

Lagunaje.

Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización

Máster en Ingeniería y Gestión del Agua

2016

PROFESOR

Jaime La Iglesia Gandarillas

Para ver esta publicación, debe
descargar el archivo PDF
o descomprimir.

Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	OBJETIVOS DEL LAGUNAJE	3
3.	FUNDAMENTOS DEL LAGUNAJE.....	3
4.	TIPOS DE PROCESOS DE LAGUNAJE	4
	<i>4.1 Lagunas anaerobias.....</i>	<i>4</i>
	<i>4.2 Lagunas facultativas.....</i>	<i>4</i>
	<i>4.3 Lagunas aerobias o de maduración</i>	<i>5</i>
	<i>4.4 Otros tipos de lagunas.....</i>	<i>5</i>
5.	PARAMETROS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS.....	6
	<i>5.1 Introducción.....</i>	<i>6</i>
	<i>5.2 Diseño de las lagunas anaerobias.....</i>	<i>6</i>
	<i>5.3 Diseño de las lagunas facultativas</i>	<i>8</i>
	<i>5.4 Diseño de las lagunas de maduración o aerobias</i>	<i>16</i>
6.	CONSTRUCCIÓN DE LAS LAGUNAS	19
7.	ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO Y RENDIMIENTOS	22
8.	PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....	24
9.	VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	32
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	33

1. INTRODUCCIÓN

En pequeños municipios la experiencia ha demostrado que las plantas depuradoras de aguas residuales, basadas en tecnologías convencionales, originan problemas, tanto técnicos como económicos, que hacen que un gran número de estas instalaciones queden fuera de servicio en un plazo de tiempo muy corto. Como consecuencia de lo anteriormente expuesto se han desarrollado otras tecnologías denominadas "blandas" o "no convencionales" tratando de minimizar las dificultades reseñadas para los citados municipios.

2. OBJETIVOS DEL LAGUNAJE

La aplicación de otro tipo de tecnologías respecto a las tecnologías tradicionales, basadas en procesos de autodepuración natural, consigue la reducción de la carga contaminante de las aguas residuales con unos costes de operación inferior y con unas necesidades de mantenimiento menores a los de la depuración tradicional.

3. FUNDAMENTOS DEL LAGUNAJE

El tratamiento por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de éstas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de bacterias heterótrofas presentes en el medio. Puesto que en la depuración por lagunaje no interviene para nada la acción del hombre, quien se limita a proporcionar un emplazamiento adecuado para las balsas, el lagunaje es un método biológico natural de tratamiento, basado en los mismos principios por los que tiene lugar la autodepuración en ríos y lagos.

Al estar basada esta tecnología en procesos biológicos naturales, los rendimientos de depuración que se alcanzan están muy relacionados con las condiciones climáticas imperantes. Por otra parte, estos procesos biológicos se ven muy afectados por la presencia en el agua residual de sustancias anómalas, procedentes de vertidos industriales que pueden llegar a hacer inviable su tratamiento.

Por lo tanto en el lagunaje se obtendrá una eliminación de la materia orgánica presente, de origen urbano fundamentalmente, de una manera económicamente viable sin prescindir de la reducción de gérmenes patógenos.

4. TIPOS DE PROCESOS DE LAGUNAJE

Dado que la presencia de oxígeno disuelto en las lagunas de estabilización determina qué tipo de mecanismos van a ser responsables de la depuración, los estanques de estabilización suelen clasificarse en aerobios, anaerobios y facultativos. Además de esta clasificación básica también se utilizan otras relacionadas con sus características físicas, tales como la profundidad. ambas clasificaciones están relacionadas, ya que las fuentes de oxígeno disuelto en lagunas son fenómenos de superficie. Estas fuentes de oxígeno son la actividad de las algas microscópicas y la reaireación a través de la interfase aire-agua.

Las lagunas de oxidación o de estabilización se clasifican en:

- Anaerobias.
- Facultativas.
- Aerobias o de maduración.

4.1 Lagunas anaerobias

Son estanques profundos de 2,5 a 5 metros de profundidad en la que se produce la decantación de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual. En el fondo de la laguna tiene lugar la estabilización de la materia orgánica mediante la acción de bacterias anaerobias, que primero transforman la materia orgánica en ácidos volátiles y posteriormente por la acción de las bacterias metanogénicas, en dióxido de carbono, metano, y en sólidos mineralizados.

En este tipo de lagunas, como consecuencia de la elevada carga orgánica y corto periodo de retención del agua residual, el contenido en oxígeno disuelto se mantiene muy bajo o nulo durante todo el año.

El objetivo perseguido es retener la mayor parte de los sólidos, que pasan a incorporarse a la capa de fangos acumulados en el fondo, eliminando por consiguiente parte de la materia orgánica.

