

## LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización, también llamadas lagunas de oxidación, son depósitos de agua de profundidad de entre 1 y 3.5 mts., y tienen como finalidad estabilizar la materia orgánica presente en las aguas residuales.

Este tipo de tratamiento se emplea extensamente en comunidades rurales o pequeñas y por su flexibilidad, bajo costo de inversión, operación y mantenimiento, es una opción a los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales.

La clasificación de estas lagunas de tratamiento depende de factores tales como: tiempo de retención, carga orgánica por unidad de área, proceso de estabilización (aerobio, anaerobio o mixto), profundidad de la laguna, etc.

En términos generales las lagunas se pueden clasificar como *lagunas de estabilización* si este es el primer paso de tratamiento de las aguas residuales, o como *lagunas de oxidación*, en caso de que las lagunas sean un paso posterior a otro previo proceso de tratamiento.

Si la carga orgánica por unidad de área es demasiado alta y no existe aireación mecánica o inducida y el suministro de oxígeno es insuficiente para tener oxígeno residual, la laguna es anaerobia.

Si la laguna es lo suficientemente profunda y existe una aireación inducida o natural solo para las capas superiores de agua, se tendrá una condición aerobia en la superficie de la laguna y anaerobia en el fondo de la misma. Este tipo de lagunas son llamadas facultativas.

Si se suministra aire por agitación superficial o por inyección, se tendrá una laguna aireada. La aireación puede ser baja o intensa, por lo que se tendrá lagunas de mezclado parcial y de mezclado total. La diferencia entre estos dos tipos de aireación, es que a las lagunas de mezclado completo se les suministra una agitación tan intensa que los sólidos que inicialmente sedimentan se encuentran en suspensión en el proceso de digestión microbiana. En las lagunas de mezclado parcial, la agitación no es tan intensa, por lo que casi todos los sólidos se encuentran en el fondo del depósito y la aireación mecánica únicamente se efectúa en los estratos superiores de la laguna.

Dependiendo de las condiciones de oxigenación será la naturaleza del proceso. Si la aireación atmosférica o mecánica es insuficiente, por medio del proceso de fotosíntesis y con los nutrientes disponibles, se empieza a desarrollar una gran biomasa de algas, que cubre el estanque o fosa de oxidación. Estas algas consumen bióxido de carbono de la atmósfera y producen oxígeno, el cual es necesario para otros microorganismos aerobios que degradan la materia orgánica. Bajo estas condiciones, se crea una relación de simbiosis entre microorganismos de diferente tipo, que finalmente estabilizan la materia orgánica presente en las aguas residuales.

La producción de algas en lagunas de tratamiento biológico, es un problema cuando el crecimiento de éstas es excesivo. Inclusive, se da el caso de que la gran producción de biomasa vegetal, causa una DBO mayor en el agua tratada que en el influente, si se considera la biomasa de algas como parte integral del efluente de las aguas residuales procesadas.

Por la naturaleza y características de las diferentes modalidades del proceso biológico en lagunas de estabilización o de oxidación, se pueden tener variaciones en el tratamiento, para obtener efluentes de mayor o menor calidad, según sean los requerimientos propios del efluente deseado.

### **7.0 LAGUNAS ANAEROBIAS:**

Las lagunas anaerobias son aquellas que tienen una gran carga orgánica por unidad de área. La carga orgánica en este tipo de lagunas es de 220 a 550 Kg DBO/día por hectárea de terreno. El tiempo de retención promedio del agua en la laguna es de 20 a 50 días y la profundidad varía de 2.5 a 5 metros. En este tipo de lagunas ocasionalmente, se tienen condiciones aerobias en la superficie de la laguna, pero la mayor parte del tiempo las condiciones anaerobias persisten en toda la laguna.

En este tipo de lagunas, el material orgánico suspendido sedimenta en el fondo del recipiente y se descompone anaeróbicamente formando inicialmente ácidos orgánicos y posteriormente la digestión en condiciones de anaerobiosis conduce a la descomposición de dichos ácidos volátiles orgánicos a bióxido de carbono y metano principalmente.

Este tipo de lagunas produce olores fétidos, por lo que un tratamiento de este tipo solo es conveniente en lugares alejados de núcleos de población.

A medida que pasa el tiempo, los lodos se acumulan en el fondo del receptor de aguas residuales y aunque estos lodos se degradan anaeróbicamente no es total la conversión a gases volátiles, por lo que ocurre un incremento gradual de la capa de lodos sedimentados y finalmente, una vez que la capa de sedimento rebasa la mitad del volumen de la laguna es necesario remover estos sólidos ya que el volumen del reactor o recipiente de digestión se reduce a la mitad de su capacidad original y la efectividad del proceso puede deteriorarse significativamente.

