retención mínimo de 5 días si se cuenta con una sola laguna de maduración, y 3 días por laguna cuando hay dos o más operando en serie.

9. *Mantenimiento de las plantas*

INTRODUCCION

Puesto que una de las principales ventajas de la depuración por lagunaje es su simplicidad operativa, a menudo se piensa que el mantenimiento de las plantas no es necesario, o se reduce a visitas ocasionales para reparar posibles desperfectos en la obra civil. Sin embargo, la presencia de un operador familiarizado con el proceso, que sea capaz de interpretar los posibles síntomas de mal funcionamiento a medida que aparecen, y tomar las medidas correctoras correspondientes, es decisiva para la buena marcha de la instalación.

Por tanto, el mantenimiento de las lagunas de estabilización se centra en dos aspectos fundamentales:

- Cuidado de la obra civil: limpieza de la unidad de pretratamiento, medidores de caudal, verjas, caminos, jardinería, retirada del fango acumulado en las lagunas, etc.
- Detección de problemas de funcionamiento y adopción de medidas correctoras.

Estos dos aspectos del mantenimiento son complementarios, ya que a menudo el descuido de la obra civil conduce a problemas de funcionamiento. En este capítulo trataremos las medidas a tomar durante la puesta en marcha de la depuradora, los cuidados necesarios para el mantenimiento de la obra civil y las medidas higiénicas que debe tomar el operador para su seguridad y la de otros en la planta depuradora por lagunaje.

PUESTA EN MARCHA DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION

El arranque de las lagunas de estabilización puede presentar problemas debido a que los microorganismos responsables de la depuración no aparecen instantáneamente, sino que hace falta un periodo de tiempo cuya longitud depende de las condiciones ambientales para conseguir que estas poblaciones de seres vivos se desarrollen en las lagunas.

Teniendo esto en cuenta, se pueden tomar algunas precauciones muy sencillas para evitar complicaciones durante la puesta en marcha:

1. Si la planta se ha diseñado para una población superior a la actual, poner en marcha únicamente una parte de la misma. Generalmente el proyecto establece las lagunas que han de intervenir en la depuración en las distintas fases.
2. Las lagunas deben llenarse de agua lo más pronto posible una vez construidas, para evitar que se agrieten debido a las lluvias o que crezcan malas hierbas en el fondo. En cualquier caso, debe eliminarse toda la vegetación del fondo y taludes antes de comenzar el llenado.
3. La construcción de las lagunas debe plantificarse de forma que su acabado coincida con la primavera o verano. La mayor velocidad de crecimiento de los microorganismos durante esta época del año facilita la puesta en marcha de la instalación.

Cuando esto no es posible, y la puesta en marcha debe realizarse durante el invierno, hay que tener en cuenta la menor actividad de los microorganismos y proceder al arranque utilizando un período más largo de tiempo.

A continuación veremos los procedimientos para la puesta en marcha de cada uno de los tipos de lagunas.

Lagunas anaerobias

Las lagunas anaerobias deben llenarse y comenzar a utilizarse en continuo desde el principio, respetando el intervalo de tiempo de residencia establecido por el proyectista. Por tanto, la puesta en marcha consistirá simplemente en el llenado de los distintos módulos, y una vez completado éste, comenzar a alimentar el effluente a la etapa siguiente.

Durante el llenado de las lagunas anaerobias y los meses siguientes debe vigilarse la evolución del pH, que debe mantenerse por encima de 7. En caso contrario, la depuración no se está produciendo correctamente. Cuando esto ocurre se pueden tomar las medidas siguientes:

- Introducir una siembra de bacterias metanígenas procedentes de los digestores anaerobios de una depuradora convencional de aguas residuales.
- Corregir el pH del medio utilizando lechada de cal.

Ninguna de las lagunas anaerobias que funcionan actualmente en España ha presentado problemas durante la puesta en marcha.

Lagunas facultativas

El procedimiento que ha dado mejores resultados en las lagunas de estabilización españolas consiste en llenar las lagunas hasta una altura de aproximadamente un metro y dejar almacenada esta agua durante un período de quince-treinta días, dependiendo de las condiciones climáticas. Cuando aparece la coloración verde intensa indicativa del desarrollo de fitoplancton, se procede a completar el llenado de las lagunas y a comenzar su funcionamiento en continuo.