4.2 Lagunas facultativas

Este tipo de estanque tiene una profundidad media, entre 1 y 2 m y se caracteriza por poseer una zona aerobia próxima a la superficie, y una zona anaerobia en el fondo. La extensión relativa de estas dos zonas varía durante el año en función de la carga aplicada y de la eficacia de los dos

mecanismos de adición de oxígeno al medio: la fotosíntesis llevada a cabo por las algas y la reaireación a través de la superficie. La finalidad de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionado principalmente por las algas presentes.

4.3 Lagunas aerobias o de maduración

Son estanques de poca profundidad, entre 0'5-1 m, que soportan bajas o nulas cargas orgánicas. La escasa profundidad permite la insolación de la casi totalidad de la capa de agua, proliferando, además de bacterias aerobias protozoos y algas que mediante la actividad fotosintética, suministran el oxígeno necesario para la acción degradadora de las bacterias aerobias.

Además del aporte de oxígeno vía fotosíntesis, se produce también una oxigenación del medio líquido por reaireación superficial.

En este tipo de lagunas, debido a la luz ultravioleta procedente de la radiación solar incidente se consigue una elevada eliminación de organismos patógenos, así como la mineralización de los nutrientes orgánicos.

La eliminación de patógenos aumenta con el pH de la laguna. La actividad fitoplancton da lugar a un aumento del pH, mientras que la actividad metabólica de las bacterias genera CO₂ que provoca un descenso en el pH. Como las lagunas de maduración tienen una carga orgánica muy baja, se produce una generación muy escasa de CO₂. Por otra parte la actividad fotosintética es muy elevada, incrementándose el pH que se traduce en un medio más desfavorable para la supervivencia de organismos patógenos.

4.4 Otros tipos de lagunas

Otra clasificación utilizada en lagunas de estabilización considera la forma en que se produce la alimentación y descarga del agua residual en la instalación (Middlebrooks, 1982). En función de los patrones de circulación utilizados, se tiene los tipos siguientes:

a) Lagunas continuas.

Son aquellas en las que se produce la entrada y salida continua del agua residual y efluente. La mayoría de las lagunas para tratamiento de aguas residuales urbanas funcionan de acuerdo con este principio.

b) Lagunas semicontinuas o de descarga controlada.

En este caso las lagunas se llenan con agua residual, que se almacena durante un período prolongado de tiempo, hasta que se inicia su vaciado. Este tipo de diseño se utiliza a menudo en zonas con grandes variaciones estacionales, o cuando la laguna de estabilización se utiliza simultáneamente como sistema regulador de riegos.

c) Lagunas de retención total.

Este tipo de lagunas se diseña de forma que el agua tratada se pierda por evaporación o infiltración en el terreno, con lo que no se produce su vertido final a un cauce público. Normalmente se trata de lagunas de poca profundidad y gran extensión para facilitar la evaporación del agua almacenada. Hasta la fecha no se ha instalado ninguna de estas lagunas en España.

5. PARAMETROS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS

5.1 Introducción

El diseño de las lagunas de estabilización se ha llevado a cabo tradicionalmente mediante procedimientos empíricos y simplificados, basados por lo general en la eliminación de materia orgánica como variable. Existe una gran variedad de métodos de diseño, lo que constituye un reflejo de las múltiples condiciones en las que estos han sido deducidos (distintos tipos de alimentación, situación geográfica, condiciones climáticas, etc). Los parámetros en los que se basan normalmente los cálculos son:

- Carga volumétrica (gr DBO5/m³día)
- Carga orgánica por superficie (Kg DBO5/ Ha día)
- Tiempo de retención hidráulico (días)

5.2 Diseño de las lagunas anaerobias

El diseño de lagunas anaerobias se lleva a cabo mediante procedimientos empíricos. Los parámetros más adecuados para dimensionar las lagunas anaerobias son la carga volumétrica y el tiempo de retención hidráulico, debido a que la depuración en medio anaerobio es independiente de los fenómenos de superficie (reaireación, fotosíntesis), que sin embargo desempeñan un papel primordial en las lagunas facultativas y de maduración.

En España se utilizan los siguientes parámetros de diseño:

LAGUNAS ANEROBIAS:	
- <i>Tiempo de retención</i>	<i>2-5 días</i>
- <i>Carga volumétrica</i>	<i>90-180 gr DBO₅/m³d</i>
- <i>Profundidad</i>	<i>2,5-5 m.</i>
- <i>Funcionamiento</i>	<i>en paralelo</i>
- <i>Producción de fangos</i>	<i>40 l/hab.año</i>

En este tipo de lagunas es conveniente utilizar como mínimo dos en paralelo, para asegurar la continuidad de operación en el caso de limpieza y retirada de fangos en una de las unidades.