Los costos de extracción de los lodos de una laguna son sumamente altos, por lo que otra opción práctica es abrir nuevas lagunas de tratamiento y abandonar las lagunas originalmente construidas, hasta que estas se sequen completamente y pueda ser removido el lodo acumulado.

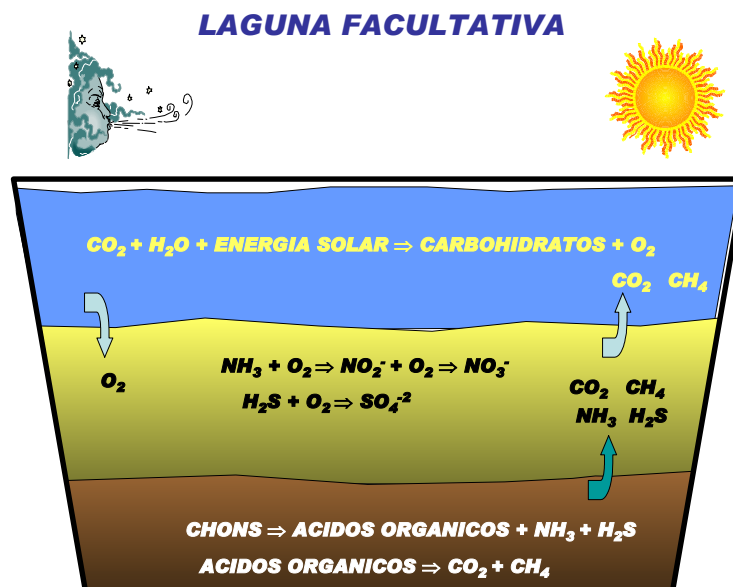
Este tipo de lagunas son recomendables y se emplean cuando la carga orgánica de las aguas residuales es muy alta y se dispone de superficie abundante para construir lagunas y mantenerlas alejadas de los centros de población. Ejemplo de esto son las aguas residuales de: rastros, establos, granjas avícolas, emparadoras ganaderas, etc.

Otra característica de esta variación en el tratamiento en lagunas es que casi siempre el agua producida en el proceso no cumple con las normas de calidad de aguas residuales tratadas, por lo que si se requiere de disminuir los valores de DBO a los límites que establece la legislación, deberá darse un tratamiento posterior a través de otro proceso biológico por lo que la depuración anaerobia solo se considera un pretratamiento o parte de un tratamiento biológico de las aguas residuales.

### 7.1 LAGUNAS FACULTATIVAS:

Las lagunas facultativas son la variación más importante en la depuración de aguas residuales en este tipo de tratamiento. Una laguna facultativa típicamente maneja cargas orgánicas de entre 55 y 200 Kg DBO/día por hectárea de terreno, con un tiempo de retención de entre 5 y 30 días. La profundidad de la laguna es de 1.2 a 2.5 mts.

En este tipo de lagunas facultativas se tienen varias capas o zonas en las cuales se tienen condiciones aerobias, facultativas y anaerobias.

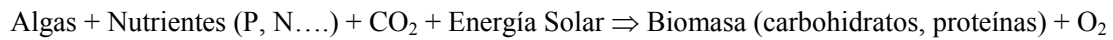


### 7.2 LAGUNA FACULTATIVA AEROBIA

Las condiciones aerobias que existen en la parte superior de una laguna facultativa aerobia se deben a la acción conjunta del viento y de la actividad fotosintética que se presenta en el cuerpo de agua.

Los nutrientes que se hallan presentes en las aguas residuales, principalmente nitrógeno y fósforo, favorecen la eutroficación del acuífero. Las algas formadas en la superficie al efectuar el proceso de

fotosíntesis y producir mas biomasa, requieren de bióxido de carbono del aire o del medio circundante para la síntesis de carbohidratos y proteínas y al mismo tiempo liberan oxígeno. La reacción simple de el proceso de fotosíntesis es:



El oxígeno producido en este proceso de fotosíntesis que se efectúa en la capa superficial, así como el que se integra desde la atmósfera hacia el agua a través del viento, es consumido por los microorganismos que degradan aeróbicamente el material orgánico, y eventualmente una parte de este oxígeno se transfiere a la capa mas interna que es la capa facultativa

La capa facultativa como su nombre lo indica, ocasionalmente es aerobia y otras veces es anaerobia. Cuando el oxígeno es abundante en la columna externa y este gas alcanza a penetrar a esta capa, las bacterias facultativas degradan aeróbicamente el material orgánico presente en el agua residual convirtiéndolo a nuevas células y gases inocuos como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

Durante la noche las algas no reciben energía solar, por lo que no producen oxígeno y por el contrario, lo consumen para seguir respirando, y consecuentemente esta capa es anaerobia.

