

FT-BIO-011

**FICHAS TÉCNICAS
DE ETAPAS DE PROCESO DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

LAGUNAS AIREADAS

SERIE:TRATAMIENTO SECUNDARIO

TÍTULO	LAGUNAS AIREADAS (FT-BIO-011)
Última actualización	Septiembre 2015
Última revisión	

LAGUNAS AIREADAS (FT-BIO-011)

Fecha	Septiembre 2015		
Autores	Alfredo Jácome Burgos Joaquín Suárez López Pablo Ures Rodríguez		
Revisado por			
Actualizado	Fecha	Por:	Apartado actualizado

ÍNDICE

-
- 1.- INTRODUCCIÓN
 - 2.- DESCRIPCIÓN
 - 3.- CRITERIOS DE DISEÑO
 - 4.- DECANTACIÓN SECUNDARIA
 - 5.- CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES
 - 6.- ESPECIFICACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL
 - 7.- CONTROL DE LAGUNAS
 - 8.- EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

BIBLIOGRAFÍA

- ANEXO 1.- ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE NECESARIA
ANEXO 2.- DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LAS UNIDADES DE PROCESO
-

1.- INTRODUCCIÓN

El contenido de esta ficha técnica sobre “lagunas aireadas” se basa principalmente en las siguientes referencias:

- “Aerated Pond”, preparado por la *Eawag* (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology), con la colaboración de Dorothee Spuhler (GmbH), publicada en SSWM (<http://www.sswm.info>) (2015).
- “Aerated, partial mix lagoons”, Technology Fact Sheet 832-F-02-008, publicada por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (U.S. EPA 2002).
- “Principles of design and operations of wastewater treatment pond systems for plant operators, engineers, and managers”, EPA/600/R-11/088, publicada por U.S. EPA (2011).

2.- DESCRIPCIÓN

Una laguna aireada consiste en un gran reactor aerobio agitado, similar a una laguna facultativa, pero con la diferencia de que se mejora la oxigenación natural. Mediante aireadores mecánicos se suministra oxígeno y se mantiene a los organismos aerobios en suspensión y mezclados con el agua para alcanzar una elevada tasa de degradación orgánica. Ya que se mejora la oxigenación natural, las lagunas aireadas pueden ser más profundas, reduciendo la demanda de superficie, y se adaptan mejor a climas más fríos. El efluente puede servir para recarga de acuíferos, pero el lodo generado demanda un tratamiento adicional o un correcto vertido o destino final.

Incrementar la mezcla y la aireación mediante equipos mecánicos implica que estas lagunas pueden ser más profundas y tolerar cargas orgánicas mayores en comparación con lagunas facultativas. El incremento de aireación sirve para aumentar la degradación. Y como el oxígeno se introduce por medios mecánicos, ya no se depende de la fotosíntesis, pueden funcionar adecuadamente en latitudes con pocas horas de luz solar. La aireación mecánica mejora la eficiencia del tratamiento y reduce el tiempo de retención hidráulica (TRH) necesario para la degradación aerobia de la materia orgánica (Rose 1999, citada por U.S. EPA 2011). En su caso, esto también incrementa la reducción de patógenos debido al efecto positivo del nivel de oxígeno sobre la desinfección del agua mediante la luz solar (Curtis et al. 1992). Por su menor necesidad de superficie es recomendable tanto en áreas rurales como zonas de la periferia urbana (Tilley et al. 2014). Pero, el uso de equipos mecánicos de aireación incrementa la complejidad del sistema y demanda energía y personal técnico (Arthur 1983).

Las lagunas aireadas, en general, se clasifican por su grado de mezcla, habiendo dos tipologías (SSWM 2015):

- Lagunas facultativas aireadas (lagunas con mezcla parcial), que se emplean cuando se busca un sistema aerobio más compacto que una laguna facultativa normal, o cuando las cargas para una laguna facultativa son muy elevadas. Las lagunas mezcladas parcialmente se emplean para el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales. Esta tecnología ha sido utilizada ampliamente en los Estados Unidos al menos desde hace 40 años (U.S. EPA 2002).
- Lagunas aireadas de mezcla completa. En sistemas equivalentes o comparables tratando aguas residuales urbanas, los sistemas de mezcla completa aproximadamente emplean unas 10 veces más de energía que los de mezcla parcial (U.S. EPA 2002; MPDES, 2012).

En algunos casos, la celda o compartimento inicial de un sistema puede ser de mezcla completa seguida por celdas de mezcla parcial y una de decantación final. La mayor parte de la energía en un sistema de mezcla completa se gasta en la función de mezclar, no para suministrar oxígeno (U.S. EPA 2002).

Los aireadores usados en lagunas de mezcla parcial se instalan en superficie de la laguna y suministran suficiente oxígeno para satisfacer la demanda por oxidación aerobia, pero permiten la sedimentación de una capa de lodo en el fondo de la laguna. Una parte de los sólidos se mantienen en suspensión para ayudar al tratamiento global. Esto permite la fermentación anaerobia del lodo sedimentado. Estas lagunas de mezcla parcial son conocidas también como lagunas facultativas aireadas (SSWM 2015) y generalmente se diseñan con al menos tres celdas en serie, con un tiempo de retención total que dependerá de la temperatura del agua (U.S. EPA 2002).

Los aireadores usados en lagunas de mezcla completa pueden ser mecánicos de superficie o difusores de fondo o sub-superficiales. Ambos deben suministrar suficiente energía para mantener los sólidos en suspensión. Las lagunas aireadas de mezcla completa en esencia son unidades de fangos activos sin recirculación de lodos (Arthur 1983; U.S. EPA 2002). Como los lodos se mantienen en suspensión, el efluente de una laguna de mezcla completa requiere una decantación final.

Como cualquier otro caso de lagunas de estabilización, el efluente de una laguna aireadas puede ser empleado en agricultura (p.e.: para irrigación) o acuicultura, aunque su contenido de nutrientes es bajo. Sin embargo, el lodo

que se acumula en el fondo de una laguna mezclada parcialmente o en la celda o laguna de decantación (en el caso de laguna de mezcla completa) requiere ser purgado regularmente. Y, si se pretende usarlo en agricultura, requerirá tratamiento adicional (p.e.: compostaje, digestión anaerobia o humedales artificiales).