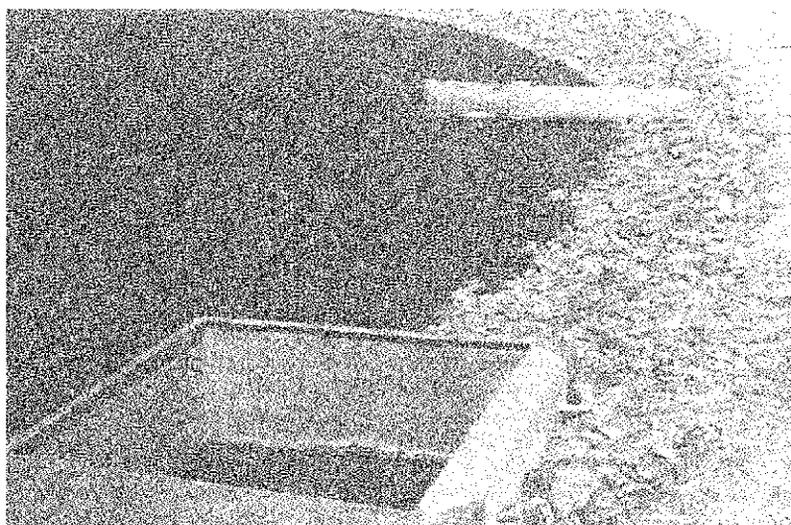


Foto 9 1. Detalle de una laguna facultativa en el que se observa su coloración característica (cortesia de TRAGSA).

Durante el período de llenado, por tanto, es necesario hacer el by-pass de una parte del efluente de las lagunas anaerobias, que se desvía hacia la salida de la planta. Siempre es preferible verter un efluente de poca calidad en forma transitoria, mientras tiene lugar la puesta en marcha, que proceder apresuradamente a poner en funcionamiento continuo toda la planta y originar problemas de sobrecarga, más difíciles de corregir.

Si hay más de una laguna facultativa operando en paralelo, el llenado se hace escalonadamente, respetando siempre el período de tiempo necesario para que aparezca la coloración verde intensa en cada una de las lagunas antes de iniciar el tratamiento en continuo.

Lagunas de maduración

Una vez que las lagunas facultativas están operando en continuo, el efluente se intro-

duce en las lagunas de maduración hasta que éstas se llenan, comenzando inmediatamente el funcionamiento en continuo. Al igual que ocurre con las lagunas anaerobias, nunca se han detectado problemas durante la puesta en marcha de las lagunas de maduración en España.

CUIDADO DE LA OBRA CIVIL

El mantenimiento de la depuradora en buenas condiciones debe ser uno de los objetivos fundamentales del operador. Al igual que ocurre con cualquier instalación, si no se cuida diariamente de que esté limpia, y se van reparando los desperfectos a medida que se van produciendo, en poco tiempo la planta se deteriora y envejece. En el caso concreto de una planta de tratamiento de aguas residuales surgen también problemas higiénicos para la población.

El operador, por tanto, debe ser consciente de que su trabajo es muy importante para la comunidad, y de que es responsable de posibles amenazas a la salud pública que puedan derivarse de un mantenimiento incorrecto de la planta.

Limpieza del área de pretratamiento

Como hemos visto en capítulos anteriores, la mayor parte de las lagunas de estabilización cuentan al menos con un sistema de desbaste mediante rejas, con el que se eliminan los sólidos de mayor tamaño arrastrados por las aguas residuales. Con menos frecuencia, el pretratamiento consta también de una cámara de grasas, tamices o desarenador. Cada una de estas unidades requiere cuidados especiales que veremos a continuación.

- **Rejas.** En el caso más corriente, el pretratamiento consta sólo de un sistema de rejas. A medida que los sólidos se van acumulando en las rejas, éstas se van colmatando y el agua encuentra mayor dificultad en atravesarlas. Por tanto, es necesario eliminar los sólidos depositados por lo menos una vez al día.

En las rejas de limpieza mecánica los sólidos acumulados van siendo eliminados periódicamente, y se acumulan en un contenedor, desde donde deben ser retirados por el operador. Si las rejas son de limpieza manual, esta eliminación debe efectuarla el operador, utilizando para ello un rastrillo que encaja entre los barrotes.