La capa que se encuentra en la parte mas profunda de la laguna donde se está depositando el sedimento no recibe oxígeno, por lo que el proceso de degradación de materia orgánica en el fondo es anaerobio.

En la zona de anaerobiosis se descompone el material orgánico inicialmente a ácidos orgánicos volátiles y posteriormente a otros productos terminales estabilizados como son el bióxido de carbono y el metano. Si no se termina la reacción de anaerobiosis o sea la conversión de los ácidos orgánicos a  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  en esta capa mas interna, la conversión a productos estables se puede completar en la zona facultativa.

Uno de los gases mas ofensivos que se producen en las aguas residuales en condiciones anaerobias es el ácido sulfhídrico  $\text{H}_2\text{S}$ , que resulta de la reacción en condiciones reductoras del azufre presente en la materia orgánica. Para que este gas no se emita al medio ambiente y se presenten malos olores, el azufre se deberá oxidar a sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$ , en la zona facultativa o aeróbica de la laguna. También en esta región aerobia el amoníaco gaseoso que se forma por descomposición del material orgánico es convertido inicialmente a nitritos  $\text{NO}_2^-$  y posteriormente a nitratos  $\text{NO}_3^-$ , evitando la emisión de gas amoníaco  $\text{NH}_3$  que tiene como característica un olor desagradable.

De esta manera se tiene un proceso de simbiosis entre los diferentes microorganismos presentes en toda la laguna, y finalmente se puede obtener un agua bien depurada en un proceso en el cual, si se opera adecuadamente, no se presentan problemas de putrefacción y malos olores, ya que los gases que salen de la laguna son  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  principalmente.

Una de las desventajas de este tratamiento es que el agua que se obtiene como efluente está depurada de material orgánico soluble (DBO), pero tiene un alto contenido de material suspendido en forma de algas y microorganismos autotróficos, por lo que si se requiere de incrementar la calidad del agua producida, éstos deberán ser removidos por uno o la combinación de mas de un tratamiento como pueden ser: sedimentación, filtración, microfiltración, etc.

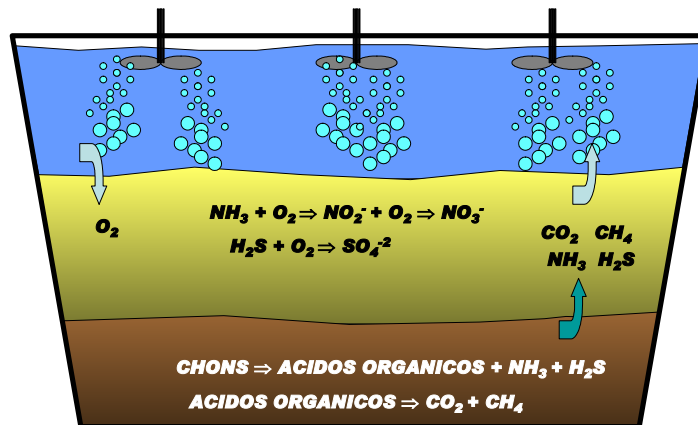
### **7.3 LAGUNA FACULTATIVA AIREADA:**

Una laguna facultativa aireada es similar a una laguna facultativa aerobia. Su diferencia con la facultativa aerobia es en la forma de tener una capa superficial aerobia. En la laguna facultativa aireada la oxigenación se lleva a efecto por medio de aireadores mecánicos superficiales.

Una de las ventajas en esta variación del proceso es que no se forma la biomasa autotrófica de algas y microorganismos que crecen y se desarrollan por efecto de la energía solar. Como desventajas, el costo de inversión y operación del sistema es mayor, ya que en una laguna facultativa no aireada lo único requerido es el recipiente o laguna de tratamiento y su costo de operación y mantenimiento es mínimo comparado con lo requerido en una laguna con aireación natural.

En ambos tipos de lagunas facultativas: aerobias y aireadas, al paso del tiempo ocurre lo mismo que en las lagunas anaerobias: finalmente estas se llenan de sólidos sedimentados y deberán limpiarse o renovarse por nuevas lagunas después de cinco ó diez años de operación.

**LAGUNA FACULTATIVA AIREADA**



**Figura 2:** Laguna aerobia/anaerobia con oxigenación por aireadores superficiales.

**7.4 LAGUNAS COMPLETAMENTE AIREADAS O DE MEZCLA TOTAL:**

Las lagunas completamente aireadas o de mezcla total, son aquellas en las cuales por agitación mecánica los sólidos suspendidos no se encuentran depositados en el fondo del estanque, sino que están completamente mezclados, en forma similar a como ocurre en un digestor biológico de lodos activados. Al tener mayor contacto los lodos con el agua a depurar, el proceso es mas eficiente y se requiere de menor tiempo de residencia para lograr una disminución significativa de la demanda bioquímica de



LAGUNAS CON AIREACIÓN



**Figura 3:** Laguna con oxigenación por aireadores superficiales.

**7.5 LAGUNAS AEROBIAS DE MADURACIÓN:**

Las lagunas de maduración es una forma de depurar las aguas residuales tratadas, así como de desinfectar dichas aguas tratadas.

Una laguna de maduración se emplea cuando se tiene un agua que previamente ha recibido un tratamiento para disminuir su DBO y se pretende incrementar la calidad del agua. Por ejemplo: si un agua con alto contenido de material orgánico se trata inicialmente en una laguna facultativa y el efluente de esta laguna facultativa se pasa a una segunda laguna, ésta será de maduración.

En la laguna de maduración se forma una capa aerobia, en la cual se desarrolla una biomasa de algas y microorganismos fotosintéticos que proporcionan el oxígeno necesario para la degradación aerobia del sustrato residual.

En estas condiciones, el sustrato no es muy abundante, por lo que las especies microbianas están en fase endógena, además de que se consumen entre si, subsistiendo solamente las mas aptas. La radiación ultravioleta que es parte de la radiación solar y que incide en la superficie de la laguna, también causa la inactivación y muerte de muchos microorganismos y bacterias, por lo que es posible tener una reducción altamente eficiente de éstos, lo cual inclusive, cuando el tiempo de exposición es largo y la radiación solar es intensa, produce agua con características que cumplen con las normas de calidad microbiológica de las aguas residuales evitando así la necesidad de desinfectar el agua residual tratada.

**CALCULO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN:** Las lagunas de estabilización se calculan de acuerdo a ciertos parámetros empíricos y semiempíricos.

**LAGUNAS AIREADAS CON MEZCLADO COMPLETO:** De acuerdo a la teoría, una laguna de estabilización de mezclado completo sin recirculación, sigue una cinética de primer orden y el grado de remoción de DBO estará dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{S_f}{S_0} = \frac{1}{1 + k\theta_r} \quad (1)$$

Donde:

$S_f$ =DBO final

$S_0$ =DBO inicial

$k$ =Constante específica de velocidad de reacción = 0.5 días<sup>-1</sup> para la mayoría de las aguas residuales domésticas.

$\theta_r$ = Tiempo de retención del agua en la laguna o reactor

**LAGUNAS ANAEROBIAS Y FACULTATIVAS:** Para las lagunas anaerobias y facultativas se emplea una ecuación desarrollada por Wehner y Wilhelm, la cual considera una laguna de este tipo como un reactor con un patrón de flujo arbitrario, y que oscila entre un reactor de mezclado completo y un reactor de flujo pistón.

Esta ecuación es la siguiente:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{4ae^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} \quad (2)$$

$S$ = Concentración o DBO final del sustrato

$S_0$ = Concentración o DBO inicial del sustrato

$a = \sqrt{1 + 4ktd}$

$d$ = factor de dispersión= $D/uL$

$D$ =Coeficiente de dispersión axial mts<sup>2</sup>/hra

$u$ =velocidad del fluido mts/hra

$L$ =Longitud característica mts

$k$ =constante específica de reacción días<sup>-1</sup>  
 $t$ =tiempo de retención días

El factor de dispersión debe determinarse experimentalmente, y sus límites son cero para un reactor en flujo pistón ideal y para un reactor completamente mezclado, el factor de dispersión es infinito. Para la mayoría de las lagunas de estabilización, el factor de dispersión se encuentra entre 0.1 y 2.0. También el factor de dispersión puede determinarse mediante la formula:

$$d = \frac{M}{0.254M + 1.014M^2 - 0.261} \quad (3)$$

$M=L/W$  donde  $L$ =longitud de la laguna  $W$ =ancho de la laguna

$k$ , la constante cinética de velocidad de reacción para remoción de DBO, es otro parámetro que debe determinarse experimentalmente y su valor es de entre 0.05 a 1.0 días<sup>-1</sup>. Para aguas residuales domésticas típicas, si no puede determinarse experimentalmente, el valor de  $k$  debe considerarse de 0.5 días<sup>-1</sup>