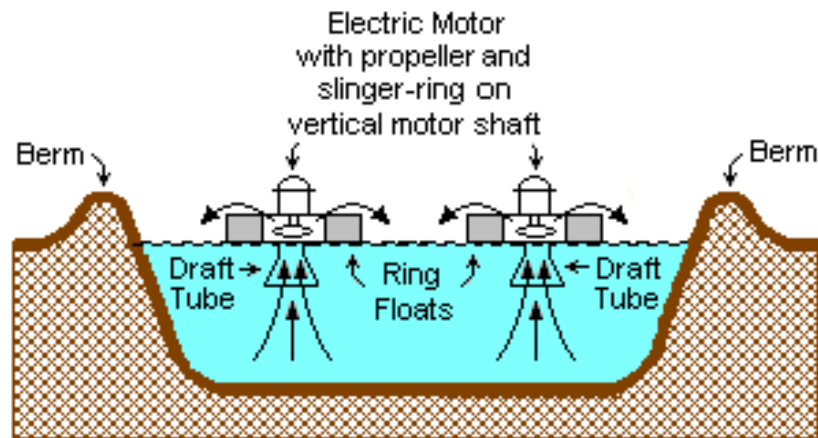


Figura 1.- Esquema de una laguna aireada. (https://en.wikipedia.org/wiki/Aerated_lagoon, acceso Julio 22, 2015).

2.1.- Aplicabilidad

Las lagunas aireadas son adecuadas para aglomeraciones pequeñas e industrias. Han sido usadas para tratar agua residual urbana (bruta, pretratada o decantada), así como para tratar aguas residuales industriales biodegradables fuertemente cargadas.

Una laguna aireada mecánicamente puede tratar eficientemente un afluente concentrado y reducir significativamente el nivel de patógenos. Requiere que el suministro eléctrico sea ininterrumpido y que el recambio o sustitución de partes esté disponible para evitar periodos largos con el sistema fuera de servicio que podría llevar a que la laguna entre en anaerobiosis.

Las lagunas aireadas pueden emplearse en zonas rurales o peri-urbanas. Son especialmente adecuadas en regiones con disponibilidad de suelo barato y alejado de viviendas y zonas comerciales. Las lagunas aireadas pueden funcionar en un rango amplio de climas y requieren menos superficie que las lagunas de estabilización. Pero también son más complejas desde un punto de vista técnico y de explotación.

Ventajas

- Resistencia a sobre cargas orgánicas e hidráulicas
- Elevada reducción de DBO y de patógenos
- Sin problema significativo por insectos o malos olores, si se dimensiona y explota correctamente
- Puede tratar altas cargas
- Requiere menos suelo que el lagunaje convencional natural
- El agua tratada puede reusarse (p.e.: si una laguna de maduración sigue a una laguna aireada de mezcla parcial) o verterse (p.e.: si una decantación sigue a una laguna aireada de mezcla completa)

Desventajas

- Requiere una superficie extensa de suelo
- Se requiere una fuente estable de energía eléctrica, y tiene elevado consumo de energía
- Los costes de capital y explotación podrían ser elevados, dependiendo del precio del suelo y de la energía
- Personal cualificado para la explotación y mantenimiento
- Quizá no todos los materiales y partes estén disponibles localmente
- Requiere un diseño y construcción dirigidas por expertos
- El lodo, y quizá el agua tratada, pueden requerir tratamiento adicional y/o un vertido final adecuado

2.2.- Estimación de la superficie necesaria para lagunas de tratamiento

La superficie necesaria dependerá de la calidad exigida al efluente tratado, el tipo de lagunaje propuesto y de la localización geográfica (es decir: la temperatura). Para un caudal de 3785 m³/d de aguas residuales domésticas, se

presenta en la tabla siguiente la estimación de superficie para tres tipos de clima: frío, templado y cálido. Las estimaciones contemplan el pretratamiento que pueda requerirse y zonas del sitio sin ningún uso específico:

Tabla.- Estimación de superficie (en ha) para un caudal de 3785 m³/d (Adaptada de U.S. EPA 2011)

Sistema	Clima frío	Clima templado	Clima cálidos
Laguna aireada, mezcla parcial	20	15	12
Laguna aireada, mezcla completa	2	2	1

3.- CRITERIOS DE DISEÑO

El afluente debe ser desbastado y pre-tratado para eliminar residuos grandes (basura) y partículas gruesas que podrían interferir con el funcionamiento de los aireadores. En el caso de lagunas de mezcla completa, se requiere una decantación secundaria para eliminar los sólidos en suspensión.

En general, las lagunas aireadas pueden requerir del siguiente equipamiento: sistema de impermeabilización, elementos de entrada y salida del agua residual, control hidráulico, deflectores y divisores flotantes y equipos de aireación.

3.1.- Lagunas aireadas facultativas (lagunas de mezcla parcial)

El dimensionado de lagunas aireadas de mezcla parcial es muy similar al de una facultativa típica, con una zona aerobia próxima a la superficie y otra anaerobia de fondo. Pero requieren menos superficie, porque no dependen de la fotosíntesis.

Los principales criterios del diseño son TRH y profundidad. En general, el TRH presenta un rango de 10 a 30 días, con un valor típico de 20 días (U.S. EPA 2002) para cargas orgánicas de 20 a 30 g DBO/m³/d (Sasse 1998). La profundidad presenta un rango de 1.8 a 6.0 metros, siendo 3 m el valor más común. Se ha informado de buenos resultados del tratamiento con lagunas de profundidad en el orden de los 2 metros (Arcievala y Mohanrao 1969). En general, las lagunas que están en la parte baja del rango de profundidad suelen ser lagunas facultativas reconvertidas en aireadas de mezcla parcial (U.S. EPA 2002; 2011).

La cantidad de energía requerida dependerá de la intensidad de la mezcla. En sistemas de mezcla parcial se emplea de 1 a 2 W/m³, dependiendo del espesor y configuración del sistema (U.S. EPA 2011).

3.2.- Lagunas aireadas de mezcla completa

Las lagunas de mezcla completa son más pequeñas que las de mezcla parcial. Son esencialmente aerobias. Los aireadores sirven para garantizar el suministro de oxígeno y que la biomasa esté en suspensión en el seno líquido. Estos sistemas también se conocen como reactores de mezcla completa.

La biomasa y los sólidos orgánicos del afluente se mantienen juntos en suspensión. Esto mejora el contacto entre las bacterias contenidas en la biomasa (responsables de la degradación) y el agua residual degradada. Por lo tanto, la eficiencia de una laguna de mezcla completa se incrementa respecto a la de mezcla parcial, y esto permite una reducción del volumen.