Es muy importante la disposición de las rejas en el canal de aguas residuales, ya que a veces es muy incómodo para el operador su limpieza debida a la falta de espacio para maniobrar. Si el diseño ha sido tal que es necesario efectuar acrobacias para limpiar las rejas, es conveniente informar a las autoridades competentes y exigir la realización de las obras oportunas para evitar posibles accidentes.

Tanto en las rejas de limpieza manual como automática se recogen una serie de sólidos de naturaleza diversa, que pueden dar lugar a serios problemas para la salud si no se entierran lo antes posible. Por ejemplo, estos sólidos húmedos son un buen criadero de mosquitos y roedores si se dejan acumulados en montones al aire libre.

Los proyectistas de las depuradoras deben asignar un área para el enterramiento de estos desechos sólidos. Si esto no estaba previsto en el proyecto original, el operador debe ponerlo en conocimiento de las autoridades competentes para que se habilite esta zona lo antes posible. A veces se decide incorporar estos residuos sólidos al vertedero municipal de basuras. En este caso, hay que suministrar un medio adecuado de transporte para que los sólidos puedan retirarse diariamente de la planta depuradora, evitando siempre su almacenamiento a la intemperie. Esta opción puede resultar preferible, en especial cuando el municipio cuenta con vertederos controlados, ya que de esta forma disminuyen los riesgos de contaminación de aguas subterráneas.

Las rejillas de limpieza automática requieren cuidados especiales, porque tienen partes móviles que deben lubricarse periódicamente para evitar atascos. Normalmente estos equipos vienen acompañados por instrucciones del fabricante que hay que procurar seguir escrupulosamente.

El mantenimiento diario es muy sencillo y requiere sólo unos minutos, mientras que si se deja que aparezcan problemas, éstos pueden necesitar atención técnica especializada y requerir semanas o incluso meses para volver a poner las rejillas en marcha.

A veces se observa la acumulación de sólidos que el sistema automático no es capaz de eliminar. En este caso se debe proceder a su retirada manual mediante rastrillo, antes de lo cual ha de desconectarse el equipo. Es muy importante recordar siempre que no se debe manipular ningún aparato automático sin desconectarlo previamente.

- **Tamices.** Algunas plantas de lagunaje cuentan con tamices de malla gruesa que eliminan sólidos de tamaño intermedio. Estos tamices van acumulando los sólidos en unas bandejas receptoras. Puesto que los tamices son suministrados también por distintos fabricantes, normalmente disponen de instrucciones para su uso que deben seguirse puntualmente, como en las rejillas de limpieza automática. Su mantenimiento diario es también muy sencillo, pero de gran importancia para evitar averías serias.

Al igual que en el desbaste mediante rejillas, los sólidos deben eliminarse al menos una vez al día. Dado que la planta suele tener un sistema de rejillas previo al tamiz, lo más sencillo es proceder a la limpieza conjunta de ambos y reunir los sólidos separados por uno y otro método. El destino final de esos sólidos debe ser su enterramiento en el menor intervalo de tiempo posible.

- **Desarenadores.** Los desarenadores eliminan partículas de arena u otras materias inorgánicas más pesadas que el agua, que tienden a sedimentar.

Los desarenadores instalados en lagunas de estabilización son prácticamente siempre de flujo horizontal. Las arenas y otros materiales pesados se acumulan en el fondo del desarenador, desde donde se van eliminando bien automáticamente o en forma manual. Si el desarenador dispone de limpieza automática, hay que seguir las instrucciones suministradas con el equipo y cuidar de que su lubricación y ajuste sean correctos en todo momento. Si la limpieza ha de hacerse manualmente, hay que tener grandes precauciones con posibles resbalones y con los gases que pueden acumularse en instalaciones cubiertas.

La limpieza manual se lleva a cabo mediante palas de mano. Esta operación se facilita grandemente cuando se cuenta con dos unidades para el desarenado, con lo cual se deja fuera de servicio la que se está limpiando. Aunque en el diseño de los desarenadores se ajusta la velocidad del agua residual de forma que sedimente sólo la materia inorgánica, las fluctuaciones de caudal pueden dar lugar a variaciones de velocidad que resulten en la sedimentación de materia orgánica. Por consiguiente, los sólidos acumulados en los desarenadores tendrán un carácter predominantemente inorgánico, pero con cierto contenido en materia orgánica, que será mayor si no se puede controlar en modo alguno la velocidad del agua residual a su paso por esta unidad de pretratamiento y el caudal tiende a variar mucho durante el día (como ocurre en pequeñas poblaciones).