A continuación y como referencia bibliográfica se adjuntan unas tablas donde se han recogido otros datos de estudios que determinan intervalos de cargas volumétricas y de retención hidráulicas, pero que en la práctica, no suelen ser usados.

INTERVALOS DE CARGA VOLUMÉTRICA PROPUESTOS POR DIFERENTES AUTORES PARA EL DISEÑO DE LAGUNAS ANAEROBIAS

CARGA VOLUMÉTRICA g DBO ₅ /m ³ día	REFERENCIA
40-250	Bradley y Senra, 1976
125	Gloyna, 1973
>400	Maa, 1976
90-500	Parker, 1970
90-350	Oswald, 1968
200-500	Cooper, 1968

TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA RECOMENDADOS POR DIFERENTES AUTORES PARA EL DISEÑO DE LAGUNAS ANAEROBIAS

TIEMPO DE RETENCIÓN (días)	REFERENCIA
5-50	Eckenfelder, 1970
5	Mara, 1976
2-5	Parker y col, 1959
30-5	Eckenfelder, 1961
2-5	Malina y Ríos, 1976

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 los 0°C.

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.

Los parámetros que se usan en España son los que se han propuesto anteriormente y producen una eliminación de materia orgánica como DBO5 del 50% en invierno y 80% en verano, con reducciones de sólidos en suspensión de hasta un 90%.

5.3 *Diseño de las lagunas facultativas*

Los parámetros más adecuados para dimensionar las lagunas son el tiempo de retención hidráulico y fundamentalmente los fenómenos de superficie (reaireación, fotosíntesis). En España el método empírico más empleado es el Israelí, basado en los resultados obtenidos en numerosas plantas en funcionamiento en Israel.

En España se utilizan los siguientes parámetros de diseño:

LAGUNAS FACULTATIVAS:

- <i>Tiempo de retención</i>	<i>> 1 semana</i>
- <i>Profundidad</i>	<i>1-2 metros</i>
- <i>Carga orgánica superficial*</i>	<i>80-140 kgDBO5/Ha día</i>
<i>* Cargas más altas cuanto mayor es la tª por mejor funcionamiento</i>	
- <i>Funcionamiento</i>	<i>en paralelo</i>
- <i>Producción de fangos</i>	<i>inapreciable</i>

La única variación, que se ha producido en nuestro país al aplicar este método, ha sido la variación de este parámetro, en función de las condiciones climáticas de cada zona, dentro del intervalo de 80 a 140 Kg DBO5/Ha día. Tendiendo al intervalo menor, 80 kg DBO5/Ha día, en el caso de zonas más frías.

Al igual que en el caso de las lagunas anaerobias, se han estudiado numerosos métodos de diseño de las lagunas facultativas, que pueden clasificarse en empíricos, racionales y matemáticos dependiendo de la forma que tienen de calcular dicho diseño.

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. 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 biológica de oxígeno (DBO5)

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

- Ecuación de Arceivala o método empírico de la India. (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 lo tanto es aplicable al diseño en ese país, y en un intervalo de latitud entre 8°N-36°N:

$$L \text{ (Kg DBO5 /Ha día)} = 375 - 6,25 \text{ (latitud)}$$

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:

$$L_{\text{máx}} = 11,2 (1,054)^T$$

Puesto que la carga admisible máxima aumenta con la temperatura, en el diseño se utiliza la aproximación más conservativa, para lo 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 introducir un factor de seguridad (Mara, 1976), con lo que la ecuación anterior quedaría:

$$L_{\text{máx}} = 7,5 (1,054)^T$$

MÉTODOS EMPÍRICOS DE DISEÑO DE LAGUNAS FACULTATIVAS

MÉTODO	CRITERIO O ECUACIÓN	INTERVALO DE APLICABILIDAD
Organización Mundial de la Salud, 1987	Carga superficial 200-400 Kg DBO5/Ha·día	Climas templados y cálidos
Arceivala, 1970	$L \text{ (Kg DBO5/Ha·día)} = 375-6,25 \text{ (Latitud)}$	India, Lat: 8° N-36° N
McGarry-Pescod	$L \text{ (Kg DBO5/Ha·día)} = 11,2 (1,054)^T$	Carga superficial: 140-280 Kg/Ha·día
McGarry-Pescod modificado (Mara, 1976)	$L \text{ (Kg DBO5/Ha·día)} = 7,5 (1,054)^T$	Carga superficial: 140-280 Kg/Ha·día