**Tabla I:** Variaciones en el proceso de tratamiento de aguas residuales por lagunas

<i>Tipo de Laguna</i>	<i>Nombre Común</i>	<i>Características</i>	<i>Aplicación</i>
Aerobia	a: De Baja Velocidad	Diseñada para mantener condiciones aerobias en todas las áreas de la laguna	Tratamiento de residuos orgánicos solubles y efluentes secundarios
	b: De Alta Velocidad	Diseñada para tener una alta producción de algas y tejido celular	Remoción de Nutrientes. Tratamiento de residuos solubles. Conversión de desechos
	c: Laguna de Maduración o Laguna Terciaria	Similar a las Lagunas de Baja Velocidad pero con baja carga orgánica	Empleado como un paso adicional de tratamiento de aguas previamente tratadas en filtros biológicos o lodos activados
Aerobio/Anaerobio. Oxígeno suplementado con aireación externa	Lagunas Facultativas con aireación	Más profundas que las lagunas de aireación de alta velocidad. La aireación y la fotosíntesis proporciona oxígeno para la estabilización de las capas superiores. Las capas inferiores llevan un proceso de digestión anaerobia.	Para tratamiento de aguas domésticas o industriales sin tratamiento previo
Aerobio/Anaerobio. Oxígeno suplementado por algas	Lagunas Facultativas	Similar al anterior excepto que el oxígeno es proporcionado por aireación natural y por fotosíntesis	Para tratamiento de aguas domésticas o industriales sin tratamiento previo
Anaerobia	Laguna Anaerobia	Las condiciones anaerobias prevalecen aunque por periodos la laguna pueda ser facultativa	Tratamiento de aguas domésticas e industriales
Anaerobia seguida por Aerobia/Anaerobia	Sistema de Lagunas	Combinación de Lagunas como se describe. Puede utilizarse recirculación de la laguna aerobia a la anaerobia	Tratamiento completo de aguas residuales municipales o industriales con una alta remoción de bacterias.

**Tabla II:** Características de las variaciones en el proceso de tratamiento de aguas residuales por lagunas

<b>Parámetro</b>	<b>Aerobia de Largo Tiempo de Retención</b>	<b>Aerobia de Corto Tiempo de Retención</b>	<b>Aerobia de Maduración</b>	<b>Laguna Aerobia/Anaerobia ó Facultativa</b>	<b>Laguna Anaerobia</b>	<b>Laguna de aireación Intensa</b>
Régimen de Flujo	Intermitente Mezclada	Intermitente Mezclada	Intermitente Mezclada	Mezclado en la capa superficial		Completamente mezclada
Tamaño de la Laguna (hectáreas)	<4 múltiples	0.1-0.8	0.8-4 múltiples	0.8-4 múltiples	0.1-0.8 múltiples	0.8-4 múltiples
Operación	Serie o Paralelo	Serie	Serie o Paralelo	Serie o Paralelo	Serie	Serie o Paralelo
Tiempo de Retención (días)	10-40	4-6	5-20	5-30	20-50	3-10
Profundidad (metros)	0.9-1.2	0.3-0.45	0.9-1.5	1.2-2.4	2.4-4.8	1.8-6
pH	6.5-10.5	6.5-10.5	6.5-10.5	6.5-8.5	6.5-7.2	6.5-8
Rango de Temperatura °C	0-30	5-30	0-30	0-50	6-50	0-30
Temperatura óptima °C	20	20	20	20	20	20
Carga Orgánica Kg DBO/hera-día	70-135	90-180	>17	55-200	225-560	
% Conversión de DBO	80-95	80-95	60-80	80-95	50-85	80-95
Principales productos de conversión	Algas, CO <sub>2</sub> , Tejido celular	Algas, CO <sub>2</sub> , Tejido celular	Algas, CO <sub>2</sub> , Tejido celular, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Algas, Metano, CO <sub>2</sub> , Tejido celular	Metano, CO <sub>2</sub> , Tejido celular	CO <sub>2</sub> , Tejido celular
Concentración de algas mg/lto	40-100	100-260	5-10	5-20	0-5	
Sólidos suspendidos en el efluente mg/lto	80-140	150-300	10-30	40-60	80-160	80-250