El contenido en materia orgánica tiene mucha importancia a la hora de eliminar estos sólidos. Si se desea utilizar estas arenas, o acumularlas al aire libre en los alrededores de la planta, es necesario someterlas a un proceso de lavado con agua para eliminar los residuos orgánicos. En caso contrario surgirían inmediatamente riesgos para la salud, con proliferación de insectos, roedores y desarrollo de malos olores.

La operación de lavado puede realizarse simplemente con una manguera a presión, separando la materia orgánica, que debe eliminarse por los mismos métodos utilizados en el caso de los tamicos y rejas. Si no interesa recuperar las arenas, la mezcla de materia orgánica e inorgánica producida en los desarenadores debe unirse a los sólidos procedentes de las otras unidades del pretratamiento y enterrarse o llevarse al vertedero municipal.

- **Cámaras de grasas.** La separación de grasas de las aguas residuales se verifica en cámara donde se acumulan en superficie las materias de menor densidad, mientras que la corriente de agua se desvía hacia el fondo, desde donde pasa a la unidad siguiente en la planta. De esta forma se van reteniendo en la superficie aceites, grasas, espumas, corchos y otros materiales que flotan en el agua.

La frecuencia en la limpieza de estas cámaras debe ajustarse a la cantidad de materias retenidas, y depende del agua residual propia de cada zona. Es conveniente retirar el material acumulado diariamente y enterrarlo junto a los sólidos provenientes de las otras etapas del pretratamiento.

Limpieza de los medidores de caudal

Las lagunas de estabilización suelen contar con un canal Parshall para la medida de caudal, que puede estar situado a la entrada o a la salida de la planta. Es esencial mantenerlo limpio de acumulaciones de residuos, ya que de lo contrario las lecturas de caudal son erróneas. Esta limpieza debe efectuarse una vez a la semana, y los sólidos recogidos deben eliminarse en la misma forma descrita para las distintas etapas del pretratamiento.

Limpieza de conducciones y arquetas de reparto

Todas las conducciones del agua residual entre los distintos elementos de la planta de depuración por lagunaje deben mantenerse limpias, eliminando para ello los



Foto 9.2 Impermeabilización de lagunas.

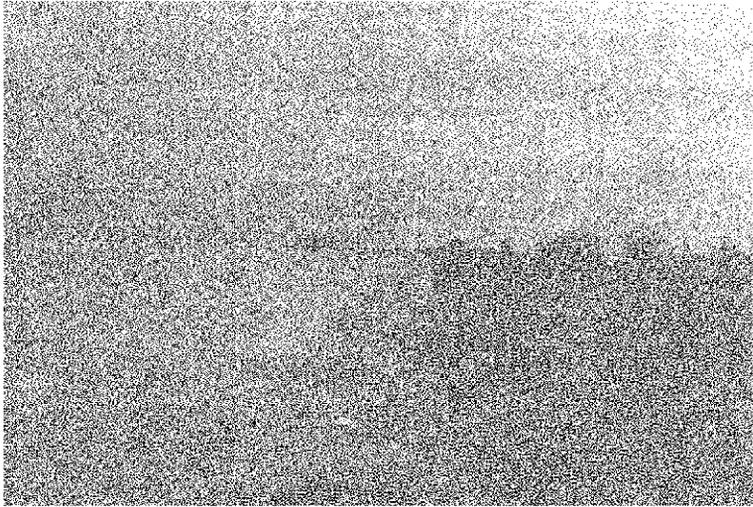


Foto 9.3 Distancia de seguridad entre las plantas en el talud interior de una laguna facultativa y la lamina de agua (corresponde a TRAC,SA)

dépósitos de materia sólida que puedan ir acumulándose. Estos sólidos deben enterrarse prontamente después de ser retirados de las conducciones.