Larsen, 1974	MOT = (2,468RED+2,468TTC+23,9/TEMP R+150,0/DRY)x106	Climas 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 DBO5/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:

$$MOT = (2,468RED+2,468TDD+23,9/TEMPR+150,0/DRY)x106$$

Donde las distintas variables se definen en la forma siguiente:

$$MOT = \frac{\text{Area (radiacion solar)}^{\frac{1}{3}}}{\text{Caudal influente (DBO}_5 \text{ infl)}^{\frac{1}{3}}}$$

$$RED = \frac{DBO_5 \text{ influ} - DBO_5 \text{ efl}}{DBO_5 \text{ influ}}$$

$$TDD = \frac{\text{Velocidad viento (DBO}_5 \text{ influ)}^{\frac{1}{3}}}{(\text{Radiacion solar})^{\frac{1}{3}}}$$

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

$$DRY = \text{humedad relativa}$$

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).

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 los 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 fundamenta 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 encuentra 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 evaporación 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.

Los métodos más utilizados en esta categoría son los siguientes:

- Marais (1970) y Eckenfelder (1972)

Entre otras proponen la expresión siguiente, basada en la hipótesis de mezcla completa, estado estacionario y cinética de depuración de primer orden:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{K \left(\frac{V}{Q_0} \right) + \frac{Q_e}{Q_0}} = \frac{1}{K(\sigma - 1) + 1}$$

Dónde:

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.

La forma más frecuente de la ecuación anterior es

$$C/C_0 = 1/(K\sigma + 1)$$

Dónde se han hecho las simplificaciones siguientes:

V/Q₀ = σ tiempo de residencia hidráulica y teniendo en cuenta que 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:

$$C/C_0 = e^{-k\sigma}$$

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

$$C/C_0 = 1 / (1 + K\sigma/n)^n$$

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:

$$C/C_0 = 4ae^{1/2d} / ((1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d})$$

Donde:

k = constante cinética, día⁻¹.

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

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

U = velocidad media del fluido, m/h;

LT = 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 esta 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):

$$K = K_0 \theta^{(T-T_0)}$$

Dónde:

k_0 = valor de la constante de velocidad a la temperatura de referencia

$T_0 = \text{día}^{-1}$.

T = temperatura en °C.

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

$$K = k_{20} C_{Te} C_{CO} C_{TOX}$$

Dónde:

C_{Te} = factor de corrección por temperatura, definido conforme a la ecuación de Arrhenius modificada.

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

$$C_{CO} = 1 - ((0,083/K_{20} \log (672/L))$$

L = Carga orgánica, Kg/Ha día.

C_{TOX} = 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 en la hipótesis de funcionamiento en estado estacionario. Por lo 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 cualquier 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 es necesario ocuparse en este estudio.

3. Métodos matemáticos:

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.

5.4 Diseño de las lagunas de maduración o aerobias

El objetivo fundamental de las lagunas de maduración es la reducción de bacterias patógenas, así como finalizar la eliminación de DBO5 en el supuesto de que quedara algo por oxidar. Si la cantidad de DBO5 que queda por oxidar fuese superior al 20% del total inicial, se puede considerar que dicha laguna estaría funcionando como facultativa y no como de maduración. Por este motivo el diseño se basa fundamentalmente en modelos cinéticos para la eliminación de estas bacterias patógenas, representadas por lo general por medio de los coliformes fecales. En España se utilizan los siguientes parámetros de diseño:

LAGUNAS DE MADURACIÓN:

- Cálculo* $N_e = N_i / (1 + kb t)$
- Siendo N_e =coliformes efluente y N_i =coliformes influente
- t : temperatura ambiente °C
- $kb = k_{20} \phi^{(T-20)}$, donde k_{20} =constante velocidad día-1 2,6 y $\phi = 1,19$ y T = temperatura media anual del agua °C
- Tiempo de retención > 5 días si 1 lag

- <i>Tiempo de retención</i>	<i>> 3 días si 2 ó + lag.</i>
- <i>Profundidad</i>	<i>0,5-1,2 metros</i>
- <i>Funcionamiento</i>	<i>en serie</i>
- <i>Producción de fangos</i>	<i>inapreciable</i>

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):

$$N_e = N_i / (1 + k_b t)$$

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; se utiliza entre 0,8 y 2.

t = tiempo de retención, días.

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

$$N_e = N_i / ((1 + k_b t_1) (1 + k_b t_2) (1 + k_b t_3) \dots (1 + k_b t_n))$$

Dónde:

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:

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

Dónde:

K_{20} = constante de velocidad a 20 °C, día⁻¹ = 2,6

θ = coeficiente de temperatura, adimensional = 1,19

T = temperatura media anual del agua

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:

$$K = k_1 I_0 e^{-\beta z}$$

Dónde:

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:

$$K = ((0,8+0,006 (\%AM))/24) 1,07(T-20) + k_1 I$$

Dónde:

$\%AM$ = salinidad, expresada en tanto por ciento de agua de mar;

T = temperatura en °C.