El TRH generalmente es menor de 3 días, excepto cuando se trata aguas residuales fuertemente cargadas (U.S. EPA 2011). Según von Sperling (2005) el TRH típico está en un rango típico de 2 a 4 días, un tiempo suficiente para una eficaz eliminación de DBO.

Un sistema de mezcla completa requiere unas 10 veces más energía que una de mezcla parcial. Por ejemplo, con un TRH de 4 días, que resulta en un 70 a 90% de eliminación de DBO, se requiere alrededor de 20 W/m³ (Arthur 1983).

3.3.- Resumen de criterios de diseño

Tabla.- Criterios de diseño de lagunas aireadas

Parámetro	Laguna de mezcla parcial	Laguna de mezcla completa
TRH (días)	10-30 (típico 20)	2 - 4 (típico 3)
Profundidad (m)	1.8 - 6 (típico 3)	2 - 5
Carga orgánica (g DBO/m ³ /d)	20 - 30	---
Demanda de energía (W/m ³)	1-2	Mínimo 20

3.4.- Rendimiento

Según la U.S. EPA (2002, 2011), las lagunas aireadas pueden alcanzar significativos rendimientos:

- DBO₅: dependiendo de la concentración afluente, se puede esperar hasta un 95% de reducción, y un efluente con menos de 30 mg/L.
- SS: la concentración efluente está en un rango de 20-60 mg/L, pudiendo alcanzar menos de 30 mg/L si se dota de una decantación secundaria final.
- Durante el verano, y si el nivel de OD es adecuado, se puede producir una nitrificación significativa.
- En condiciones apropiadas, se produce reducción del contenido de fósforo (15-25%).

El sistema de lagunaje aireado es relativamente simple de explotar, siendo fiable para la eliminación de DBO. La reducción de SS puede verse afectada por la presencia de algas, pero en general es aceptable. La vida útil de una laguna aireada se sitúa en 30 años o más.

Es común predecir el rendimiento de las lagunas aireadas mediante una expresión cinética de orden 1 respecto a la DBO (o DQO):

$$C_e = \frac{C_0}{[1 + (K_T)(t)/n]^n}$$

Donde:

- C_e = conc. efluente DBO (o DQO) (mg/L)
- C_0 = conc. afluente de DBO (o DQO) (mg/L)
- K_T = constante a temperatura T (°C) = $K_{20} \times \theta^{(T-20)}$
- K_{20} = constante cinética a 20 °C
- θ = coeficiente de corrección por temperatura (1.036 para agua residual doméstica)
- T = temperatura del agua (°C)
- t = tiempo de retención hidráulica
- n = número de celdas de igual volumen

Del estudio de Shah et al. (2012) sobre tratamiento de agua residual textil con una laguna aireada a escala de laboratorio, el valor de K_T fue de 0.797 d⁻¹ para DBO y de 0.390 d⁻¹ para DQO (rango de temperatura del estudio: 26 - 32 °C).

Para agua residual doméstica el valor común de K_{20} es 0.276 d⁻¹ (U.S. EPA 2002).

Si se usa una serie de celdas con volúmenes desiguales y se espera coeficientes cinéticos diferentes en cada celda, se debería usar la expresión general del modelo de orden 1:

$$\frac{C_n}{C_0} = \left(\frac{1}{1 + k_1 t_1} \right) \left(\frac{1}{1 + k_2 t_2} \right) \dots \left(\frac{1}{1 + k_n t_n} \right)$$

Donde, k_1, k_2, \dots, k_n son las constantes de reacción de la celda 1, 2, ..., n (se suele asumir que todas tienen el mismo valor si no hay datos que demuestren lo contrario) y t_1, t_2, \dots, t_n son los tiempo de retención hidráulica de cada celda.

Mara (1975, citado por U.S. EPA 2011) ha observado que un número de reactores de igual volumen es una solución más eficiente que una serie de celdas de volúmenes desiguales. Sin embargo, debido a la topografía del sitio y a otros factores, podrá ser necesario construir celdas de reacción de volúmenes desiguales.

4.- DECANTACIÓN SECUNDARIA

Lagunas aireadas parcialmente mezcladas (Lagunas facultativas aireadas)

El tiempo de retención en la unidad de decantación, o en una zona de una de las celdas usada para la sedimentación de los lodos, debería limitarse a 2 días para minimizar el crecimiento de algas. Debería prestarse especial cuidado al diseño de las estructuras de entrada y salida.

Lagunas aireadas de mezcla completa

Las lagunas aireadas de mezcla completa requieren una unidad de decantación independiente. La decantación se puede hacer con TRH relativamente cortos, de 2 días, pero con una purga frecuente de lodos (von Sperling 2005); o se puede hacer con una gran laguna facultativa con TRH de 10 días, que permite un tiempo de almacenamiento de lodos más prolongado.

5.- CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES

Las lagunas deberán impermeabilizarse para evitar la lixiviación y/o infiltración. La impermeabilización puede hacerse con arcilla, tierra compactada, materiales impermeables tipo membranas, etc., y también con una combinación de materiales (naturales y sintéticos). Alrededor de la laguna se deberá construir una berma de protección, para lo que se podrá utilizar el propio material de excavación. Esta berma sirve para proteger a la laguna de la erosión y del ingreso de escorrentía.

El servicio eléctrico debe ser ininterrumpido. Debe estar disponible el recambio de partes para evitar prolongados periodos sin aireación que pueden llevar a condiciones anaerobias de la laguna (Tilley et al., 2014).

La laguna es una gran extensión de aguas residuales con patógenos, que puede causar riesgos sanitarios por efecto de los aerosoles liberados al aire (Arthur 1983). Se debe tener cuidado para asegurarse de que nadie entra en contacto con el agua. Las unidades de aireación pueden ser un peligro para humanos y animales. Por lo tanto, se deben tomar para evitar la entrada en la zona (cercas, señalización, etc.).

Lagunas mezcladas parcialmente

La profundidad de la laguna debe planificarse teniendo en cuenta la compatibilidad con el sistema de aireación y la necesidad de una capa aerobia de aproximadamente 2 metros para oxidar los gases de la descomposición anaerobia de los lodos del fondo (SSWM 2015).

Cuando se emplean sistemas de difusión de aire las lagunas se construyen con una profundidad de 6 metros para asegurar la máxima transferencia de oxígeno. Generalmente, se diseñan con 3 celdas en serie. En la mayoría de los casos la aireación no se aplica de manera uniforme a lo largo del sistema. En general, la aireación más intensa (hasta un 50% del total requerido) se usa en la primera celda (U.S. EPA 2002, 2011). La celda final puede tener poca o ninguna aireación para permitir la sedimentación. En algunos casos se complementa con una pequeña laguna de sedimentación después de la última celda.

El equipo de aireación típico provee de 3.7 a 4 k O₂/kWh, mientras que los aireadores mecánicos de superficie ofrecen 1.5 a 2.1 kg O₂/kWh.

Aunque se diseñan usando el modelo de mezcla completa, se recomienda que la configuración de las celdas tengan una ratio largo:anchura de 3:1 o 4:1. Se reconoce que el modelo de flujo hidráulico en sistemas de mezcla parcial se aproxima a un flujo pistón.

Una modificación física consiste en el uso de cortinas de plástico con el apoyo de flotadores y anclados a la parte inferior para dividir lagunas existentes en varias celdas y/o servir como deflectores para mejorar las condiciones hidráulicas.

Lagunas aireadas de mezcla completa

Se recomienda un sistema de múltiples celdas con al menos tres celdas en serie, con estructuras de entrada y salida adecuadas para maximizar la eficacia del volumen de diseño. Además, se recomienda que las celdas se puedan configurar con una relación longitud/anchura de 3:1 o 4:1.

Los aireadores se deben colocar con cuidado para evitar zonas muertas donde los sólidos sean capaces de sedimentar con facilidad. Aireadores pequeños en lugar de grandes unidades proporcionan una mezcla mejor repartida, y las esquinas redondeadas en las lagunas también ayudan a evitar zonas muertas (Arthur, 1983).

6.- ESPECIFICACIONES EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Williams y Hutto (1961) evaluaron lagunas aireadas a escala piloto para tratar aguas residuales de la industria textil. La industria en la cual se construyó la instalación piloto está ubicada en Mooresville (Carolina del Norte). Los procesos de producción incluyen teñido y acabado. El acabado incluye mercerización de la tela, aplicación de varios acabados y muchas operaciones de lavado. Las lagunas piloto comprendieron 2 unidades, cada una de 9.1 x 6.1 metros y una profundidad neta de 1.5 m. Las celdas fueron conectadas en serie. En la entrada de cada celda se colocaron deflectores para evitar los flujos preferenciales. El caudal de alimentación comprendió un 61% del proceso de teñido y un 39% procedió de las operaciones de acabado. La aireación fue realizada solo en la primera laguna. La segunda laguna se empleó como decantador. Después de 8 semanas de operación con 48 h de aireación y 48 h de decantación, los períodos de aireación y sedimentación fueron reducidos a 36 horas y así se explotó las lagunas durante 2 semanas. Después, durante 3 semanas las unidades fueron explotadas con 24 horas de retención, y finalmente durante 1 semana con un TRH de 14 a 16 horas. La reducción de la DBO₅ para cada TRH ensayado se presenta en la siguiente tabla:

TRH (h)	DBO ₅ eliminación (%)
14-16	33
24	48
36	71
48	81

TRH = tiempo de retención hidráulica = periodo de aireación

Finalmente, con un TRH \geq 48 horas la laguna aireada alcanzó un 75 a 80% de eliminación de DBO, con decantación secundaria final.

Estos resultados se aplicaron para construir una planta de tratamiento con 2 líneas en paralelo, cada línea con una laguna aireada de 76.9 x 33.9 m de superficie y 3.6 m de profundidad y una laguna de decantación de 36.9 x 20.6 m de superficie y 3.6 m de profundidad. Los TRH de diseño fueron 48 horas de aireación y 12 horas de decantación. Cada laguna aireada fue dotada de 4 aireadores de superficie de 25 hp (18.7 kW) de potencia unitaria, con un diámetro de rotor de 2.2 m, operando a una velocidad de 40 rpm. El flujo de oxígeno fue de 40 kg/h/unidad, aproximadamente 2 kg/kg DBO afluente. "Comentario de los autores: como la ratio energía/volumen fue de 8 W/m³ se deduce que las lagunas fueron diseñadas como sistemas de mezcla completa. Los sistemas de mezcla parcial solo requieren de 1 a 2 W/m³ de capacidad, dependiendo de la profundidad y de la configuración del sistema (U.S. EPA 2002)".

Opitz (1974) evaluó una laguna aireada para el tratamiento de las aguas residuales procedentes de un núcleo urbano y de una industria textil (aguas residuales mixtas). El efluente textil fue el principal aportador de DBO. El procesamiento de fibras de algodón y mixtas en la fábrica textil comprende corte, descolado, cepillado, blanqueo y acabado. El agua residual doméstica pasa por un tratamiento primario con tanque Imhoff antes de mezclarse con las aguas residuales del textil. El agua mixta fluye hacia la primera de tres lagunas: anaerobia, aerobia y maduración. El efluente de la tercera laguna se vierte al medio receptor (río). Las normas de vertido establecen un máximo de 30 y 300 mg/L de DBO y DQO, respectivamente, y valores promedio de 20 y 200 mg/L, respectivamente. El conjunto de lagunas (anaerobia y 2 aerobias) alcanza eficiencias promedio de 79.3%, 62.5% y 60.3%, para DBO, DQO y SS, respectivamente.

Shah et al. (2012) evaluaron el rendimiento de una laguna aireada como tratamiento biológico de un agua residual textil, mediante un sistema a escala de laboratorio que se explotó y controló durante 92 días variando el TRH de 5 a 15 días. El efluente primario de una industria textil en Pakistán fue utilizado como el afluente del sistema experimental. La en el afluente varió de 355 a 540 mg/L y en el efluente de 32 a 121 mg/L. Los correspondientes rangos de DQO fueron 1116 a 1813 mg/L y 224 a 592 mg/L. Con un TRH de 7 días, la DBO efluente promedio fue de 80 mg/L. Sin embargo, el efluente no alcanzó el límite de descarga de 150 mg/L establecido por la normativa pakistani, ni siquiera con el TRH de 15 días. Esto indica la presencia de una gran cantidad de químicos en el agua residual textil, por ejemplo agentes blanqueadores como el peróxido de hidrogeno e hipoclorito de sodio; tintes complejos y pigmentos con base de cromo. El destino de estos químicos es variable: unos con un 100% de retención en el tejido y otros con un 100% que se va en el agua residual. Para reducir esos contaminantes podría utilizarse coagulación química previa a la decantación primaria (p.e.: con cal, sales de aluminio, etc.). La carga másica presentó un rango de 0.1 a 0.41 kg DBO/kg SSLM/d con una eficiencia de 77.2 a 92.4%. En términos de DQO la carga másica fue de 0.36 a 1.30 kg DQO/kg SSLM/d con una eficiencia de 66.3 a 85.0%. Los coeficientes cinéticos k , K_s (modelo de Monod), Y y k_d fueron de 3.83 d⁻¹, 1303 mg/L, 0.70 y 0.01 d⁻¹ sobre la base de DBO, y 5.2 d⁻¹, 3407 mg/L, 0.25 y 0.006 d⁻¹ sobre la base de DQO. La constante cinética global de primer orden fue 0.79 d⁻¹ como DBO, y 0.39 d⁻¹ como DQO. La DBO efluente para un TRH de 7 días satisfizo la norma pakistani de vertido. Por lo tanto, una carga másica en el rango de 0.25 a 0.41 kg DBO/kg SSLM/d y un TRH de 7 días se propuso para el tratamiento de agua residual textil en una laguna aireada.

La WEPA (2015) publicó los resultados de una laguna aireada instalada para el tratamiento de las aguas residuales de una fábrica textil. El diagrama de flujo de proceso es: tanque de igualación (2016 m³) + laguna de tratamiento químico (2016 m³) + laguna aireada (3468 m³) + laguna de sedimentación (3468 m³). El caudal diario tratado es de 2000 m³. Así, el TRH es de 5.48 días (1.73 días en aireación). Los resultados del tratamiento se presentan en la siguiente tabla:

Parámetro	Afluyente (mg/L)	Efluyente (mg/L)
SS	101	26
DBO	86	23
DQO	296	233

Es decir, el sistema elimina un 73% de la materia orgánica biodegradable. Sin embargo, se requiere mejorar la eliminación de la fracción refractaria.

7.- CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS LAGUNAS

La mayor parte de este apartado se basa en las publicaciones "Optimization of Lagoon Operation" publicada por la Federación de Municipios de Canadá y el Servicio Nacional de Investigación (FCM & NRC 2004) y "Principles of design and operations of wastewater treatment pond system for plant operators, engineers, and managers, EPA/600/R-11/088" publicado por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (U.S. EPA 2011).

Se recomienda dos tipos de control de las lagunas:

- Control rutinario propio, de cara a tener información de campo que ayude a la toma de decisiones del cuerpo técnico y que sirva también para prever posibles problemas operacionales.
- Control de cara a la administración, donde lo que se busca es dar cumplimiento a lo establecido en la autorización de vertido.

Estos dos tipos de control requieren diferentes niveles de precisión. El control rutinario propio puede hacerse en laboratorio propio, usando técnicas más rápidas y más fáciles y que no necesariamente cumplen con los métodos normalizados, pero que proporcionan resultados valiosos para los operarios. El control de cara a la administración debe hacerse siempre con métodos normalizados y con un laboratorio certificado.

En el control rutinario propio se puede recurrir casi siempre a muestras de tipo simple, y rara vez a muestras de tipo compuesto.

En el diseño del control rutinario debería tenerse en cuenta las variaciones estacionales de la carga. Cualquier incidencia debería anotarse y guardarse, porque es información que puede explicar cambios en el funcionamiento de los procesos.

7.1.- Muestreo

Los puntos de muestreo normalmente son el agua bruta y el efluente tratado. El control rutinario propio puede incluir puntos intermedios cuando hay más de una laguna en serie y también un mapeo de las propias lagunas. El muestreo compuesto, en general, no es necesario debido al gran tiempo de retención de las lagunas, que hace que el efluente sea muy estable o muy poco variable en composición.

Las muestras deben tomarse en sitios que las hagan representativas. El afluyente en el rebose de una arqueta, o un canal de entrada, o en el punto de descarga de un bombeo de entrada. Debe evitarse el muestreo en zonas de baja velocidad o poco turbulentas para no perder parte de los sólidos que pueden sedimentar. Similares consideraciones habrá que aplicar al muestreo del efluente, y además en este caso se debe evitar la toma de muestra en un punto donde el efluente haya sufrido mezcla con algún agua limpia o menos cargada (p.e.: pluviales) porque diluiría su concentración.

Para el control propio, se deberían recoger muestras en varios puntos de una laguna y entre celdas. Una muestra integrada con las muestras simples de una laguna es lo que se debería analizar. Suele ser buena práctica tomar 4 muestras simples cada una en las proximidades de las esquinas de una laguna y mezclarlas para el análisis de una única muestra por celda. Las muestras deberían recogerse a una distancia de 2 m desde el borde o pared de una celda y a 0.3 – 0.6 m de profundidad. Debe evitarse la re-suspensión de lodos, alejarse de los agitadores y no tomar muestras en días de fuertes vientos o lluviosos, porque estos fenómenos naturales desplazan y remueven los sólidos.

7.2.- Observación visual y olfativa

Las observaciones de tipo visual y olfativa son muy útiles para predecir y resolver problemas. El color y el olor pueden ser importantes indicadores de la salud de la laguna y de la capacidad de cumplir con los objetivos de vertido.

En la siguiente tabla se presenta una serie de valoraciones de las observaciones organolépticas de las lagunas (color y olor):

Tabla.- Indicadores de problemas en el funcionamiento de las lagunas

Color	Olor	Interpretación
Claro	Ninguno	Sin problemas.
Marrón	Terroso	Sin problemas, en general buen funcionamiento.
Verde oscuro brillante	Herboso o terroso	Buenas condiciones. Suele ocurrir con elevados pH y OD.
Verde opaco a amarillo	A pescado	No es bueno; el pH y el OD han caído. Empiezan a predominar algas verdi-azules.
Canela a marrón		Puede deberse a algas marrones, lo cual es bueno. Si se debe a presencia de limo o problemas de erosión, puede indicar problemas físicos en la laguna o en el sistema de alcantarillado.
Estrías o vetas rojizas	Ninguno o séptico	Sobreproducción de <i>Daphnia</i> , a menudo después de un <i>bloom</i> de algas. Se recomienda incrementar el tiempo de funcionamiento del aireador, y/o recircular.
Gris a negro	Séptico	Muy mal. La laguna estaría séptica, con cero de OD.

Fuente: Adaptada de U.S. EPA (1977, 2011).

7.3.- Medición de caudal

La medición de caudal es necesaria para determinar las cargas, hidráulica y orgánica, y para comparar las cargas con el diseño del sistema. El caudal afluente es necesario para, en su caso, ajustar dosis de químicos usados en eliminación de fósforo. La medición del caudal efluentes es necesario para comprobar que se cumple con lo establecido en la autorización de vertido.

“Es muy buena práctica medir caudal de entrada y de salida”.

Varios métodos se pueden emplear para medir el caudal:

- Control de tiempos de funcionamiento de bombas
- Caudalímetros magnéticos en tubos de descarga de bombeo
- Medidores por área/velocidad en canales
- Medidores de canal abierto como vertederos o tipo Parshall
- Cambios del nivel de agua en la laguna durante fases de llenado o vaciado

Hay una serie de referencias útiles tales como Grant y Dawson (1995) sobre instalación y calibración de caudalímetros. Los medidores de caudal deberían calibrarse al menos una vez al año.

7.4.- Oxígeno disuelto (OD)

El OD es un indicador esencial del funcionamiento aerobio de una laguna aireada. La medición debe hacerse in situ o fuera de la laguna pero siempre inmediatamente de tomada la muestra. El método más simple es usar un medidor portátil. La medición debería hacerse a la salida del sol y repetirse en torno a las 2-3 p.m.

Grandes fluctuaciones pueden indicar sobre cargas orgánicas o presencia de tóxicos. A nivel diario se debe esperar fluctuaciones normales. El operario debería registrar las tendencias diarias. Una tendencia decreciente a determinada hora puede indicar una sobre carga rutinaria o repetitiva día a día, o una sobrepoblación de algas. El mínimo OD necesario es de 2 mg/L para un funcionamiento óptimo. Y debería evitarse a rajatabla que el OD descienda hasta los 0 mg/L. Las soluciones pasan por incrementar el periodo de funcionamiento del aireador, o el aumento de su capacidad. Por otra parte, un exceso de OD puede permitir al operario reducir el tiempo de funcionamiento de la aireación.

7.5.- Relación SS/DBO₅

Los SS en el efluente proceden de la generación de algas en las lagunas. En consecuencia, los SS en el efluente pueden tener una mayor concentración que la DBO.

Los incumplimientos del vertido en cuanto a DBO₅ normalmente tienen que ver con una elevada concentración de SS e el efluente. La tabla siguiente presenta la ratio SS/DBO₅ y las causas que la motivan:

Tabla.- TSS to BOD₅ ratios as problem indicators (Richard and Bowman, 1997, cited by U.S. EPA 2011).

SS / DBO ₅	Causa(s)
<1	Solubilización de fango viejo y liberación de DBO ₅ soluble. Nitrificación en el ensayo de la DBO.
	Mal tratamiento, o circuitos cortos que producen mezcla de agua residual no tratada con el efluente.
1.5	Normal para la mayoría de los sistemas de lagunaje.
2.0-3.0	Sobre producción de algas. Escape de partículas de lodo viejo.

7.6.- pH

El pH es un buen indicador de la salud del sistema de lagunas. Las celdas que tienen un color verde oscuro generalmente tienen un alto número de algas verdes y un pH más alto. Por la noche, las algas y las bacterias aerobias utilizan O₂ y producen CO₂. El CO₂ en solución forma ácido carbónico y conduce a bajar el pH. Estos patrones diurnos de pH son indicadores de las condiciones internas de la laguna. Las celdas o lagunas que presentan color negro o gris y tienen un valor de pH < 6,8 pueden ser sépticas o avanzar hacia una condición séptica.

8.- EXPLOTACIÓN Y MANTENIMIENTO

La mayor parte de este apartado se basa en el documento "Advanced Stabilization Ponds and Aerated Lagoons Study Guide" publicado por el Departamento de Recursos Naturales de Wisconsin (WDNR 1998).

Se requiere, personal cualificado permanente para mantener y reparar la maquinaria de aireación, y la laguna debe ser purgado de lodos cada 2 a 5 años y el lodo debe ser post-tratado (por ejemplo, anaeróbicamente digerido, convertido en abono, o correctamente vertido) (Tilley et al. 2014). El afluente debe ser desbastado o sometido a decantación primaria ya que cualquier objeto grande puede dañar el sistema de aireación. La laguna también debería ser cercada para evitar que se le pueda lanzar objetos gruesos desde el exterior.

Se debe tomar toda precaución para evitar que la laguna se utilice como un vertedero de basura, teniendo en cuenta el daño que esto podría causar a la aireación.

Dependiendo de la velocidad de aireación y el medio ambiente, las lagunas aireadas pueden experimentar formación de hielo en la superficie del agua durante los períodos de clima frío. También se producen tasas reducidas de actividad biológica durante el tiempo frío. Si se diseñan adecuadamente, el sistema continuará funcionando y producirá efluentes aceptables en estas condiciones. El potencial para la formación de hielo en los aireadores flotantes puede fomentar el uso de aireación sumergida por difusión en climas muy fríos. El uso de la tubería perforada sumergida para aireación por difusión requiere mantenimiento y limpieza de forma rutinaria para mantener las tasas de aireación de diseño. Hay numerosos tipos de aireación sumergida que se pueden utilizar en climas cálidos o fríos, que deben ser considerados en todos los diseños. En aireación sumergida con difusores, la aplicación de ácido clorhídrico gaseoso en el sistema se utiliza para disolver el material acumulado en los difusores unitarios.

Cualquier estructura de tierra que se use a modo de embalse debe ser inspeccionada periódicamente. Si no hay control, los daños causados por roedores pueden debilitar severamente los terraplenes de la laguna.

En relación con la explotación

El aislamiento de una celda de una laguna que está experimentando un florecimiento de algas, da a la celda la oportunidad de "descansar" y recuperarse.

Si se utilizan productos químicos para el control de malezas, deben ser productos aprobados para ese uso específico y las instrucciones de la etiqueta deben seguirse con precisión. Puede ser necesario una supervisión o control adicional de sustancias tóxicas en el efluente. Muchas veces, se recomienda el uso de un tenso-activo para mejorar la capacidad de "humectación" de la mezcla para que se adhiera mejor a la maleza tratada.

Cuanto más profunda es la laguna, mayor será el tiempo de contacto antes de que las burbujas alcancen la superficie. Cuanto más pequeñas las burbujas, más superficie de contacto entre el aire y el agua, lo que aumenta la tasa de transferencia.

La distribución de la aireación al interior de, y entre, las lagunas se lleva a cabo mediante el uso de válvulas en el colector para conseguir un patrón uniforme agitación.

Durante los meses de verano, se puede emplear aireadores flotantes para una adicional capacidad de aireación para gestionar mayores cargas orgánicas.

Sobre el mantenimiento

Revisar todos los equipos: soplantes, válvulas de retención, orificios de los difusores de aire, diques, todas las bombas, pozos de registro de control y compuertas. Un plan programado de mantenimiento evitará problemas e identificará potenciales problemas antes de que se conviertan en tales.

El mantenimiento a un sistema de lagunas comprende acciones simples de limpieza que resultan fundamentales para un buen tratamiento. Entre otros:

- a. Retirar la espuma o similar que puede perjudicar la aireación y producir malos olores.
- b. Mantener los diques libres de maleza, bien podados. Eso también evita o minimiza la presencia de ratas que forman madrigueras y la ausencia de vegetación en las laderas facilita la mezcla que puede inducir el viento.
- c. Restaurar los terraplenes que hayan sido erosionados o que hayan albergado madrigueras de roedores.
- d. Con regularidad retirar la lenteja de agua flotante.
- e. Realizar el control de espadañas con regularidad.
- f. Realizar el mantenimiento preventivo de todos los equipos mecánicos como se indica en el manual de explotación y mantenimiento y en los manuales de los fabricantes de los equipos.
- g. Probar las válvulas del sistema con regularidad.

Las acciones de mantenimiento de los equipos de aireación, incluyen:

- a. Tuberías: comprobar todo el sistema de tuberías de aire, incluyendo válvulas y difusores para asegurar que no haya obstrucciones.
- b. Soplantes centrífugas: comprobar los niveles de aceite, filtros de aire, válvulas de alivio, y motores de accionamiento.
- c. Soplantes de desplazamiento positivo: mantener los niveles de aceite, válvulas de alivio de aire, correas, filtros de aire y motores de accionamiento.
- d. Aireadores flotantes: mantener flotadores, líneas eléctricas, comprobar los niveles de aceite, anclajes, motores de accionamiento. Asegurarse de que los impulsores no estén obstruidos.

La limpieza de los difusores de aire se puede hacer de varias maneras. Si la obstrucción es menor, el flujo de aire se puede aumentar cerrando algunas secciones para aumentar el aire de las secciones restantes o aumentando el caudal de la soplante (si es posible). Otro método de limpieza sería introducir ácido clorhídrico en forma gaseosa o también oxígeno/ozono a través de las líneas de aire.

En algunos casos, se ha utilizado equipos sumergibles para limpiar mecánicamente los difusores (por ejemplo: tubos flexibles para raspar el interior de las conducciones y de los propios difusores). Si estos procedimientos no funcionan, la última opción sería la de drenar la laguna para reparar/reemplazar los difusores.

El filtro del aire de entrada elimina partículas antes de la etapa de compresión de modo que estos residuos no entren en la línea de aire y atasquen los orificios del difusor. También es esencial para proteger el compresor de cualquier daño, especialmente a partir de materiales arenosos. El principal requisito de mantenimiento es mantener el filtro limpio. Por lo general, esto se hace retirando el filtro y soplando con aire comprimido. La frecuencia de limpieza depende del tamaño del filtro y la calidad del aire ambiente. Otras actividades de mantenimiento deben ser especificadas por el fabricante o establecidas en el manual de explotación y mantenimiento. La falta de filtros limpios adecuados puede reducir la producción de aire de la soplante, recalentar la soplante, posible obstrucción de los difusores, y posibles daños a la soplante y su motor.

Los principales métodos para prevenir la erosión de los diques consisten en vegetar adecuadamente los terraplenes y el uso de escollera alrededor de los niveles normales de funcionamiento de la laguna para minimizar la erosión por acción del oleaje.

La formación de hielo (en invierno) puede producir el vuelco de los aireadores de superficie. Los motores y cables de alimentación pueden dañarse o romperse durante el vuelco. Hay que estabilizarlos usando los cables adecuados. Ya que las necesidades de oxígeno son más bajas en invierno, se puede desinstalar algunos de los aireadores.

BIBLIOGRAFÍA

ARCIEVALA S.J., and MOHANRAO G.J. (1969). Design Construction and Operation Waste Stabilization Ponds in India. CIPHERI, Nagpur.

ARTHUR, J.P. (1983): Notes in the Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries. (World Bank Technical Paper, 7). Washington: The World Bank.

CRITES, R.; TCHOBANOGLOUS, G. (1998): Small and decentralized wastewater management systems. New York: The McGraw-Hill Companies Inc.

CURTIS, T.P.; MARA, D.D.; SILVA, S.A. (1992): Influence of pH, oxygen and humic substances on ability of sunlight to damage Faecal Coliforms in waste stabilization pond water. Applied and Environmental Microbiology, 58: 1335-1343.

FCM & NRC (2004). Optimization of Lagoon Operation. Issue No. 1.0. Published by Federation of Canadian Municipalities and National Research Council: Canada.

GRANT, D.M.; DAWSON B.D. (1995). Isco Open Channel Flow Measurement. Fourth Edition. Isco Environmental Division: Lincoln, Nebraska.

MARA, D.D. (1975). Discussion, Water Res., 9: 595.

MIDDLEBROOKS, E.J. et al. (1982). Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading. McMillan Publishing Co.: New York, NY.

MPDES (2012). "Domestic sewage treatment lagoons general permit. Fact Sheet". Published by Montana Pollutant Discharge Elimination System.

NATURGERECHTE TECHNOLOGIEN, BAU UND WIRTSCHAFTSBERATUNG (TBW). (2001): Decentralized Wastewater Treatment Methods for Developing Countries. GTZ and GATE.

OPITZ D.C. (1974). Lagoon treatment of combined textile and domestic wastes. A thesis in Civil Engineering submitted to the graduate faculty of Texas Tech University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering.

ROSE, G.D. (1999). Community based technologies for domestic wastewater treatment and reuse: options for urban agriculture IDRC: Research Programs, Cities Feeding People, Report 27.

REED, S.C., et al. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment, 2nd ed. McGraw Hill Book Co., New York, NY.

SASSE, L. (1998): Decentralized Wastewater Treatment in Developing Countries. Bremen: Bremen Overseas Research and Development Association (BORDA).

SHAH, M., HASHMI H.N., WAHEED, H. (2012). Determination of kinetic coefficients for the biological treatment of textile wastewater. Int. J. of Physical Sciences, 7(10): 1726-1740.

SPERLING, M. von (2005): Part Three; Stabilization Ponds. In: Sperling, M. von; Lemos Chernicharo, C.A.: Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions Volume 1. London, 495-646.

SSWM (2015). "Aerated Pond", compiled by Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology), Dorothee Spuhler (seecon international gmbh), published on SSWM ().

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D.; (2003): Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. (Fourth Edition). METCALF & EDDY Inc. (Editor). New York: McGraw-Hill Companies, Inc.

TILLEY, E.; ULRICH, L; LUETHI, C.; REYMOND, P.; ZURBRUEGG, C. (2014): Compendium of Sanitation Systems and Technologies. 2nd Revised Edition. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag).

U.S. EPA (1977). Operations Manual Stabilization Pond. EPA-430/9-77-012. United States Environmental Protection Agency.

U.S. EPA (1980). Onsite Wastewater Treatment Systems Manual. (EPA 625/1-80, 12). United States Environmental Protection Agency, Office of Water Office of Research and Development.

U.S. EPA (1983). Design Manual - Municipal Wastewater Stabilization Ponds, EPA-625/1-83-015, US IPA CERL, Cincinnati, OH.

U.S. EPA (2002). Aerated, partial mix lagoons. EPA Technology Fact Sheet 832-F-02-008. United States Environmental Protection Agency, Office of Water.

U.S. EPA (2011). Principles of design and operations of wastewater treatment pond systems for plant operators, engineers, and managers, EPA/600/R-11/088, published by United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA).

WDNR (1998). Advanced stabilization ponds and aerated lagoons study guide. Wisconsin Department of Natural Resources, Bureau of Sciences Services, Madison, WI 53707. Downloaded from <http://dnr.wi.gov>

WEPA (2015) Wastewater Treatment Plant at Kongka Textile Mill Limited Company. Information source: Project report, Department of industrial work, Ministry of Industry. Accessed on July 16, 2015, http://www.wepa-db.net/technologies/individual/datasheet/tha/37_kongka_textile_mill.htm

WILLIAMS, S.W., HUTTO, G.A. (1961). Treatment of textile mill wastes in aerated lagoons. In: Proceedings of 16th. Industrial Wastes Conference, Indiana. 518-529.

WPCF, ASCE. (1988). Aeration. Manual of Practice FD-13.

WPCF (1990). Natural Systems for Wastewater Treatment, MOP FD-16, WPCF, Alexandria, VA.

ANEXO 1

ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE NECESARIA

1.- SUPERFICIE NECESARIA POR LAGUNAS AIREADAS

Se presenta la demanda de superficie de una laguna aireada para diferentes tamaños de la industria textil en términos del caudal medio de tratamiento. Se considera que hay un tanque de homogeneización de flujos y concentraciones. Las concentraciones homogeneizadas son:

- DBO₅ = 300 mg/L
- DQO = 1000 mg/L

Los criterios de diseño son:

Parámetro	Laguna de mezcla parcial	Laguna de mezcla completa
TRH (días)	20	4
Profundidad (m)	3	2

Tabla 1.- Estimación de la superficie necesaria para lagunas aireadas en función del caudal tratado (Q)

Q	Laguna de mezcla parcial		Laguna de mezcla completa	
	Volumen	Superficie	Volumen	Superficie
(m ³ /d)	(m ³)	(ha)	(m ³)	(ha)
200	4000	0,13	800	0,04
400	8000	0,27	1600	0,08
2000	40000	1,33	8000	0,40
4000	80000	2,67	16000	0,80

2.- SUPERFICIE NECESARIA PARA DECANTACIÓN SECUNDARIA

2.1.- Laguna de mezcla parcial

Si las lagunas están dispuestas en una serie de 3 celdas, la tercera puede servir como decantador. De lo contrario, un estanque con dos días de TRH y 4 m de profundidad sería necesario.

2.2.- Laguna de mezcla completa

Las lagunas de mezcla completa deben ir seguidas de una decantación. Esta puede ser un conjunto de varios tanques de corto TRH (p.e.: 2 días), que requieren frecuentes purgas; o una laguna facultativa con 10-días de TRH con la profundidad suficiente para permitir el almacenamiento de lodos a largo plazo.

Tabla 2.- Estimación de la demanda de superficie para la decantación secundaria en función del caudal (Q)

Q	Laguna de mezcla parcial					Laguna de mezcla completa				
	TRH	Volumen	H	Área	V _{ASC}	TRH	Volumen	H	Área	V _{ASC}
(m ³ /d)	(días)	(m ³)	(m)	(m ²)	(m/h)	(días)	(m ³)	(m)	(m ²)	(m/h)
200	2	400	4	100	0,08	10	2000	4	500	0,02
400	2	800	4	200	0,08	10	4000	4	1000	0,02
2000	2	4000	4	1000	0,08	10	20000	4	5000	0,02
4000	2	8000	4	2000	0,08	10	40000	4	10000	0,02

V_{ASC} = Velocidad Ascensional (m³/m²/h); H = profundidad (m).

3.- AREA TOTAL NECESARIA

Tabla 3.- Área total necesaria: lagunas + decantadores

Q	Laguna de mezcla parcial	Laguna de mezcla completa
	Área	Área
(m ³ /d)	(ha)	(ha)
200	0,14	0,09
400	0,29	0,18
2000	1,43	0,90
4000	2,87	1,80

ANEXO 2

DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE UNIDADES DE PROCESO



Figura 1

Laguna aireada utilizada para tratar las aguas residuales de una granja de cerdos. Cortesía de Environmental Dynamics Inc. (https://en.wikipedia.org/wiki/Aerated_lagoon#/media/File:Aerated_Lagoon.jpg, acceso Julio 22, 2015).



Figura 2

Laguna aireada de mezcla parcial (<http://blog.thecivilengg.com/wp-content/uploads/2012/03/aerated-lagoon1.png>, acceso Julio 23, 2015)



Figura 3

Lagunas aireadas de mezcla completa (<http://www.lagoonsonline.com/>, acceso Julio 23, 2015)



Figura 4

Aireador mecánico de superficie. En general, es difícil para estos aireadores mezclar toda la columna agua (https://en.wikipedia.org/wiki/Water_aeration, acceso Julio 23, 2015)



Figura 5

Laguna aireada mediante equipo mecánico de superficie

(<http://www.propondandlakes.com/aqua-mastervolcano2.aspx>, acceso Julio 23, 2015)



Figura 6

Lagunas aireadas con difusores (<http://www.aquatec.vn/roots-blower-at-50-19/applications/?hl=en>, acceso Julio 23, 2015).