Las arquetas de reparto deben ser objeto de especiales cuidados, ya que la acumulación de sedimentos en ellas provoca que los caudales que pasan a las lagunas se vayan desviando de los valores de proyecto, con lo que finalmente se provoca el mal funcionamiento de la planta depuradora.

La inspección de las arquetas de reparto y las conducciones de entrada y salida a cada laguna debe llevarse a cabo diariamente, para vigilar si existen plásticos, costras, hojas, trapos u otras materias que hayan accedido a la depuradora y puedan originar obstrucciones. Como regla general, debe efectuarse la limpieza de estos elementos una vez por semana, siempre que la inspección diaria muestre la presencia de materiales acumulados y después de lluvias.

Si la planta cuenta con aliviaderos para aguas de lluvia, hay que inspeccionarlos regularmente, al menos una vez al mes en tiempo seco, y al final de cada episodio lluvioso, para asegurarse que están libres de obstrucciones y están en condiciones de cumplir su misión correctamente.

Mantenimiento de taludes

Los taludes son los elementos de la planta de depuración por lagunaje más sensibles al deterioro y donde éste resulta más visible. Los cuidados que requieren dependen del material del que estén formados. En principio, las lagunas pueden contar o no con una impermeabilización en función del terreno en el que están construidas.

En lagunas impermeabilizadas con lámina de PVC que resiste la intemperie hay que inspeccionar la cubierta impermeable de los taludes interiores para detectar posibles deterioros y desgarros.

Cuando la impermeabilización se lleva a cabo con una lámina de plástico recubierta con una capa de tierra es fundamental evitar el desarrollo de plantas que puedan perforar esta lámina, y servir de soporte para el desarrollo de mosquitos y otros insectos.

Los taludes de tierra pueden también resultar dañados por animales que construyan sus madrigueras en ellos y por la escorrentía provocada por las lluvias. El operador debe inspeccionar los taludes para detectar señales de erosión, desarrollo de grietas y agujeros causados por animales. Las medidas a tomar son las siguientes (W. H. O., 1987):

- Rellenar las grietas con tierra, y a ser posible con arcilla, y seguidamente igualar el terreno y compactarlo.
- Eliminar las malas hierbas que crecen en los taludes, en especial las plantas acuáticas.
- Si por razones estéticas se ha dotado a la depuradora de jardinería, hay que mantener una distancia mínima de 30 centímetros entre el nivel máximo de agua en las lagunas y las plantas cultivadas en los taludes interiores.

Si existen zonas arboladas en las proximidades de la planta, hay que impedir el desarrollo de árboles próximos a las lagunas, y nunca deben cultivarse setos alrededor de éstas.

Mantenimiento de caminos, verjas y otros elementos de la planta depuradora

La planta depuradora debe en todos los casos estar rodeada por una verja. Normalmente ésta consiste en una valla metálica, que deja libre acceso al viento. Es importante que la valla no actúe de cortavientos, es decir, hay que evitar las vallas de obra.

El operador debe inspeccionar la valla periódicamente, aproximadamente una vez a la semana, recorriendo todo el perímetro para detectar daños en los postes o el alambre. Los posibles deterioros deben ser arreglados inmediatamente. Es muy importante mantener el recinto bien aislado para impedir la entrada de niños y evitar así posibles accidentes.

Los caminos de acceso a la planta deben mantenerse en buen estado. Si no están asfaltados o al menos dotados de una cubierta de grava deben vigilarse para evitar el crecimiento de malas hierbas y la formación de charcos en períodos de lluvia.

En terrenos arcillosos es conveniente que los caminos tengan un buen acabado, ya que de lo contrario puede quedar cortado el acceso a la planta en tiempo lluvioso. Los caminos interiores deben mantenerse siempre libres de malas hierbas. Si el acabado es de gravilla, hay que mantenerla en buen estado y libre de crecimientos de hierbas. Si se producen grietas o desperfectos ocasionados por las lluvias hay que repararlos inmediatamente, al igual que en el caso de los taludes.

Cuando la depuradora se encuentra en la ladera de una montaña se pueden originar arrastres de tierra en época lluviosa, que se acumulan en los caminos y pueden alcanzar las lagunas. Hay que vigilar estos arrastres y eliminarlos tan pronto como se producen. Si es necesario, el operador debe informar a las autoridades competentes sobre la conveniencia de asegurar el terreno de la ladera para evitar estos arrastres.

Casi todas las plantas de depuración por lagunaje cuentan con una caseta donde los operarios guardan las herramientas. Si no se dispone de agua corriente, hay que instalar al menos un depósito de agua limpia y disponer de bombonas de lejía para mantener el recinto y los utensilios en buen estado de desinfección. Además de las cuestiones de higiene que trataremos con más detalle en el apartado siguiente, la caseta debe también cuidarse y mantenerse en buen estado, inspeccionándola para detectar desperfectos y reparándolos cuando éstos surjan.

Retirada de los fangos de las lagunas anaerobias

Las lagunas anaerobias se construyen de forma que el fango pueda acumularse en el fondo durante un período de tiempo bastante largo (tres-seis años) antes de que sea necesaria su limpieza. La retirada del fango puede acometerse por las llamadas técnicas en seco o en húmedo. La elección de una u otra depende de la disponibilidad de otras unidades en paralelo que permitan paralizar la laguna a limpiar durante un tiempo considerable.

- **Limpieza en seco.** En este caso se deja la laguna anaerobia fuera de servicio y se hace pasar el influente a una de las otras unidades. La capa líquida de la superficie de la laguna se elimina mediante una bomba, y una vez el fango queda expuesto al aire se deja secar por evaporación. La duración de este proceso depende de las condiciones climáticas, por lo que es aconsejable efectuar esta operación durante el verano. Una vez que la capa de fangos se ha secado, se retira y se almacena para usarse como abono, si es posible en la jardinería de la propia instalación. Si se utiliza este método, es aconsejable dejar que la capa de fangos supere una décima parte del volumen de la laguna, con objeto de que el período de secado no sea demasiado largo.
- **Limpieza en húmedo.** La retirada de fangos puede llevarse a cabo sin vaciar la laguna, utilizando una bomba o un equipo de dragado como los que sirven para dragar puertos, canales o fondos de ríos. Otra posibilidad es vaciar el agua hasta dejar la capa de fangos al descubierto y retirarlos mediante una retroexcavadora.

El principal inconveniente de este tipo de limpieza es el importante volumen de fangos obtenidos, que hay que secar antes de que sea posible su utilización, para lo que hay que disponer de unas áreas de secado. Este método tiene que utilizarse cuando no se dispone de ninguna otra unidad que reemplace durante la operación de limpieza a la laguna anaerobia, por lo que mientras ésta se lleva a cabo hay que efectuar un by-pass. En estas condiciones, la retirada de los fangos debe hacerse lo más rápidamente posible. Cuando se utiliza este método se considera que hay que proceder a la retirada de los fangos cuando éstos ocupan la mitad del volumen de las lagunas.

Limpieza de los fangos acumulados en lagunas facultativas

Cuando la instalación no cuenta con lagunas anaerobias, es decir, el agua residual cruda alimenta directamente una laguna facultativa, se produce una acumulación de fangos en el fondo de ésta que hay que eliminar periódicamente. Puesto que las lagunas facultativas son normalmente mucho mayores que las anaerobias, la retirada del fango se suele hacer paralizándola a limpiar cuando se ha producido una acumulación de 50-100 centímetros de fango, vaciando el agua almacenada y dejando secar por evaporación el sedimento. La mayor superficie de fondo desaconseja el uso de las técnicas de retirada de fango en húmedo comentadas para las lagunas anaerobias.

MEDIDAS HIGIENICAS

A pesar de que el operador sabe perfectamente que está trabajando en una planta de tratamiento de aguas residuales, y que éstas pueden ser un foco infeccioso, es normal que con el paso del tiempo «pierda el miedo» y olvide el carácter de riesgo para la salud que su trabajo puede adquirir si no se toman algunas precauciones básicas. Precisamente cuando se alcanza este punto, la probabilidad de que surjan accidentes aumenta en gran medida. Por esta razón, es aconsejable colocar en algún lugar bien visible una lista de instrucciones higiénicas que sirvan de recordatorio de que existe un riesgo real que afortunadamente es fácil de prevenir.

Las medidas de seguridad que se enumeran a continuación han sido recomendadas

por la Organización Mundial de la Salud para operadores de lagunas de estabilización (W. H. O., 1987):

1. La planta depuradora debe contar siempre con un depósito de agua limpia, jabón y bombonas de lejía. Es aconsejable utilizar toallas desechables de papel, para evitar que debido a la necesidad de transporte para la limpieza de las toallas de tela éstas permanezcan demasiado tiempo sin lavar.
2. La depuradora debe contar con un botiquín en el que se incluya, como mínimo, esparadrapo, algodón, alcohol, mercromina o similar (Vigencial), una disolución detergente desinfectante (Armil, Lactacyd, etc.), tijeras y pinzas. También es conveniente que el operador disponga de algún líquido repelente para evitar las picaduras de mosquitos u otros insectos.
3. El operador debe disponer de guantes y botas de goma, casco de trabajo y al menos dos monos. Todas las prendas utilizadas en la depuradora deben permanecer en ella al finalizar la jornada laboral.
4. Siempre que se vaya a comer u beber, o incluso encender un cigarrillo, hay que lavarse las manos. Si se hace alguna comida en el recinto de la depuradora, hay que designar un área de ésta para este fin, y evitar en todo momento comer a la vez que se está efectuando alguna labor que pueda ocasionar el contacto de

TABLA 9.1
Medidas de seguridad en lagunas de estabilización (adaptado de Organización Mundial de la Salud, 1987)

<ol style="list-style-type: none">1. Instalar agua corriente o un depósito de agua limpia, y contar con bombonas de lejía, jabón y toallas, preferiblemente desechables.2. Botiquín con el siguiente contenido:<ul style="list-style-type: none">— Esparadrapo.— Algodón.— Alcohol o agua oxigenada.— Mercromina o similar.— Disolución detergente desinfectante.— Tijeras.— Pinzas.— Líquido repelente para insectos.3. Prendas de vestir para el trabajo:<ul style="list-style-type: none">— Guantes de goma.— Botas de goma.— Casco.— Dos monos.4. Lavarse siempre las manos antes de comer, y comer sólo en áreas específicamente designadas para ese uso.5. Limpiar las herramientas con agua limpia después de utilizarlas.6. Desinfectar inmediatamente cualquier herida, corte o abrasión.7. Secarse cuidadosamente las manos, calzado y ropas antes de manipular equipos eléctricos.8. Utilizar sólo herramientas especiales con aislamiento en los equipos eléctricos.9. Desenchufar los equipos eléctricos antes de manipularlos.10. Disponer de una barra pequeña, cuerda y salvavidas.11. Vacunarse contra tífus, tétanos y otras enfermedades que recomienden las autoridades sanitarias locales.12. Recibir instrucción en primeros auxilios.

la comida con algún elemento que haya estado en contacto a su vez con aguas residuales o hongos. Si es posible, es preferible evitar las comidas en el interior del recinto.

5. Todas las herramientas de trabajo deben limpiarse con agua limpia antes de ser guardadas después de su uso.

6. Los cortes, arañazos y abrasiones que pueda sufrir el operador deben desinfectarse inmediatamente después de que se hayan producido.

7. Si la planta dispone de electricidad, y el operador debe también ocuparse del mantenimiento de equipos eléctricos, debe asegurarse de que sus manos, ropas y calzado están secos. Asimismo, debe disponer de guantes y herramientas dotados de aislamiento eléctrico.

8. La entrada de la verja debe mantenerse cerrada incluso cuando el operador está trabajando en el recinto, ya que éste no puede estar pendiente todo el tiempo de posibles visitas, y existe un riesgo importante de caídas en las lagunas, especialmente para los niños. En este sentido, las lagunas más peligrosas son las anaerobias, porque el fango del fondo es pegajoso y hace difícil la salida de una persona que se haya caído en ellas. También es importante recordar los riesgos higiénicos para los visitantes si no están suficientemente informados y tocan las arquetas de reparto u otros elementos de la planta.

9. La planta debe contar con una pequeña embarcación, cuerda y salvavidas.

10. El operador debe vacunarse contra el tétanos y fiebre tifoidea, así como otras posibles enfermedades que indiquen las autoridades sanitarias del área. También debe someterse a un chequeo médico periódico.

11. Antes de empezar su labor como operador, la persona seleccionada para este trabajo debe recibir instrucción en primeros auxilios.