Normalmente no se consideran en el diseño de 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 $k_b = 2d^{-1}$ para Escherichia Coli y $k_b = 0,8d^{-1}$ 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.

En España se ha utilizado la ecuación de Mara antes expuesta, en la mayoría de los casos; en otros se ha limitado a fijar un tiempo de retención mínimo de 3 a 5 días y una profundidad media entre 0,50 y 1,20 metros.

6. CONSTRUCCIÓN DE LAS LAGUNAS

En la construcción de una planta depuradora por lagunaje las unidades de mayor importancia de la obra son:

- Movimiento de tierras.
- Conducciones.
- Unidades especiales.
- Impermeabilización.
- Varios.
 - a) Movimiento de tierras

Es quizá la unidad constructiva más importante. Antes de iniciarla se requiere la eliminación de la capa vegetal existente que podrá utilizarse posteriormente para el ajardinamiento de los taludes exteriores.

Los aspectos más importantes a tener en cuenta son:

- Equilibrio entre desmonte y terraplén para minimizar los transportes vertedero o bien la tierra de aportación.
- Adecuada compactación con la maquinaria acorde con las características del terreno y con el grado de compactación recomendada.

- Dar la pendiente adecuada a los taludes según la definición del proyecto.

b) Conducciones

Las conducciones junto con las unidades de entrada y salida y arquetas de reparto, constituyen el sistema hidráulico de la planta. Su función es transportar el agua entre las diferentes lagunas o procesos. En general, salvo excepciones funcionan en lámina libre por gravedad. Por ello se suelen utilizar tuberías convencionales de saneamiento (P.V.C., fibrocemento, hormigón) cuidando la estanqueidad de las juntas para evitar que las fugas pongan en peligro la estabilidad de los taludes.

Deben ponerse pozos de registro en los cambios de dirección y a distancias no mayor de 50 m.

c) Unidades especiales

En este concepto se engloban las arquetas de reparto y las unidades de entrada y salida de las diferentes balsas.

Las arquetas de reparto tienen como función dividir el caudal de entrada entre las diferentes lagunas de un mismo proceso. Se suelen ejecutar con hormigón armado y el reparto se realiza con vertederos rectangulares de acero inoxidable o aluminio.

Las unidades de entrada a las diferentes lagunas constan en general de una arqueta receptora y una tubería que conduce el agua hasta el fondo de la laguna siguiendo el talud.

La arqueta se suele realizar en hormigón o fábrica de ladrillo y la tubería con cualquiera de los materiales utilizados para agua a presión pero con el timbraje más bajo.

Las unidades de salida para todas las lagunas constan de una arqueta a la cual se le acopla una chapa deflectora para evitar que salga la capa de agua superficial, ya que en el caso de las lagunas anaerobias es recomendable impedir que desaparezca la costra superficial formada, y en el de las lagunas facultativas y de maduración evitar la salida de algas que proliferan más en la capa superficial. Se pueden poner salidas a diferentes alturas (la menor a 2,5 m y la mayor a 5 m.), con el fin de tener la posibilidad de manejar distintos volúmenes en una misma laguna.

Estas arquetas se suelen realizar en hormigón y la chapa deflectora en acero inoxidable.

Es muy importante la adecuada disposición de las unidades de entrada y salida en las lagunas, para evitar zonas muertas en las mismas que reducen el volumen operativo de éstas y por tanto provocan sobrecargas.

d) Impermeabilización

Salvo cuando el terreno donde se construyan las balsas sea muy impermeable y la población a la que sirva de pequeñas dimensiones, es aconsejable impermeabilizar todas las lagunas con láminas artificiales.

Existen diferentes tipos de láminas aplicables a esta finalidad. Las más utilizadas son las de polietileno de alta densidad (con espesores de 1 a 1,5 mm.) y las de P.V.C. armado con fibra de vidrio o poliéster con los mismos espesores.

Es muy importante que la ejecución de esta unidad se realice de forma muy cuidadosa fundamentalmente en las uniones entre los diferentes paños y en la unión de éstos con las obras de fábrica, pues una pequeña fuga puede causar la ruina de la obra. Hay que perfilar muy bien los taludes y se suele poner una capa de geotextil para evitar roturas en la lámina.

e) Varios

En este concepto se engloba todas las unidades complementarias de urbanización de la instalación, como caseta de servicio, cerramiento, caminos de coronación, alumbrado y jardinería

Para el diseño de una planta de tratamiento mediante lagunas de estabilización hay que tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

Pretratamiento

Aliviadero de crecidas con By-pass general.

Dimensionamiento para el caudal punta de la reja de desbaste de gruesos y finos (tamiz), con sistema de limpieza y reserva.

Dimensionamiento amplio del desarenador con una unidad de reserva para la limpieza.

Disponer de un medidor de caudal.

Lagunas

Ajustarse al máximo a las curvas de nivel para optimizar el movimiento de tierras. Equilibrar el desmante con el terraplén.

Evitar la excesiva regularidad en la forma de las lagunas.

Disponer de una total flexibilidad de la instalación mediante By-pass y tuberías de interconexión entre las lagunas.

Considerar un volumen o número adicional en la primera laguna por acumulación de fangos, así como dispositivos de retención de flotantes.

Pendientes de taludes 3/1 ó 2/1 con protección mediante escolleras y resguardo mínimo de 0'5 m.

Salvo cuando el terreno donde se construyan las balsas sea muy impermeable y la población a la que sirva sea pequeña, es aconsejable impermeabilizar todas las lagunas con láminas artificiales.

Otros servicios

Prever accesos para la toma de muestras.

Zanjas para la recogida de aguas pluviales.

7. ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO Y RENDIMIENTOS

Dado que los tres tipos de lagunas (anaerobias, facultativas y de maduración) requieren niveles decrecientes de carga orgánica para funcionar correctamente, las plantas de tratamiento suelen estar constituidas por los tres tipos de estanque operando en serie, es decir, uno después de otro. De esta forma se alcanza una mayor calidad en el efluente final del sistema.

A continuación se muestran las disposiciones más comunes de las lagunas en plantas de tratamiento.

Posibles disposiciones de los tipos de tratamiento en el lagunaje.

FACULTATIVA			
FACULTATIVA	AEROBIA		
ANAEROBIA	FACULTATIVA		
FACULTATIVA	AEROBIA	AEROBIA	
ANAEROBIA	FACULTATIVA	AEROBIA	AEROBIA

De estas disposiciones cabe destacar:

- El incremento de lagunas en el total del proceso conduce a vertidos de mejor calidad y a más versatilidad en el sistema.
- El establecimiento de más de una laguna de cada tipo es interesante en el caso de que existan una fuerte variación estacional de población o para prever las operaciones de limpieza de fangos de las lagunas anaerobias.

Un esquema típico de una instalación de lagunaje consistirá en:

Aliviadero y by-pass general.

Rejas de desbaste.

Desarenado.

Medidor de caudal.

Lagunas anaerobias funcionando en paralelo.

Lagunas facultativas funcionando en paralelo.

Lagunas de maduración o aerobias funcionando en serie.

Medidor de caudal.

Los rendimientos de depuración que se alcanzan en las diferentes etapas aparecen en la siguiente tabla.

PARÁMETRO ELIMINADO	LAGUNAS		
	ANAEROBIAS	FACULTATIVAS	AEROBIAS
DBO5:	50-75%	75-95%	100%
Sólidos en suspensión:	50-80%	80-95%	100%
N-amoniaco:	0-15%	30-60%	35-80%
Fosfatos:	0-30%	0-30%	10-60%

8. PUESTA EN MARCHA Y MANTENIMIENTO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

a) Puesta en marcha

El comienzo del funcionamiento del lagunaje es problemático dado que los microorganismos responsables de la depuración no aparecen instantáneamente, sino que necesitan un período de tiempo más o menos largo, dependiendo de las condiciones ambientales.

Recomendaciones generales:

- Tratar de poner en marcha la planta durante la primavera o inicio del verano. La velocidad de crecimiento de los microorganismos es mayor en esta época.
- Poner en marcha sólo las lagunas necesarias, en función de las bases de partida del proyecto.

Lagunas anaerobias:

- Deben llenarse y comenzar a utilizar en continuo desde el principio, respetando el tiempo de retención indicado en el proyecto.

- Durante la primera época debe controlarse la evolución del pH, que debe mantenerse por encima de 7. De no ser así el funcionamiento no es correcto. Como medidas correctoras se pueden tomar las siguientes:

- * Si existe una E.D.A.R. convencional cerca, realizar una siembra de bacterias metanógenas procedentes de las digestiones anaerobias.

- * Corregir el pH de la balsa a añadiendo lechada de cal.

Lagunas facultativas:

- Llenado de la laguna hasta 1 m. de profundidad y dejar en reposo de 15 a 30 días hasta que aparezcan la coloración verde intensa; después ya puede funcionar en continuo.

- Si hay más de una laguna facultativa, hacer este proceso alternativamente; si no by-passar el efluente de las lagunas anaerobias hacia la salida de la planta.

Lagunas de maduración:

- Una vez que las lagunas facultativas están operando en continuo, llenar las lagunas de maduración y comenzar el funcionamiento en continuo.

Mantenimiento, problemas de funcionamiento y soluciones.

El mantenimiento se basa en dos aspectos fundamentales:

- Cuidado de la obra civil (sistema hidráulico, jardinería, etc..).

- Detección de problemas de funcionamiento y adopción de medidas correctoras.

LAGUNAS ANAEROBIAS

Indicadores de buen funcionamiento:

- * Coloración gris.
- * Burbujeo continuo en la superficie.
- * Formación de costra superficial sólida compuesta por grasas, aceites y materias flotantes.
- * Taludes interiores libres de vegetación.

Problemas de funcionamiento y medidas correctoras.

1.- Aparición de malos olores:

Causas:

Baja o alta carga.

Desajuste del caudal de entrada.

Caída repentina de la temperatura.

Variación de la composición del agua residual de entrada: conviene realizar algún tipo de analítica para determinar:

pH.

Presencia de sustancias tóxicas.

Medidas correctoras:

- * Para la sobrecarga:
 - Disminuir el caudal de entrada.
 - Aumentar el número de lagunas en funcionamiento.
 - Aumentar el volumen operativo de la laguna.
 - Introducir una siembra de bacterias "metanógenas".
 - Ajustar el pH.

- * Defecto de carga o caudal: disminuir el volumen operativo o el número de lagunas funcionando. Abrir salidas a diferentes alturas.
- * Caída brusca de la temperatura ambiente: tratar de aislar la superficie con paja o poliestireno para formar una costra aislante en la superficie de la laguna.
- * Presencia de tóxicos o valores anormales de pH: by-pasear la planta hasta detectar el vertido causante.

2.- Aparición de coloraciones rosáceas:

Causas:

- * Desarrollo de bacterias fotosintéticas del azufre, síntomas de falta de carga.

Medidas correctoras:

- * Las mismas que para esta causa se han indicado anteriormente.

3.- Desarrollo de mosquitos y otros insectos:

Causas:

- * Crecimiento de plantas acuáticas o en el borde de las lagunas.

- Medidas correctoras:

- * Mantener libre de plantas los taludes que están en contacto con el agua.

LAGUNAS FACULTATIVAS Y DE MADURACIÓN

Indicadores de buen funcionamiento:

- * Coloración verde intensa del agua y ausencia de sólidos sedimentables.
- * Superficie del agua libre de toda materia sólida.
- * Ausencia de plantas acuáticas y hierbas en los taludes.

A continuación se adjuntan unas tablas con los problemas y posibles soluciones para cada tipo de lagunas.

PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO Y MEDIDAS CORRECTORAS

LAGUNAS ANAEROBIAS		
Síntoma	Causa	Solución
Malos olores	Carga orgánica excesiva.	Puesta en servicio de nuevos módulos By-pass Aumentar la profundidad de trabajo Siembra de bacterias metanígenas Ajuste del pH.
	Carga orgánica demasiado baja	Reducción nº de módulos en servicio Disminuir la profundidad de trabajo Siembra de bacterias metanígenas.
	Caída brusca de la temperatura ambiente	Promover la formación de costra superficial con paja o poliestireno
	Tóxicos o valores anormales de pH en la alimentación	By-pass temporal de la planta hasta que se localice el vertido responsable.
Color rosa o rojo	Bacterias fotosintéticas del azufre, defecto de carga orgánica	Reducción nº de módulos en servicio Disminuir la profundidad de trabajo Siembra de bacterias metanígenas.
Presencia de mosquitos u otros insectos	Crecimiento de plantas acuáticas	Eliminación de todas las plantas acuáticas u otros posibles soportes para las larvas.
	Larvas en la costra superficial	Remover la costra para que las larvas se desprendan y sedimenten. Utilización local de insecticidas ecológicos.
Crecimiento de plantas acuáticas y malas hierbas en los taludes		Eliminación de todas las plantas, en los taludes internos; eliminar o recortar las malas hierbas en los taludes externos.

LAGUNAS FACULTATIVAS		
Síntoma	Causa	Solución
Acumulación de materias flotantes en superficie	Formación de costras debida a la acumulación de algas en superficie, especialmente después de épocas muy calurosas.	Promover la sedimentación de los agregados de algas o el fango usando una manguera, si hay agua corriente, o un rastrillo una vez que el viento haya arrastrado los sólidos hacia las orillas. Eliminar los agregados o los fangos mediante una red de limpieza de piscinas.
	Flotación del fango del fondo en épocas muy calurosas.	
	Acumulación de papeles, plásticos o grasas que no hayan sido retirados en el pretratamiento.	Eliminar todas las materias flotantes mediante red.
Color rosa o rojo (bacterias de azufre)	Sobrecarga Sobrecarga por vertidos estacionales incontrolados (alpechines, vinazas)	Aumentar el número de módulos en servicio Mejorar la distribución de caudales en las arquetas de reparto Si la sobrecarga se debe a un diseño deficiente, recircular parte del efluente. Paralizar la planta hasta que cese el vertido (by-pass) Renovar el agua de cada laguna mediante la introducción de todo el caudal de entrada a la planta durante un tiempo equivalente al doble del tiempo de residencia hidráulico.
Olores desagradables	Tóxicos en el agua residual	Paralizar la planta hasta que se localice el vertido responsable (by-pass)
	Períodos prolongados de mal tiempo	Poner más módulos en servicio
	Reducción en la mezcla inducida por el viento	Eliminar todos los obstáculos (vallas de obra, árboles) Si los obstáculos no son eliminables (montes, edificios), considerar la instalación de aireadores.
	Cortocircuitos	Identificar las causas. Aplicar siguiente tabla.

LAGUNAS FACULTATIVAS Y DE MADURACIÓN		
Síntoma	Causa	Solución
Anomalías de flujo	Localización deficiente de entradas y salidas	Rediseñar las entradas y salidas, teniendo en cuenta el régimen de vientos. Instalación de entradas y salidas múltiples Colocación de alimentación y desagüe de forma que los vientos dominantes sean perpendiculares al eje principal de flujo.
	Morfología deficiente de las lagunas	
	Corrientes inducidas por el viento	
	Desarrollo estacional de estratificación térmica	Colocación de entradas y salidas a varias profundidades para romper la estratificación térmica.
	Presencia de plantas acuáticas	Eliminación de todas las plantas acuáticas
	Acumulación de fangos en lagunas facultativas primarias	Retirar los depósitos de fangos del fondo
Presencia de mosquitos u otros insectos	Crecimiento de plantas acuáticas	Eliminación de todas las plantas acuáticas u otros posibles soportes para las larvas
		Cría de peces en lagunas de maduración
Crecimiento de plantas acuáticas y malas hierbas en los taludes.		Eliminación de todas las plantas en los taludes internos; eliminar o recortar las malas hierbas en los taludes externos.

9. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

* Ventajas:

- Bajo coste de implantación.
- Bajo coste de explotación.
- Personal de mantenimiento no especializado.
- Admite variaciones importantes de carga y caudal.
- No existen períodos de no funcionamiento.
- Reducción importante de gérmenes patógenos.
- Fácil integración paisajística.
- Rendimientos adecuados incluso con temperaturas muy bajas.

* Inconvenientes:

- Necesita una gran superficie.
- Recuperación lenta cuando se produce el deterioro del sistema biológico.
- Efluente con gran cantidad de algas.

10. BIBLIOGRAFÍA

AGAMIT S.A. 1991: Depuración por Lagunaje de Aguas Residuales. Manual de Operadores MOPT. Madrid.

AUXINI 1988: Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas por Percolación a Través de Lechos de Turba.

AGAMIT S.A. 1987: Curso Básico para Operadores de Estación de Agua Residual. Dirección Regional de recursos Hidráulicos, Gobierno Autónomo de la Región de Murcia.

AGAMIT S.A. 1988: Seguimiento Experimental de Lagunas de Estabilización. Dirección General de Medio Ambiente. MOPU, Madrid.

Gloyna, E.F., 1973: Estanques de Estabilización de Aguas Residuales. Monografía núm 60, Organización Mundial de la Salud. Ginebra

Metcalf-Eddy, 1979: Tratamiento y Depuración de Aguas Residuales. Ed Labor, Barcelona.

Middlebrooks, E.J., C.H. Middlebrooks, J.H. Reynolds, G.Z. Watters, S.C. Reed y D.B. George, 1982: Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading. Macmillan Pub. Co., Nueva York

Rojo Blanco, E., 1988: Aspectos biológicos del lagunaje. Cuadernos Técnicos. Consejería de Política Territorial y Obras Públicas. Comunidad Autónoma de Murcia. Murcia.

W.H.O., 1987: Wastewater Stabilization Ponds. Principles of Planning and Practice. WHO EMRO Technical Publication no 10, World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean, Alejandría.

Depuración de Aguas Residuales, Aurelio Hernández Muñoz. Colección Señor N° 9, Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P.

Tratamiento de Aguas residuales, basuras y escombros en el ámbito rural, editorial agrícola Española, Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias.