

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental:

**EVALUACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DEL AyA EN LA URBANIZACIÓN LAS LOMAS DE
BUENOS AIRES, PUNTARENAS**

Susana Jiménez González

Cartago, Agosto, 2014



“Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales del AyA en la urbanización Las Lomas de Buenos Aires, Puntarenas”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

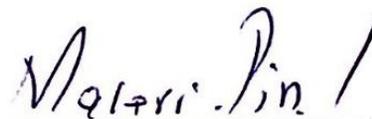
Miembros del tribunal



Ing. Jorge Calvo Gutiérrez, M.Sc
Director



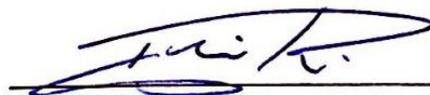
Ing. Andrés Lazo Páez, M.Sc.
Lector 1



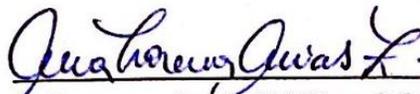
Ing. Macario Pino Gómez
Lector 2



Dr. Ing. Luis Guillermo Romero Esquivel
Coordinador COTRAFIG



Dra. Floria Roa Gutiérrez
Directora Escuela de Química



Ing. Ana Lorena Arias Zúñiga, M.Sc.
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A Jehová Dios por darme la vida y permitirme tener un verdadero sentido en ella.

A mis padres, Alfredo y Ursula, por su apoyo incondicional en todo aspecto de mi vida. Por darme la mejor familia y calidad de vida que alguien pueda tener.

A mis hermanas y tía, Alicia, Andrea y Brigitte, por darme su apoyo, su compañía y amistad que tienen un valor incalculable en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia, por el apoyo tan valioso que me dieron para llegar a donde estoy, y ser lo mejor que me puede pasar en la vida.

A Jorge Calvo, por su apoyo en todo aspecto que ocupé para llevar a cabo este proyecto.

A Alicia Jiménez, por su colaboración técnica, por resolver mis dudas, tenerme mucha paciencia y por siempre darme muy atinadas sugerencias y comentarios.

A Andrés Lazo, por compartir sus conocimientos conmigo y la ayuda que me brindó a lo largo de todo el proyecto.

A Álvaro Araya, por permitirme realizar mi proyecto para ustedes.

A Juan Diego Quirós, por ayudarme a obtener información muy importante y por ser muy atento a colaborar al proyecto.

A Juan Diego Vargas, por transmitir parte de su conocimiento y experiencia, y su disposición a colaborar en el proyecto.

A Jessica Nichols, por su tan valiosa colaboración técnica.

A Macario Pino, por su disposición a ser un lector y sus buenas recomendaciones.

A Heiner Arroyo, por llevarnos a las giras y hacer el viaje muy ameno.

A Guillermo Zúñiga, por su apoyo en conocimiento de la región.

A Marco Méndez, por su apoyo a lo largo del proyecto en los momentos que fueron necesarios.

A Oscar Montero, Diego Rodríguez, Paola Rojas y Franz Vargas por haber sido personas tan importantes a lo largo de mi carrera y por estar siempre a mi lado.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	13
Abstract.....	14
1. Introducción	15
1.1. Objetivos.....	17
1.1.1. Objetivo General.....	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. Revisión de literatura	18
2.1. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales	18
2.2. Generalidades de las lagunas de estabilización	18
2.3. Tratamiento biológico en las lagunas facultativas	20
2.4. Microalgas en lagunas facultativas	20
2.5. Diseño de lagunas facultativas.....	22
2.5.1. Evaluación de parámetros de diseño.....	23
2.5.1.1. Determinación del caudal de diseño.....	23
2.5.1.2. Determinación de la carga orgánica	24
2.5.1.3. Área y volumen	24
2.5.1.3. Relación Largo/Ancho	25
2.5.1.4. Tasa de aplicación superficial	26
2.5.1.5. Tiempo de retención.....	26
2.5.1.6. Número de dispersión.....	27
2.5.1.7. Coeficiente de remoción de DBO (k).....	29
2.5.1.8. DBO total efluente	29
2.6. Métodos de pulido del efluente de lagunas facultativas	30
2.6.1. Control biológico: Macrófitas flotantes en el Sistema Lagunar	30

2.6.2.	Precipitación química	32
2.6.3.	Filtración.....	33
2.6.4.	Ondas de ultrasonido	35
3.	Metodología	37
3.1.	Introducción	37
3.2.	Planta de Tratamiento en estudio: Laguna Facultativa.....	37
3.3.	Fundamentos para la evaluación.....	40
3.3.1.	Determinación del caudal de diseño	40
3.3.2.	Determinación de la carga orgánica	41
3.3.3.	Determinación del área	41
3.4.	Evaluación de la laguna facultativa actual.....	41
3.4.1.	Relación Largo/Ancho.....	41
3.4.2.	Tasa de aplicación superficial.....	41
3.4.3.	Tiempo de retención	41
3.4.4.	Número de dispersion	41
3.4.5.	Coefficiente de remoción de DBO (k)	42
3.4.6.	DBO total efluente.....	42
3.5.	Evaluación de las propuestas de mejora	42
3.5.1.	Relación Largo/Ancho.....	42
3.5.2.	Tasa de aplicación superficial.....	43
3.5.3.	Tiempo de retención	43
3.5.4.	Número de dispersion	43
3.5.5.	Coefficiente de remoción de DBO (k)	43
3.5.6.	DBO total efluente.....	43
4.	Resultados y discusión	44

4.1.	Introducción	44
4.2.	Caudal de diseño y carga orgánica.....	44
4.2.1.	Determinación del caudal promedio diario y caudal máximo diario....	44
4.2.2.	Determinación de la carga orgánica promedio y sólidos suspendidos totales promedio	46
4.3.	Evaluación de la laguna facultativa actual.....	47
4.4.	Propuesta de diseño preliminar de la laguna facultativa.....	49
4.5.	Propuestas de mejora	50
4.5.1.	Detalle preliminar de las estructuras de salida	51
4.5.2.	Propuesta de mejora 1: Dos lagunas en serie (facultativa y de maduración) 52	
4.5.3.	Propuesta 2: Dos lagunas en serie, la primaria facultativa y la secundaria de macrófitas	55
4.5.4.	Propuesta 3: Tres lagunas (dos facultativas en paralelo y una en serie de maduración) 59	
4.5.5.	Análisis comparativo de las propuestas de mejora	62
4.6.	Propuestas de pulido	64
4.6.1.	Macrófitas flotantes: Lentejas de agua	64
4.6.2.	Ondas ultrasónicas	65
5.	Conclusiones	67
6.	Recomendaciones.....	68
7.	Referencias bibliográficas	69
	Apéndices	74
	Apéndice 1. Cálculo de la cantidad de lodo del fondo de la laguna	75
	Apéndice 2. Caudal promedio diario de la laguna facultativa	76

Apéndice 3. Procedimiento para el caudal promedio diario de la laguna facultativa	77
Apéndice 4. Costo de la implementación del equipo de ultrasonido en la conformación de 4 lagunas	85
Anexos	86
Anexo 1. Plano de la laguna actual	87
Anexo 2. Catálogo de las especificaciones técnicas del equipo de ultrasonido LG Sonic: e-line tank	88
Anexo 3. Testimonio de funcionamiento del equipo de ultrasonido para el control de microalgas en Brasil	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.3.1. Interacción entre las microalgas y bacterias en una laguna facultativa.	20
Figura 2.4.1. Microalgas presentes en lagunas facultativas. A. <i>Chlorella</i> . B. <i>Euglena</i> . C. <i>Anabaena</i> . D. <i>Oscillatoria</i>	21
Figura 2.6.1.1. Macrófitas flotantes. Izq. Lirio Acuático. Der. Lenteja de agua.....	30
Figura 2.6.3.1. Filtro de roca instalado al final de un sistema lagunar en California, Estados Unidos.....	33
Figura 2.6.3.2. Detalle típico de un filtro de arena intermitente.....	34
Figura 2.6.4.1. Funcionamiento del equipo de ultrasonido.	36
Figura 3.2.1. Ubicación de la PTAR del AyA en la Urbanización Las Lomas en Buenos Aires, Puntarenas.	37
Figura 3.2.2. Pretratamiento de la PTAR	38
Figura 3.2.3. Sistema de distribución del caudal de entrada a la laguna.	38
Figura 3.2.4. Dimensiones de la laguna facultativa actual de la PTAR	39
Figura 3.2.5. Estructuras de salida de la laguna	39
Figura 3.2.6. Estructura de salida de la PTAR	40
Figura 3.3.1.1 Equipo de medición de caudal utilizado en el proyecto.....	40
Figura 4.2.1.1. Caudal entrante por día en la laguna facultativa.	45
Figura 4.5.1.1. Corte transversal del detalle de la propuesta de las estructuras de salida de cada una de las lagunas facultativas.	51
Figura 4.5.2.1. Propuesta de mejora 1: Dos lagunas en serie (facultativa y de maduración)	52
Figura 4.5.3.1. Propuesta de mejora 2: Dos lagunas en serie, facultativa y de macrófitas ..	56
Figura 4.5.4.1. Propuesta de mejora 3: Dos lagunas facultativas en paralelo y una de maduración en serie.....	59
Figura 4.6.2.1. Ubicación del equipo de ultrasonido en la laguna primaria de la propuesta 1	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.2.1. Ventajas y desventajas de algunos sistemas de lagunas de estabilización	19
Cuadro 2.5.1.3.1. Valores recomendados para el parámetro de la relación L/A.....	25
Cuadro 2.5.1.4.1. Valores recomendados para la tasa de aplicación superficial en lagunas facultativas, de maduración y de macrófitas.	26
Cuadro 2.5.1.5.1. Valores recomendados para el tiempo de retención y la profundidad en lagunas facultativas, de maduración y de macrófitas	27
Cuadro 2.5.1.6.1. Régimen hidráulico presente en lagunas facultativas y su relación con otros parámetros de diseño	28
Cuadro 2.6.1.1. Características de las algunas macrófitas flotantes para su implementación en el tratamiento del efluente de lagunas facultativas	31
Cuadro 2.6.1.2. Criterios de diseño para la implementación de macrófitas flotantes en lagunas facultativas.....	32
Cuadro 2.6.4.1. Microalgas eliminables con equipo de ultrasonido (90% de eficacia)	35
Cuadro 4.2.2.1. Datos históricos de la DBO y los SST en la PTAR	46
Cuadro 4.3.1. Datos para realizar la evaluación actual de la laguna facultativa	47
Cuadro 4.3.2. Evaluación de parámetros de diseño para la conformación actual de la laguna facultativa	48
Cuadro 4.4.1. Datos para realizar una propuesta de diseño preliminar del área de la laguna	50
Cuadro 4.4.2. Área real requerida para el tratamiento de las aguas residuales de la urbanización Las Lomas.....	50
Cuadro 4.5.2.1. Datos para realizar la evaluación de la propuesta 1: dos lagunas en serie, facultativa y de maduración.....	53
Cuadro 4.5.2.2. Evaluación de la propuesta 1: dos lagunas en lagunas en serie, facultativa y de maduración.....	53
Cuadro 4.5.2.3. Presupuesto aproximado para la implementación de la propuesta 1.	54
Cuadro 4.5.3.1. Datos para realizar la evaluación de la propuesta 2, dos lagunas en serie, una facultativa y la segunda con <i>lemna sp.</i>	56

Cuadro 4.5.3.2. Evaluación de la propuesta 2, dos lagunas en serie, una facultativa y la otra con <i>lemna sp.</i>	57
Cuadro 4.5.3.3. Presupuesto aproximado para la implementación de la propuesta 2	57
Cuadro 4.5.4.1. Datos para realizar la evaluación de la propuesta 3: dos lagunas facultativas en paralelo y una de maduración en serie	60
Cuadro 4.5.4.2. Evaluación de la propuesta 3: dos lagunas facultativas en paralelo y una de maduración	60
Cuadro 4.5.4.3. Presupuesto aproximado para la implementación de la propuesta 3.	61
Cuadro 4.5.5.1. Análisis comparativo de las propuestas de mejora según su mantenimiento, DBO total efluente y el presupuesto requerido para su implementación	63
Cuadro 4.5.5.2. Calificación para el análisis comparativo entre las propuestas de mejora..	63

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AyA – Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

CGR – Contraloría General de la República

CO₂ – Dióxido de Carbono

d – Número de dispersión

DAF – Flotación por aire disuelto

DBO – Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO – Demanda Química de Oxígeno

EPA – Environmental Protection Agency

GAM – Gran Área Metropolitana

H₂O – Agua

HPO₄ – Fosfato

k – Coeficiente de remoción de DBO

N – Nitrógeno

NO₃ – Nitrato

P – Fósforo

pH – Potencial de Hidrógeno

PTAR – Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

PVC – Policloruro de Vinilo

Relación L/A – Relación Largo/Ancho

S – Concentración de DBO soluble efluente

S_o – Concentración de DBO soluble afluente

SST – Sólidos Suspendidos Totales

TAS_i – Tasa de aplicación superficial inicial

Tr – Tiempo de retención

UASB – Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

θ – Coeficiente de temperatura

RESUMEN

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados posee una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Urbanización Las Lomas en Buenos Aires, Puntarenas. Esta planta consiste en una sola laguna facultativa, que presenta problemas de sobreproducción de microalgas, las cuales causan problemas operativos, disminuyen la calidad del efluente, y dificultan el cumplimiento de la legislación nacional. Por lo tanto, se evaluó la laguna facultativa actual, según los principales parámetros de diseño para lagunas facultativas, con el fin de recomendar una posible propuesta de mejora para optimizar el tratamiento de las aguas residuales. La evaluación se realizó, tomando como base un caudal promedio diario de $40 \text{ m}^3/\text{día}$ y máximo diario de $50 \text{ m}^3/\text{día}$, la cual dio como resultado que los principales problemas por resolver son: la relación Largo/Ancho (L/A), la tasa de aplicación superficial y, el más importante, el tiempo de retención. Posteriormente, se calculó el área real requerida para el tratamiento de estas aguas residuales, que tomando en cuenta el caudal máximo diario, es de 725 m^2 . Además, se procedió a evaluar distintos escenarios como posibles mejoras de remodelación de la laguna. Se evaluó la posibilidad de cambiar la conformación actual de tratamiento por: dos lagunas en serie, una facultativa y la segunda de maduración; dos lagunas en serie, una facultativa y la segunda de macrófitas y tres lagunas, dos en paralelo facultativas y una en serie de maduración. Posteriormente, se realizó un presupuesto aproximado de implementar estas propuestas de mejora (incluyendo todos los costos de la extracción de lodos, impermeabilización de la laguna, obra gris, instalación mecánica y demás costos indirectos y adicionales), lo cual dio como resultado que se requiere una inversión de \$78.400,00; \$118.300,00 y \$90.100,00 para las propuestas 1, 2 y 3, respectivamente. Al evaluar todas las alternativas desde el punto de vista técnico, ambiental y económico, la propuesta más recomendable es la remodelación a dos lagunas en serie, una facultativa y la segunda de maduración.

Palabras clave: lagunas facultativas, microalgas, tasa de aplicación superficial, tiempo de retención, *lemna sp*, ultrasonido.

ABSTRACT

The Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados has a wastewater treatment plant for “Las Lomas” urbanization in Buenos Aires, Puntarenas. This plant is a single facultative pond which presents microalgae overproduction that generates a reduction in the effluent quality, causes operational problems and also does not comply with the national legislation. Therefore, current facultative pond was evaluated by major design parameters for facultative ponds, to recommend a potential solution for improvement to optimize the treatment of wastewater. Evaluation of the current facultative pond, based on average daily flow of 40 m³/day and 50 m³/day maximum daily, resulted in major problems, such as, L/A ratio, the surface loading rate and, most importantly, the detention time. Subsequently, the actual area required for treatment of this wastewater was calculated, based on the maximum daily flow, is 725 m². Then, different scenarios were evaluated in the same way. It was evaluated: two ponds in series (the first facultative and the second one a maturation pond); two ponds in series (the first facultative and the second a macrophyte pond) and three ponds (two facultative in parallel and one a maturation pond). Then, was calculated the approximate cost to implement these proposal (including all costs of removing sludge, lagoon waterproofing, structural work, mechanical installation and other indirect and additional costs), which resulted in required an investment of \$78.400,00; \$118.300,00 y \$90.100,00 for the proposals 1, 2 and 3, respectively. When evaluating all alternatives from a technical, environmental and economic point of view, the proposal is recommended to upgrade the system by using two ponds in series (the first facultative and the second one a maturation pond) instead of the existing one.

Key words: Facultative pond, microalgae, surface loading rate, detention time, *lemna sp*, ultrasonic

1. INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, el tratamiento de las aguas residuales, es un aspecto donde todavía hay mucho por trabajar. La Contraloría General de la República (CGR), indica que sólo el 5% de los aproximadamente 6279 L/s de aguas residuales que son vertidas a cuerpos receptores, reciben algún tratamiento previo; es decir que se están vertiendo cerca de 6000 L/s de aguas ordinarias contaminadas a los ríos de nuestro país.

En Costa Rica existen varios entes encargados de la gestión del agua. Uno de ellos es el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Esta institución es la encargada de la operación de 15 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en todo el país; para ello cuenta con dos unidades encargadas de ellas: La Unidad Estratégica de Negocios del Gran Área Metropolitana, que se encarga de las PTAR ubicadas en la Gran Área Metropolitana (GAM); y la Unidad Estratégica de Negocios de Sistemas Periféricos, encargada de las PTAR ubicadas en las afueras de la GAM.

Según el informe de la CGR (Contraloría General de la República, 2013), en las PTAR que opera el AyA fuera de la GAM, se exceden principalmente los parámetros de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) presentando eficiencias muy bajas. Además en el caso específico de los sistemas lagunares, se incumple con la normativa nacional en los límites de DQO y DBO.

En la provincia de Puntarenas, en el distrito Buenos Aires y cantón Buenos Aires, el AyA cuenta con una PTAR, la cual operan desde el año 2012; sin embargo, la planta fue construida hace más de 20 años, ya que anteriormente era administrada por la Cooperación de Desarrollo Agrícola del Monte S.A. La planta está compuesta principalmente por una laguna de estabilización, específicamente una laguna facultativa que es la encargada del tratamiento de las aguas residuales.

Actualmente se tiene una problemática importante por la existencia de sobreproducción de microalgas en la laguna, lo cual dificulta su operación y afecta la calidad del efluente, principalmente los parámetros de DBO, DQO y SST.

La sobreproducción de microalgas en las lagunas facultativas es un problema común, debido a la naturaleza del tratamiento, ya que se basa en la interacción entre las microalgas y las bacterias. Sin embargo, cuando se desequilibra este ciclo, es cuando surgen los problemas. El principal problema que causa es que cuando hay tantas microalgas, se produce una cantidad muy importante de biomasa y la estabilización de su masa celular consume gran cantidad de oxígeno, además, se pueden producir natas en las partes superiores de la laguna, lo cual reduce la penetración de la luz, y finalmente, provoca que la capa anaeróbica que existía en las partes bajas de la laguna va aumentando, y puede llegar incluso a generar malos olores y por supuesto un ineficiente tratamiento del agua.

Es por esto que, el presente proyecto pretende evaluar el sistema de tratamiento actual, para así determinar las posibles oportunidades de mejora para un adecuado tratamiento del agua residual y presentar una propuesta específica para optimizar el desempeño del sistema de tratamiento con su respectivo costo. Para lograrlo, se evaluarán los principales parámetros de diseño para lagunas de estabilización.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Evaluar la planta de tratamiento de aguas residuales del AyA, ubicada en la Urbanización Las Lomas de Buenos Aires, Puntarenas, para presentar una propuesta de mejora en su operación y desempeño.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Valorar la laguna facultativa actual con base en los principales parámetros de diseño, para determinar la razón de la sobreproducción de microalgas.
- Analizar diferentes alternativas de mejora de la planta para tener un adecuado tratamiento del agua residual.
- Presentar una propuesta para el tratamiento de las aguas residuales de la PTAR en estudio, desde el punto de vista técnico, ambiental y económico.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de las aguas residuales, puede llevarse a cabo por muchos procesos, los cuales pueden basarse en tratamientos químicos, físicos y/o biológicos. Entre los principales procesos de tratamiento para aguas domésticas, están las plantas de lodos activados, lagunas de estabilización, filtros anaerobios de flujo ascendente y otros. Entre los procesos más económicos (en términos de operación y mantenimiento), por ser un proceso totalmente natural, se encuentran las lagunas de estabilización. A continuación se detallan generalidades sobre las lagunas de estabilización, y posteriormente se presenta en más detalle el proceso de tratamiento con lagunas facultativas, que son el objeto de estudio en el presente trabajo.

2.2. GENERALIDADES DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Una laguna de estabilización es una estructura simple, que se basa en el embalsamiento del agua por un tiempo de retención específico, para lograr un tratamiento biológico del agua residual (Silva, 2004).

Las lagunas de estabilización, pueden clasificarse de muchas maneras, ya sea por su tratamiento biológico, extensión, presencia o ausencia de equipo de aireación y otros. Sin embargo, la forma más adecuada para clasificarlas es según su actividad biológica, y son los siguientes:

- Lagunas Anaerobias (sin oxígeno)
- Lagunas Aerobias (con oxígeno)
- Lagunas Facultativas (aerobia en las partes altas y anaerobia en las partes bajas)

Generalmente, las lagunas de estabilización se construyen para que trabajen de manera combinada, ya sea con otras tecnologías de tratamiento, o entre ellas como sistemas en serie, con lagunas aireadas-facultativas, lagunas anaerobias-facultativas y otros.

Entre las principales ventajas que tienen las lagunas facultativas, es que no requiere muchas labores de operación (en comparación con otras tecnologías) y la ausencia de equipos mecánicos, lo que representa menores costos. Sin embargo, tiene como desventajas, que requieren grandes áreas y generalmente no se obtiene alta calidad de efluente (principalmente por la existencia de microalgas que salen, y aumentan parámetros como DBO y SST), por lo que se requieren tratamientos adicionales para mejorarlo (Cubillos, 2001) (Comisión Nacional de Agua, 2007). Las principales ventajas y desventajas de estos sistemas, combinados o no, se presentan en el cuadro 2.2.1.

Cuadro 2.2.1. Ventajas y desventajas de algunos sistemas de lagunas de estabilización

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Lagunas facultativas	<ul style="list-style-type: none"> -Razonable eficiencia de remoción de patógenos -Construcción, operación y mantenimiento simples -Reducidos costos de implantación y operación -Ausencia de equipos mecánicos -Satisfactoria resistencia a variaciones de carga -Remoción de lodo necesaria en períodos superiores a 20 años 	<ul style="list-style-type: none"> -Elevados requerimientos de área -Dificultad para cumplir límites máximos muy elevados -La simplicidad operacional puede traer un descuido en el mantenimiento (crecimiento de vegetación) -Posible necesidad de remoción de algas en el efluente -El rendimiento varía según las condiciones climáticas
Sistema de laguna anaerobia-facultativa	<ul style="list-style-type: none"> Requisitos de área inferior a los de las lagunas facultativas únicas 	<ul style="list-style-type: none"> -Posibilidad de malos olores en la laguna anaerobia -Necesidad de remoción periódica del lodo en la laguna anaerobia
Sistema de lagunas aerobias-facultativas	<ul style="list-style-type: none"> -Construcción, operación y mantenimiento simples -Requisitos de área inferiores a los de las lagunas facultativas o anaerobia-facultativa -Mayor independencia a las condiciones climáticas que las lagunas facultativas o anaerobia-facultativa -Satisfactoria resistencia a variaciones de carga -Reducidas posibilidades de malos olores 	<ul style="list-style-type: none"> -Introducción de equipos -Ligero aumento de sofisticación -Requisitos de energía relativamente elevados -Baja eficiencia en remoción de coliformes

(Von Sperling, 1986)

2.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO EN LAS LAGUNAS FACULTATIVAS

El funcionamiento de las lagunas facultativas, se basa en la interacción que hay entre las bacterias y microalgas presentes en el sistema, ya que su interacción permite la autopurificación en el tratamiento de las aguas residuales (Correa, 2008).

La interacción entre las microalgas y las bacterias se realiza cuando, las microalgas llevan a cabo la fotosíntesis con el CO_2 que le suministra la respiración de las bacterias, liberando O_2 , y las bacterias utilizan este oxígeno para realizar esta respiración celular (Figura 2.3.1) (Von Sperling, 1986). Ambos procesos permiten que se degrade la materia orgánica del agua residual.

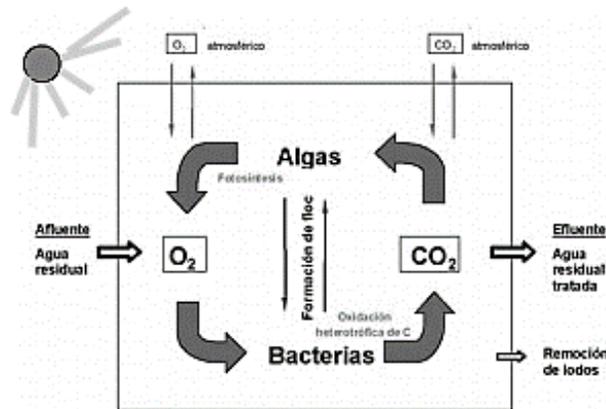


Figura 2.3.1. Interacción entre las microalgas y bacterias en una laguna facultativa.

Fuente: (Medina, Gutzeit, & Neis, s.f)

2.4. MICROALGAS EN LAGUNAS FACULTATIVAS

El crecimiento de microalgas en las lagunas facultativas está sujeto a muchos factores. Entre ellos, la radiación solar, nutrientes (Nitrógeno y Fósforo), temperatura, carga orgánica, el viento, área superficial, tiempo de retención, diseño de la laguna y otros. En algunas ocasiones, por problemas en estos factores, se da una sobreproducción de microalgas, las cuales provocan una disminución en la calidad del efluente por un ineficiente tratamiento, por lo cual se aumentan algunos parámetros como el Potencial de Hidrógeno (pH), la DQO, DBO y SST, generalmente. En ocasiones, es difícil detectar el motivo por el cual una laguna se encuentra con este tipo de problemas, por lo que hay que tomar medidas para disminuirlas antes de que salgan por el efluente (Correa, 2008).

Algunos grupos de microalgas que generalmente están presentes en las lagunas facultativas son (Crites & Tchobanoglous, 2000) (Bellinger & Sigee, 2010):

- **Algas Verdes:** Estas son de las más comunes, los géneros principales en lagunas están las *Chlamydomonas*, *Chlorella* (Figura 2.4.1.A) y *Euglenas* (Figura 2.4.1.B). Las *Euglenas* son de importancia ambiental, ya que indican sobrecarga orgánica.
- **Algas azul-verdosas o cianobacterias:** la presencia de este tipo de microorganismos es de mucho cuidado, ya que algunas de ellas liberan toxinas al agua. Algunos géneros principales son como las *Anabaena* (Figura 2.4.1.C), *Oscillatoria* (Figura 2.4.1.D), *Phormidium* y *Anacystis*.

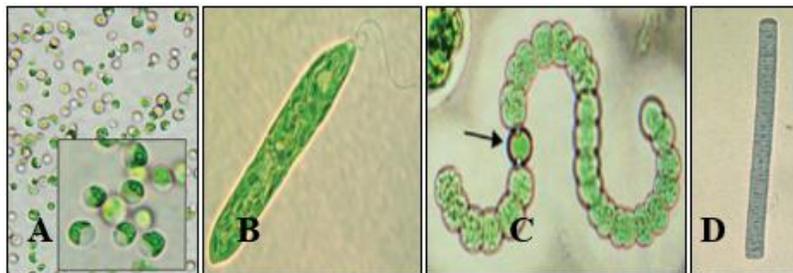


Figura 2.4.1. Microalgas presentes en lagunas facultativas. A. *Chlorella*. B. *Euglena*. C. *Anabaena*. D. *Oscillatoria*.

Fuente: (Bellinger & Sigee, 2010)

Como se mencionó anteriormente, una de las fuentes más importantes por el que las microalgas están presentes en lagunas, es por la presencia de nutrientes (principalmente nitrógeno, fósforo y carbono). Las microalgas requieren de estos nutrientes para su desarrollo, ya que los utilizan como cofactor de enzimas esenciales con las cuales llevan a cabo su metabolismo; y en las lagunas utilizan los compuestos de nitrógeno y fósforo que trae el agua residual para poder desarrollarse. El crecimiento de las microalgas (gracias a la fotosíntesis que realizan) se representa con la siguiente ecuación (Stumm & Morgan, 1996):



Con la ecuación anterior, puede evidenciarse la necesidad de nitrógeno, fósforo y carbono inorgánico que requieren las microalgas para desarrollarse, de hecho, se debe cumplir una relación de DBO/N/P de 100/5/1 (Yáñez, 1992).

Sin embargo, altos niveles de estos nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno, produce que las microalgas se proliferen. En aguas residuales domésticas crudas, el nitrógeno total se espera que se encuentre en el rango de 20 a 40 mg/L, nitrógeno orgánico entre 8 y 15 mg/L y amoníaco libre entre 12 y 25 mg/L. Además, valores normales de fósforo total se encuentra en el rango de 4-8 mg/L, fósforo orgánico entre 1-3 mg/L y fósforo inorgánico 3-5 mg/L (Metcalf & Eddy, 1996). Estos nutrientes provienen principalmente del agua residual afluyente, sin embargo no es la única.

Además del agua de entrada, una fuente importante de nutrientes es el lodo que se acumula en el fondo de la laguna. Este lodo es el que provee la zona anaerobia propia de las lagunas facultativas; entonces, si la capa de lodo es muy gruesa, la zona anaerobia predominará, lo cual provoca un desequilibrio en el tratamiento biológico que disminuye la calidad del efluente e indiscutiblemente hace que predominen las microalgas sobre las bacterias (EPA, 1988).

Una manera de determinar cuándo es un momento apropiado para remover el lodo del fondo, es cuando hay presencia de natas flotantes en la laguna, que incluso causan malos olores. El lodo se acumula en el fondo a una proporción de 0,03 a 0,08 m³/hab.año (Von Sperling, 1986). Es por esto que es necesario considerar la limpieza del lodo del fondo de la laguna cada cierto tiempo, según se observen las condiciones de operación de la laguna.

2.5.DISEÑO DE LAGUNAS FACULTATIVAS

Para el diseño de lagunas facultativas, no existe un consenso mundial respecto a las ecuaciones específicas que deben utilizarse para su diseño. Sin embargo, en este proyecto se toman como base las ecuaciones que mejor se adapten a las condiciones que rodean la laguna facultativa en estudio.

En el tratamiento de las aguas residuales mediante lagunas, siempre es recomendable el uso de al menos dos lagunas, esto para facilitar la operación y mantenimiento, ya que, esto permitirá remover el lodo acumulado en el fondo de las lagunas, manteniendo igual el tratamiento del agua, aunque sea con una sola laguna.

Para el caso del control de microalgas, se recomienda que se utilicen dos lagunas en serie, ya que con esta conformación se ha observado que en la laguna primaria se da un abundante crecimiento de microalgas, con lo cual se obtiene una disminución importante en la DBO y sólidos suspendidos totales; posteriormente, en la laguna secundaria se presentan menores cantidades de microalgas (Yáñez, 1980). Además, es indispensable que se cumplan con ciertos parámetros de diseño de lagunas, principalmente con la tasa de aplicación superficial y el tiempo de retención.

2.5.1. Evaluación de parámetros de diseño

Para realizar la evaluación de una laguna facultativa, deben calcularse ciertos parámetros de diseño, que según su cumplimiento a lo mencionado en la literatura, favorezcan su adecuada operación y tratamiento del agua residual. Estos parámetros de diseño se basan en un caudal promedio diario y una carga orgánica determinada. Posterior a ello, se calculan los parámetros de: área, volumen, relación L/A, tiempo de retención, tasa de aplicación superficial, número de dispersión, coeficiente de remoción de DBO y DBO total efluente.

2.5.1.1. Determinación del caudal de diseño

Para iniciar una evaluación de una laguna facultativa, lo primero que debe realizarse es la determinación del caudal de diseño. Este caudal debe ser el caudal promedio diario, y es recomendable determinar el caudal máximo diario para verificar. Puede calcularse de varias formas.

Una de las formas es mediante el cálculo del caudal teórico, según la cantidad de habitantes y la dotación. La ecuación 2 muestra la forma de realizar este cálculo.

$$Q_{diseño} = \frac{Población (hab) \cdot Dotación \left(\frac{L}{hab.día}\right)}{1000} * Porcentaje de contribución \quad (\text{Ecuación 2})$$

En la urbanización Las Lomas en Buenos Aires de Puntarenas, se estima una población de 325 habitantes. Además, según el código de instalaciones hidráulicas y sanitarias de Costa Rica, la dotación normal es de 150 L/hab.día. Por otra parte, según la

literatura, en promedio el porcentaje de contribución es del 80% (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Sin embargo, dado que la evaluación que se va a realizar parte de condiciones reales, es más recomendable calcular en el sitio el caudal promedio diario y máximo diario. El caudal promedio diario se calcula mediante la toma constante del caudal instantáneo durante varios días (al menos una semana); posteriormente, se suman todos los caudales instantáneos, para así obtener un valor de metros cúbicos por cada día. Con los valores de caudal diario, se realiza un gráfico para observar la tendencia que lleva, y los valores promedios y el máximo. De allí se elige el valor de caudal promedio diario y máximo diario.

2.5.1.2. Determinación de la carga orgánica

La carga orgánica, se toma como los Kg de DBO que entran a la laguna por día. Este valor es de suma importancia también, ya que éste nos deja ver el nivel de contaminación que trae el agua residual, y de esto dependerán muchos parámetros de diseño.

Para calcularlo, se puede realizar de forma teórica, tomando en cuenta la población y los valores estándar de los g de DBO/hab.día. Para su cálculo, se toma en cuenta la fórmula 3.

$$Carga\ Orgánica_{diseño} = \frac{Población\ (hab) * Carga\ por\ habitante\ \left(\frac{g\ DBO}{hab.día}\right)}{1000} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Según la literatura, un valor normal para la carga por habitante es de 43 gDBO/hab.día (Organización Mundial de la Salud, 2005).

2.5.1.3. Área y volumen

Para determinar el volumen de la laguna, se puede realizar un cálculo teórico, basado en el caudal entrante, la DBO entrante y la temperatura del agua en el mes más frío. La ecuación 4, muestra la fórmula.

$$\text{Volumen (m}^3\text{)} = 7 * Q * \left(\frac{\text{DBO}_a}{200}\right) * 1,085^{(35-T)} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

A partir de este valor, puede determinarse el área, al dividir el volumen entre la profundidad (Cubillos, 2001).

Por otra parte, para calcular el área de una laguna ya construida, es recomendable no basarse solamente en la información de los planos, sino que es necesario realizar un levantamiento en el sitio, para determinar las dimensiones reales de la laguna. Con estos datos, y mediante una serie de operaciones matemáticas, puede calcularse el área de la laguna.

2.5.1.3. Relación Largo/Ancho

Este parámetro es muy importante, ya que determina el régimen hidráulico que tendrá la laguna. A mayor relación L/A, se favorecerá el flujo en pistón (más eficiente), y a menor relación, se favorecerá el flujo de mezcla completa. Sin embargo, es importante mantenerse dentro del rango, ya que si la relación es muy baja (menor a 2, lo que representa una laguna prácticamente cuadrada), entonces se favorecerán los cortos circuitos y que existan zonas muertas donde el agua permanezca estancada. Por el contrario, cuando la relación L/A es muy alta (mayor a 4, que representa una laguna muy larga), estas lagunas son muy sensibles a las variaciones en caudal y carga, por lo que requeriría una carga muy baja (Yáñez, 1992).

Para calcular la relación L/A se utiliza la ecuación 5.

$$\text{Relación } \frac{L}{A} = \frac{\text{Largo promedio (m)}}{\text{Ancho promedio (m)}} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Los rangos recomendados son los siguientes:

Cuadro 2.5.1.3.1. Valores recomendados para el parámetro de la relación L/A

Parámetro	Lagunas facultativas	Lagunas de maduración	Unidad
Relación Largo/Ancho	2 a 4	1 a 3	Adimensional

(Von Sperling, 1986)

2.5.1.4. Tasa de aplicación superficial

La tasa de aplicación superficial o la carga orgánica por unidad de área es de los más importantes en el diseño y operación de las lagunas facultativas. La tasa de aplicación superficial determina la cantidad de área necesaria para que el proceso de fotosíntesis (que realizan las microalgas) pueda darse en la laguna, y así exista un balance entre la producción y la demanda de oxígeno. Este parámetro se asocia con la cantidad de oxígeno necesario para estabilizar la materia orgánica que entra a la laguna (Von Sperling, 1986).

Para lagunas primarias (que recibe el efluente crudo), la tasa de aplicación superficial se calcula a partir de la DBO afluente, el caudal y el área (Ecuación 6); y para lagunas secundarias se calcula a partir de la tasa de aplicación superficial de la laguna primaria (Ecuación 7).

$$\text{Tasa de aplicación superficial} \left(\text{Kg} \frac{\text{DBO}}{\text{ha-día}} \right) = \frac{\text{DBO} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) * \text{Caudal} \left(\frac{\text{L}}{\text{s}} \right)}{\text{Área} \left(\text{m}^2 \right)} * 864 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\text{Tasa de aplicación superficial} \left(\text{Kg} \frac{\text{DBO}}{\text{ha-día}} \right) = 0,765 (\text{TAS } i) - 0,8 \quad (\text{Ecuación 7})$$

Los valores recomendados de TAS para lagunas facultativas, de maduración y de macrófitas (con lentejas de agua) se indican en el cuadro 2.5.1.4.1.

Cuadro 2.5.1.4.1. Valores recomendados para la tasa de aplicación superficial en lagunas facultativas, de maduración y de macrófitas.

Parámetro	Lagunas facultativas	Lagunas de maduración	Lagunas de macrófitas	Unidad
Tasa de aplicación superficial	100-350	150-250	<100	Kg DBO/ha.día

(Von Sperling, 1986) (Metcalf & Eddy, 1996)

2.5.1.5. Tiempo de retención

El tiempo de retención es el tiempo requerido por los microorganismos presentes en la laguna para degradar la materia orgánica. Es muy importante tomar en cuenta el cumplimiento al rango recomendado de este parámetro, ya que cuando es muy elevado, el

agua se empieza a estancar, por lo que se favorece el crecimiento de las microalgas; pero si por el contrario es muy bajo, entonces no se le da el tiempo requerido para que pueda realizarse el proceso del tratamiento (Cuadro 2.5.1.5.1).

El tiempo de retención se calcula a partir del área de la laguna, la profundidad útil y el caudal entrante (Ecuación 8).

$$Tr \text{ (días)} = \frac{\text{Área (m}^2\text{)} * \text{Profundidad útil (m)}}{\text{Caudal } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right)} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Este parámetro está muy ligado a la profundidad útil. La profundidad está ligada con problemas físicos, biológicos e hidráulicos. Por lo que debe tomarse en cuenta que si la laguna es poco profunda, no se puede dar correctamente la interacción entre las bacterias y las microalgas, y tampoco se presentan las condiciones aerobias y anaerobias que requieren para el tratamiento; lo que resulta en sobreproducción de microalgas (Von Sperling & Chernicharo, 2005). En el cuadro 2.5.1.5.1 se muestran los valores recomendados de profundidad para lagunas facultativas, de maduración y de macrófitas (con lentejas de agua).

Cuadro 2.5.1.5.1. Valores recomendados para el tiempo de retención y la profundidad en lagunas facultativas, de maduración y de macrófitas

Parámetro	Lagunas facultativas	Lagunas de maduración	Lagunas de macrófitas	Unidad
Tiempo de retención	15-45	3-20	20-25	Días
Profundidad	1,2-2,4	0,8 a 1,2	1,2-1,8	Metros

(Von Sperling, 1986) (Metcalf & Eddy, 1996)

2.5.1.6. Número de dispersión

El número de dispersión es un valor importante, ya que define el tipo de flujo que va a llevar el agua en la laguna. Es lo que define el régimen hidráulico. Conocer el flujo que llevará el agua en su paso por la laguna es de suma importancia, ya que éste se relaciona con la tasa de remoción de nutrientes, específicamente en el caso de la remoción de DBO y otros parámetros de importancia (Cruz, Alayón, & Monsegny, 2000).

El régimen hidráulico puede ser de tres formas: flujo en pistón, mezcla completa o de flujo disperso. Cada uno posee una fórmula distinta para calcular teóricamente la concentración de DBO soluble efluente, lo cual se detalla en el cuadro 2.5.1.6.1.

Cuadro 2.5.1.6.1. Régimen hidráulico presente en lagunas facultativas y su relación con otros parámetros de diseño

Régimen hidráulico	Características	Rango del número de dispersión	Fórmula de la concentración de DBO soluble efluente	Ecuación
Mezcla Completa	El agua que entra al sistema se dispersa instantáneamente, lo cual provoca que las características del agua sean las mismas en cualquier punto de la laguna	$d \approx 1$	$S = \frac{S_0}{(1 + k * t)}$	9
Flujo en Pistón	El agua que entra al sistema avanza a través de la laguna y es descargada en este mismo orden	$d \approx 0$	$S = S_0 e^{-k t}$	10
Flujo disperso	Es un flujo de transición entre el flujo en pistón y de mezcla completa	$1 > d > 2$	$S = S_0 \frac{4 a e^{1/2d}}{(1 + a)^2 e^{1/2d} - (1 - a)^2 e^{-a/2d}}$ $a = \sqrt{1 + 4 k t d}$	11

(Von Sperling, 1986), (Cruz, Alayón, & Monsegny, 2000)

Donde,

S_0 = Concentración de DBO total afluente (mg/L)

S = Concentración de DBO soluble efluente (mg/L)

k = coeficiente de remoción de DBO (d^{-1})

t =tiempo de retención (días)

d =número de dispersión

Muchos autores han definido el valor del número de dispersión de diferentes maneras. En el caso específico de este estudio, se utilizó la formula elaborada por Yáñez (1993), donde se toma en cuenta el valor de la relación L/A para el cálculo del número de dispersión, la fórmula es la siguiente:

$$d = \frac{(L/A)}{-0,261+0,254(L/A)+1,014(L/A)^2} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

2.5.1.7. Coeficiente de remoción de DBO (k)

Para poder conocer el valor de la DBO que saldrá por el efluente, es necesario conocer el coeficiente de remoción de DBO (k). Este coeficiente se da en términos de la temperatura del agua.

En la teoría, existen valores de k para una temperatura estándar del agua de 20°C. Para lagunas primarias el valor de k se encuentra en el rango de 0,3–0,4 d⁻¹, y para lagunas secundarias de 0,25-0,32 d⁻¹ (Von Sperling, 1986). Una vez que se tiene este valor, se hace la corrección a la temperatura real del agua en estudio, para ello se utiliza la fórmula de Arrhenius, que es la siguiente:

$$k_T = k_{20}\theta^{(T-20)} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Donde,

K₂₀= Coeficiente de remoción a 20°C

θ=Coeficiente de temperatura (para un k₂₀=0,35; θ= 1,085; para k₂₀=0,30, θ=1,05)

T=Temperatura del agua (°C)

2.5.1.8. DBO total efluente

Según Von Sperling (1986) el cálculo de la DBO total efluente, se realiza de la siguiente forma:

$$DBO \text{ total efluente} = DBO \text{ soluble} + DBO \text{ particulada} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

La fórmula a utilizar para calcular la DBO soluble efluente., depende del tipo de régimen hidráulico de la laguna (descritas en el cuadro 2.5.1.6.1).

Una vez que se encontró la DBO soluble efluente, debe tomarse en cuenta el valor agregado por la DBO particulada, que corresponde a la DBO que se produce por los sólidos en suspensión (microalgas) presentes.

Para la DBO particulada, se asume un valor de SST efluente, y se toma en cuenta la siguiente relación:

$$\frac{1 \text{ mg SST}}{L} = \frac{0,45 \text{ mg DBO}}{L}$$

Por lo que se hizo el siguiente cálculo:

$$DBO \text{ particulada} = SST \text{ promedio efluente} \left(\frac{\text{mg}}{L} \right) \times \frac{0,45 \text{ mg DBO/L}}{1 \text{ mg SST/L}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

2.6.MÉTODOS DE PULIDO DEL EFLUENTE DE LAGUNAS FACULTATIVAS

Las lagunas facultativas dependen mucho de las condiciones ambientales a las que se encuentran rodeadas, por lo que en ocasiones es necesario la implementación de medidas de pulido para mejorar la calidad del efluente. Algunos de estos métodos de pulido del efluente de lagunas facultativas se detallan a continuación.

2.6.1. Control biológico: Macrófitas flotantes en el Sistema Lagunar

El uso de macrófitas flotantes es común para el tratamiento de efluentes de lagunas facultativas, ya que permiten reducir de manera eficaz la concentración de nutrientes (Fósforo (P), Nitrógeno (N) y otros) y por ende las microalgas. A lo largo de los años, las macrófitas flotantes comprenden una familia amplia de plantas, sin embargo algunas de las principales macrófitas utilizadas para el tratamiento de aguas domésticas y remoción de nutrientes son: el lirio acuático (también llamado jacinto de agua, *Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp*) (Martelo & Lara, 2012).



Figura 2.6.1.1. Macrófitas flotantes. Izq. Lirio Acuático. Der. Lenteja de agua

Fuente: (University of Florida, 2014)

Algunas características de ambas macrófitas se describen en el cuadro 2.6.1.1. Se puede observar que respecto a la tasa de crecimiento, la lenteja de agua es muy rápida, ya

que duplica su biomasa en 4 días. Además, la eficiencia en remoción de contaminantes, para todos los casos, es más eficiente la lenteja de agua. Por último, la biomasa de ambos tiene muchos usos, lo importante es tomarlos en cuenta a la hora de elegir una opción de pulido, para sacar provecho a lo que para algunos sería un desecho o una molestia.

Cuadro 2.6.1.1. Características de las algunas macrófitas flotantes para su implementación en el tratamiento del efluente de lagunas facultativas

Característica	Lirio acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>)	Lenteja de agua (<i>Lemna sp.</i>)
Tasa de crecimiento	Alta pero inferior a la lenteja de agua	En aguas residuales a 27°C puede duplicar su biomasa en 4 días. Tasa de crecimiento 30% mayor a la del lirio (EPA, 1988).
Eficiencia de remoción de contaminantes	DBO: 37-95,1% SST:21-92% N total: 72,4-90,25% P total: 42,3-98,5% (Martelo & Lara, 2012)	DBO: 50-95% SST:30-92% N total: 89% P total: 67% (Martelo & Lara, 2012)
Característica	Lirio acuático (<i>Eichhornia crassipes</i>)	Lenteja de agua (<i>Lemna sp.</i>)
Problemas por mosquitos y malos olores	Es un problema importante si no cuenta con un sistema de inyección de aire (Iqbal, 1999)	Puede controlar el olor y los mosquitos en caso de que existan (Iqbal, 1999)
Usos de la biomasa cosechada	-Digestión anaerobia para producción de metano. -Compostaje para disposición en el suelo. -Secado al aire para disposición en relleno sanitario. -Incineración -Regado y arado para mejoramiento del suelo. (Martelo & Lara, 2012)	-Por su alta digestibilidad, es una buena opción para la ingesta de animales (en lugar del pasto) -Es un buen suplemento en la alimentación animal, como cerdos (Rodríguez, Díaz, Guerra, & Hernández, 1996). -Alimento para peces -Aplicación en el suelo -Compostaje -Fermentación para obtención de etanol -Planta medicinal (Iqbal, 1999).

El tratamiento con macrófitas ambientalmente es una opción muy viable, sin embargo, en el ámbito de diseño para la utilización de las mismas con el fin de controlar las microalgas, hay algunas restricciones que deben tomarse en consideración para que sea posible implementar esta opción, y son las que se detallan en el cuadro 2.6.1.2.

Cuadro 2.6.1.2. Criterios de diseño para la implementación de macrófitas flotantes en lagunas facultativas

	Valor máximo	
	Jacinto de agua	Lenteja de agua
Tasa de aplicación superficial (Kg DBO/ha.día)	11-44	<100
Profundidad de la laguna (m)	0,6-0,9	1,2-1,8
Tiempo de retención (días)	6-18	20-35

(Metcalf & Eddy, 1996) (Iqbal, 1999)

2.6.2. Precipitación química

El uso de productos químicos en aguas residuales, ha sido una técnica muy utilizada, principalmente en aguas residuales industriales. Esta consiste en la precipitación de los sólidos suspendidos por la adición de un producto químico (Sans & De Pablo, 1989).

Esta puede ser una opción para el control de microalgas en lagunas. Sin embargo, al utilizar un producto químico para tal fin, debe considerarse que el producto elegido sea eficiente para las microalgas presentes en la laguna; también, que se va a aumentar la cantidad de sólidos en el fondo de la laguna, los cuales tendrán del químico que se le agregó. También debe tomarse en consideración, la seguridad en su utilización y el costo.

Algunos productos químicos comúnmente utilizados para este fin, se basan en compuestos oxidantes como peróxido de hidrógeno o también algunas sales de cobre y hierro. Se han visto resultados en químicos como el carbonato de sodio peroxihidratado, sulfato de cobre, quelato de cobre, cloruro férrico e hidróxido de magnesio (Torres, Camberato, & López, 2011; Lynch, 2009; Metcalf & Eddy, 1996).

2.6.3. Filtración

Un proceso de reducción de sólidos suspendidos totales, principalmente microalgas, que ha sido utilizado y recomendado, es el uso de filtros, principalmente los filtros de roca y los filtros de arena intermitentes (Crites, Middlebrooks, & Reed, 2005).

Los filtros de roca, trabajan mediante la eliminación de los SST del agua por sedimentación, ya que cuando el agua pasa por las rocas, entonces las microalgas se van quedando allí donde ellas mismas se van degradando biológicamente. Estos filtros tienen la ventaja de que requieren poca operación y mantenimiento, sin embargo, en ocasiones puede generar malos olores.

Para su diseño, se recomienda para zonas calientes, que se tome una tasa de carga hidráulica de al menos $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{día}$, que se utilicen rocas con diámetros entre 2,5 y 20 cm (EPA, 1983). Un ejemplo real de como se ha instalado un filtro de roca se observa en la figura 2.6.3.1. El agua inicialmente pasa por el tratamiento en las lagunas, para que al final, como método de pulido del efluente el agua de forma ascendente pasa por el filtro de rocas, donde se retienen los sólidos, y finalmente el agua sale por un drenaje en el fondo del filtro.

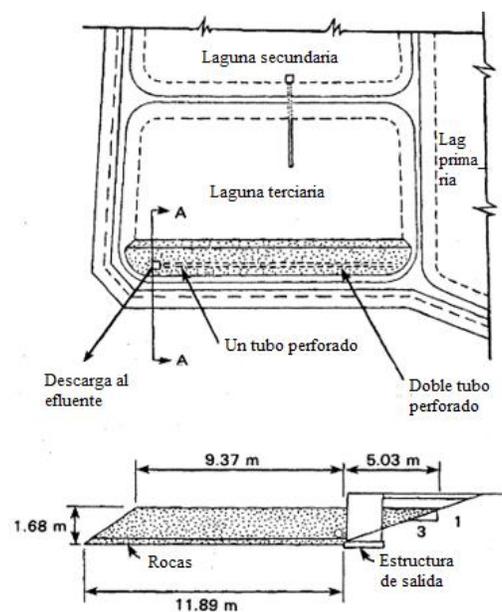


Figura 2.6.3.1. Filtro de roca instalado al final de un sistema lagunar en California, Estados Unidos.

Fuente: (EPA, 1983)

Los filtros de arena intermitentes, se basan en el tratamiento del agua residual mediante procesos físicos y biológicos. A lo largo de la historia se ha comprobado su efectividad y bajo costo en lo que respecta a la disminución de DBO y SST.

El parámetro más importante a tomar en cuenta es el diámetro de la arena a utilizar, lo cual va a depender del caudal y de la carga orgánica que se va a aplicar. Por ejemplo, cuando la DBO y los sólidos suspendidos, son menores a 30 mg/L, entonces se pueden obtener buenas eficiencias con arenas de 0,3 mm de diámetro. Sin embargo, siempre se recomienda el uso de al menos dos unidades de filtración para mayor facilidad de mantenimiento.

El área total requerida para diseñar un filtro de arena intermitente se calcula dividiendo el caudal promedio entre la carga superficial de diseño. La carga superficial de diseño debe estar entre los valores de 0,37-0,56 m/día (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Un ejemplo de cómo debería ser un filtro de arena intermitente a la salida de una laguna es el que se muestra en la figura 2.6.3.2. Como se observa, el agua después de pasar por el tratamiento en la (s) laguna (s), llega al filtro de arena, donde de manera ascendente el agua pasa por las diferentes capas de arena, que va de menor a mayor diámetro para abarcar el mayor tipo y tamaño de sólidos posibles, y finalmente el agua filtrada sale por un drenaje en la parte baja del filtro.

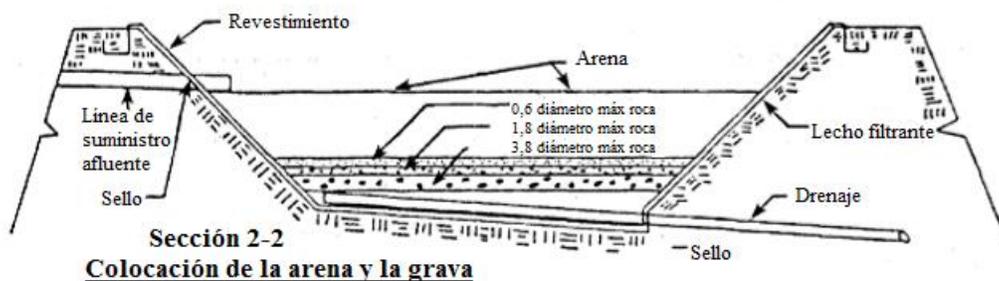


Figura 2.6.3.2. Detalle típico de un filtro de arena intermitente

Fuente: (EPA, 1983)

2.6.4. Ondas de ultrasonido

Uno de los procesos de reducción de microalgas en lagunas facultativas que ha sido utilizado, es la tecnología de ondas ultrasónicas. Es un sistema de propagación de ondas de ultrasonido, las cuales inhiben el crecimiento y la propagación de microalgas en lagunas, estanques, piscinas, lagos, plantas de tratamiento de aguas residuales y otros.

El principio de funcionamiento para la reducción de microalgas se basa en el daño a distintas estructuras internas de ellas. Se basa en provocar la rotura de distintos orgánulos de las células, dependiendo del tipo de microalga. En algunas causa la rotura del tonoplasto de las vacuolas (o membrana vacuolar), o de la pared celular de ellas o incluso de la membrana o las vesículas de gas de las cianobacterias. Esto termina provocando que la microalga se sedimente (Lee, Nakano, & Matsumara, 2001) (LG SOUND, 2013).

Algunos de los tipos de microalgas eliminables mediante el uso de ondas de ultrasonido se muestran en el cuadro 2.6.4.1.

Cuadro 2.6.4.1. Microalgas eliminables con equipo de ultrasonido (90% de eficacia)

<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Lagerheima</i>
<i>Cryptomonas erosa</i>	<i>Dictyosphaerium</i>
<i>Rhodomonas minuta</i>	<i>Coelastrum</i>
<i>Cryptomonas sp</i>	<i>Chlorella</i>
<i>Merismopedia tenuissima</i>	<i>Micractinium</i>
<i>Scenedesmus acuminates</i>	<i>Heteroleibleinia sp.</i>
<i>Gleocystis sp.</i>	<i>Leptolyngbya sp.</i>
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	<i>Pseudanabaena sp.</i>
<i>Oocystis pusilla</i>	<i>Achnanthes lanceolata</i>
<i>Phacus sp.</i>	<i>Cocconeis placentula</i>
<i>Gomphonema sp.</i>	<i>Fragilaria capucina</i>
<i>Nitzschia sp. (Sólo sp.)</i>	<i>Chlamydomonas sp.</i>
<i>Pinnularia sp.</i>	<i>Oocystis sp.</i>
<i>Navicula minima</i>	<i>Stigeoclonium sp.</i>
<i>Ulothrix sp.</i>	<i>Closterium sp.</i>
<i>Anabaena</i>	<i>Stigeoclonium sp.</i>
<i>Aphanizomenon</i>	<i>Pseudoanabaena sp.</i>
<i>Microcystis</i>	<i>Achnanthes minutissima</i>
<i>Cladophora</i>	<i>Gomphonema parvulum</i>
<i>Spirogyra</i>	<i>Fragilaria ulna</i>
<i>Amphanizomenon</i>	<i>Scenedesmus abundans</i>
<i>Cyclotella</i>	<i>Oedogonium sp.</i>

Fuente: LG Sonic

El ultrasonido trabaja emitiendo ondas ultrasónicas con tecnología de “línea de mira”, esto significa que las ondas se van a propagar en un ángulo de 180° frente al equipo, y que no van a girar; también que estas ondas rebotan en superficies duras como concreto y rocas. La eliminación completa de las microalgas, generalmente lleva un tiempo de 6 semanas, y es posible que se produzcan proliferaciones secundarias debido a las esporas que se encuentren en el fondo de la laguna, sin embargo, el uso continuo del ultrasonido también las eliminará (Sonic Solutions, 2009).

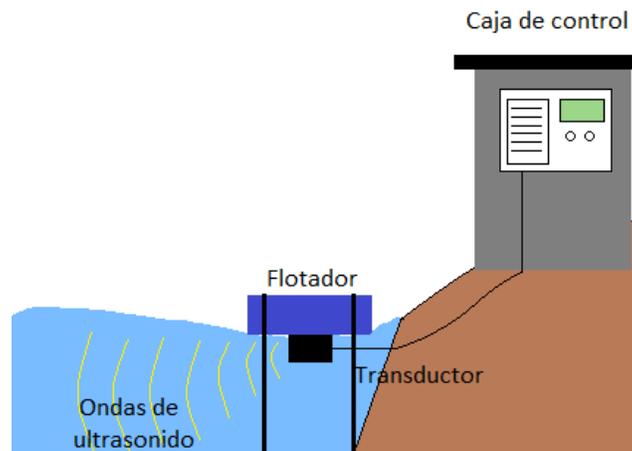


Figura 2.6.4.1. Funcionamiento del equipo de ultrasonido.

El equipo de ultrasonido, tiene efectos directos e indirectos en la mejora de la calidad del efluente de las lagunas, ya que además de reducir la cantidad de microalgas, disminuye también los nitratos, sulfatos, fosfatos, DBO, DQO, SST y pH (LG SOUND, 2013).

Se ha demostrado la eficiencia de los equipos de ondas ultrasónicas en ciertas zonas. Un ejemplo de ello es la laguna facultativa de la empresa “Sabesp” en Itapetininga, Brasil. Esta laguna presentaba problemas de DBO en el efluente muy variable, sólidos en suspensión muy altos, presencia importante de microalgas y malos olores. El estudio demostró que después de 1 mes de colocar el equipo, se tuvo una reducción de aproximadamente el 60 % de los valores de clorofila-a (Anexo 3).

3. METODOLOGÍA

3.1.INTRODUCCIÓN

La metodología para el presente proyecto, se basa en los procedimientos necesarios para evaluar distintos parámetros de operación y diseño de lagunas facultativas; con el fin de determinar el desempeño actual del sistema de tratamiento y facilitar una propuesta de mejora basada en los resultados obtenidos. Inicialmente se determina el caudal promedio diario y máximo diario, y la carga orgánica presente. Posteriormente se evalúan parámetros de diseño para la conformación actual y para 3 propuestas de mejora.

3.2.PLANTA DE TRATAMIENTO EN ESTUDIO: LAGUNA FACULTATIVA

La PTAR en estudio, se encuentra en la provincia de Puntarenas, en el cantón de Buenos Aires, en el distrito Central, contiguo a la Urbanización Las Lomas (Figura 3.2.1).

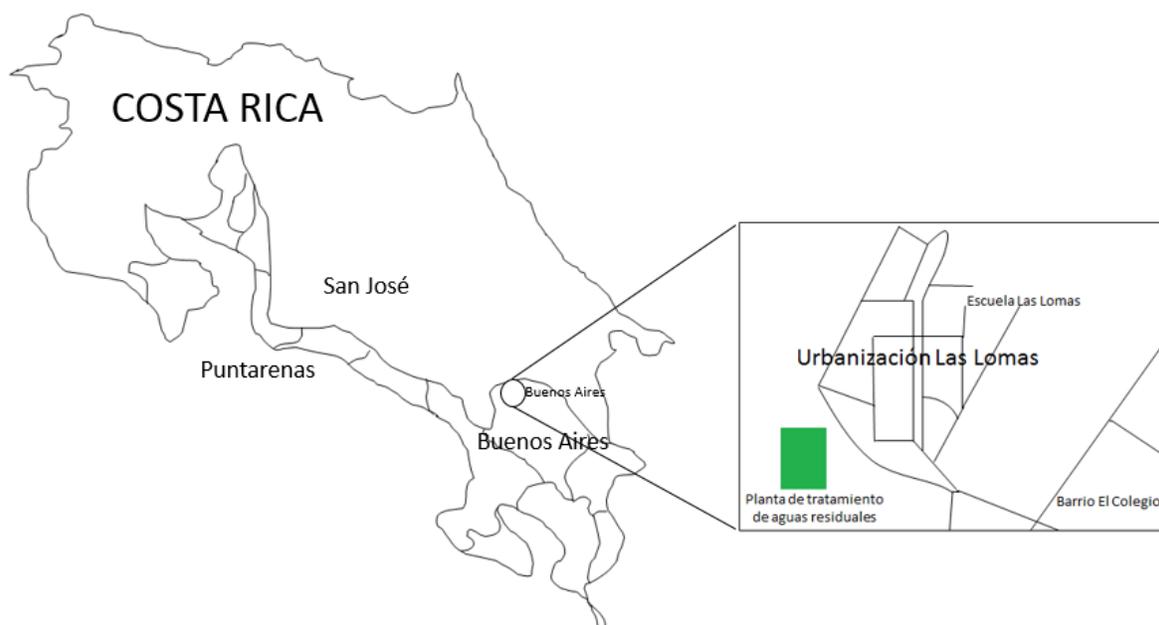


Figura 3.2.1. Ubicación de la PTAR del AyA en la Urbanización Las Lomas en Buenos Aires, Puntarenas.

El Sistema de tratamiento de aguas residuales tiene 88 conexiones (325 habitantes) de los cuales se encuentra una escuela y los demás son viviendas.

La planta de tratamiento cuenta con las siguientes unidades:

- Pretratamiento: Cuando el agua ingresa al sistema, primero pasa por un tratamiento primario que consiste en una rejilla para la separación de sólidos gruesos, y posteriormente pasa a un canal desgrasador (Figura 3.2.2).



Figura 3.2.2. Pretratamiento de la PTAR

- Sistema de distribución de entrada: Cuando el agua residual sale del pretratamiento, pasa a una caja de distribución del caudal, donde posteriormente se vierte en tres puntos distintos a la laguna (Figura 3.2.3).



Figura 3.2.3. Sistema de distribución del caudal de entrada a la laguna.

- Laguna facultativa: El tratamiento principal se da en una única laguna facultativa con la que cuenta la planta. La laguna tiene un caudal promedio diario de $40 \text{ m}^3/\text{día}$; sus dimensiones, tomadas en campo, son las mostradas en la figura 3.2.4.

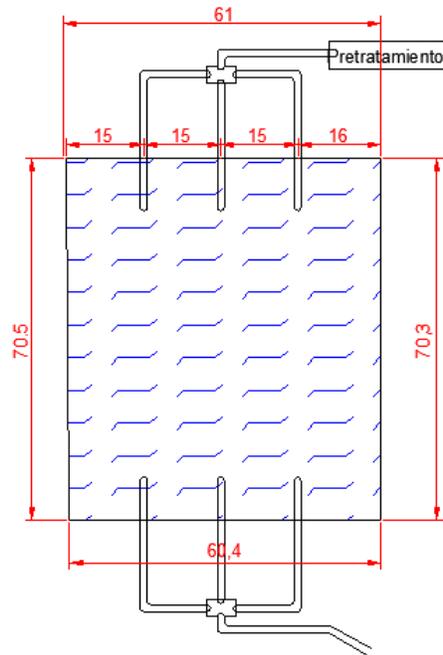


Figura 3.2.4. Dimensiones de la laguna facultativa actual de la PTAR

El área total de la laguna es de 4273,2 m² y su profundidad útil de 1,65 m (borde libre de 0,35 m).

- Estructuras de salida: Después del tratamiento en la laguna facultativa, el agua tratada sale por tres estructuras de salida las cuales convergen en una caja de unión para salir por un solo punto donde se encuentra un vertedero triangular (Figura 3.2.5).



Figura 3.2.5. Estructuras de salida de la laguna

Posterior a esto, el agua sale hacia un canal natural donde finalmente es vertido al Río Ceibo.



Figura 3.2.6. Estructura de salida de la PTAR

3.3.FUNDAMENTOS PARA LA EVALUACIÓN

3.3.1. Determinación del caudal de diseño

Para determinar el caudal de diseño, se optó por encontrar el caudal promedio diario con valores tomados en campo. Para ello, se realizó la medición del caudal de entrada a la laguna facultativa durante 20 días (del 14 de Mayo, 2014 al 2 de Junio) cada 5 minutos, obteniendo así un total de 5760 mediciones de caudal instantáneo. La determinación se realizó con un equipo de medidor de flujo basado en la medida de la altura y velocidad instantánea, marca GREYLINE, modelo STINGRAY, con sensor de velocidad QZ02-SD-01-PS (Greyline) (Figura 3.3.1.1).



Figura 3.3.1.1 Equipo de medición de caudal utilizado en el proyecto.

Fuente: (Greyline)

3.3.2. Determinación de la carga orgánica

Para determinar la carga orgánica que ingresa a la laguna facultativa, se optó por calcularla a partir de datos históricos de DBO de entrada, desde el último trimestre del año 2012 hasta el primer trimestre del año 2014.

3.3.3. Determinación del área

Para determinar el área de la laguna facultativa actual, se realizó un levantamiento, midiendo todos los lados de la laguna lo más exacto posible. Este levantamiento se realizó el viernes 14 de marzo, 2014.

Por otra parte, para el caso del cálculo del área real requerida, se tomaron los valores de caudal promedio diario, máximo diario y carga orgánica (según el procedimiento del apartado 3.3.1 y 3.3.2) y se calculó el área según la ecuación 4 y el procedimiento descrito en el apartado 2.5.1.3.

3.4. EVALUACIÓN DE LA LAGUNA FACULTATIVA ACTUAL

3.4.1. Relación Largo/Ancho

Para determinar la relación L/A de la laguna, se tomaron los valores promedios de los largos y anchos, y se utilizó la ecuación 5.

3.4.2. Tasa de aplicación superficial

Para la determinación de la tasa de aplicación superficial en la laguna actual, se utilizó la ecuación 6.

3.4.3. Tiempo de retención

El cálculo del tiempo de retención, se realizó con la ecuación 8.

3.4.4. Número de dispersion

El número de dispersión se determinó con la ecuación 12.

3.4.5. Coeficiente de remoción de DBO (k)

Partiendo de un valor de k_{20} de 0,35 y un coeficiente de temperatura de 1,085, se calculó el coeficiente de remoción de DBO a 24,9°C con la ecuación 13.

3.4.6. DBO total efluente

Para determinar la DBO total efluente, primero se determinó la DBO soluble efluente. Esta se calculó según el régimen hidráulico que indica el número de dispersión. Para el caso de la laguna facultativa actual, se utilizó la ecuación para mezcla completa, la ecuación 9.

Una vez que se determina la DBO total efluente. Se calculó la DBO particulada. Ésta parte de los SST promedio efluente. Para determinar los SST promedio efluente, se tomaron los valores históricos, desde el último trimestre del año 2012 hasta el primer trimestre del año 2014. Con este dato, se aplicó la ecuación 15.

Al tener el dato de la DBO soluble efluente y DBO particulada, se aplicó la ecuación 14.

3.5.EVALUACIÓN DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA

Para la evaluación de todas las propuesta de mejora que se plantearon, como punto de inicio se tomó el área real requerida, según el caudal y carga orgánica, calculados según lo indica el apartado 3.3.3.

3.5.1. Relación Largo/Ancho

Para las propuestas de mejora, ya que se parte de que se conoce el área requerida, entonces, se adoptó un valor de relación L/A, que fuera adecuado, en el sentido de que se favoreciera el flujo en pistón. Además, que coincidan las medidas para que la construcción y operación sean favorables.

3.5.2. Tasa de aplicación superficial

Para la determinación de la tasa de aplicación superficial en lagunas primarias, se utilizó la ecuación 6 y en lagunas secundarias la ecuación 7.

3.5.3. Tiempo de retención

El cálculo del tiempo de retención, se realizó con la ecuación 8.

3.5.4. Número de dispersión

El número de dispersión se determinó con la ecuación 12.

3.5.5. Coeficiente de remoción de DBO (k)

Para lagunas primarias, se partió de un valor de k_{20} de 0,35 y un coeficiente de temperatura de 1,085, y con estos datos se calculó el coeficiente de remoción de DBO a 24,9°C con la ecuación 13. Para lagunas secundarias, se utilizó la misma ecuación, pero partiendo de un valor de k_{20} de 0,3 y un coeficiente de temperatura de 1,05.

3.5.6. DBO total efluente

Para determinar la DBO total efluente, primero se determinó la DBO soluble efluente. Esta se calculó según el régimen hidráulico que indica el número de dispersión. Por lo que se utilizaron las ecuaciones 9 o 10.

Una vez que se determina la DBO total efluente. Se calculó la DBO particulada. Ésta parte de los SST promedio efluente. Para determinar los SST promedio efluente, se tomaron los valores históricos, desde el último trimestre del año 2012 hasta el primer trimestre del año 2014. Con este dato, se aplicó la ecuación 15.

Al tener el dato de la DBO soluble efluente y DBO particulada, se aplicó la ecuación 14.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.INTRODUCCIÓN

Los resultados del proyecto se basan en cinco fases. Inicialmente para la evaluación de una laguna facultativa es indispensable conocer el caudal de diseño y la carga orgánica (en términos de DBO promedio afluente y SST promedio efluente), por lo tanto la determinación de estos son el primer resultado. La segunda fase de resultados, es propiamente la evaluación de la conformación actual de la laguna facultativa. La tercera fase, consiste en determinar el área real que requieren las condiciones propias del agua residual entrante. Posteriormente, se evalúan diferentes propuestas como posible remodelación de la planta para mejorar la calidad del efluente. Y por último, las propuestas de mejora se analizan bajo ciertos criterios desde el punto de vista técnico, ambiental y económico.

4.2.CAUDAL DE DISEÑO Y CARGA ORGÁNICA

Para realizar la evaluación de la laguna facultativa, es indispensable conocer el caudal de diseño, que es el caudal promedio diario (el caudal promedio horario no se ocupa para el caso de lagunas). Además, se considera el caudal máximo diario, para verificar los resultados en estos casos. También, es de importancia conocer la carga orgánica, la cual se toma como la DBO afluente promedio y los sólidos suspendidos totales en el efluente.

4.2.1. Determinación del caudal promedio diario y caudal máximo diario

El caudal promedio diario, es un valor muy importante para iniciar una evaluación, ya que es tomado en cuenta para todas las mediciones de los parámetros y es la base para este estudio. Se toma el caudal promedio diario y máximo diario, ya que las lagunas al ser sistemas con extensiones grandes de área, no son susceptibles a cambios bruscos de caudal instantáneo. En el caso de la laguna facultativa en estudio, los valores de caudal diario obtenidos se especifican en la figura 4.2.1.1.

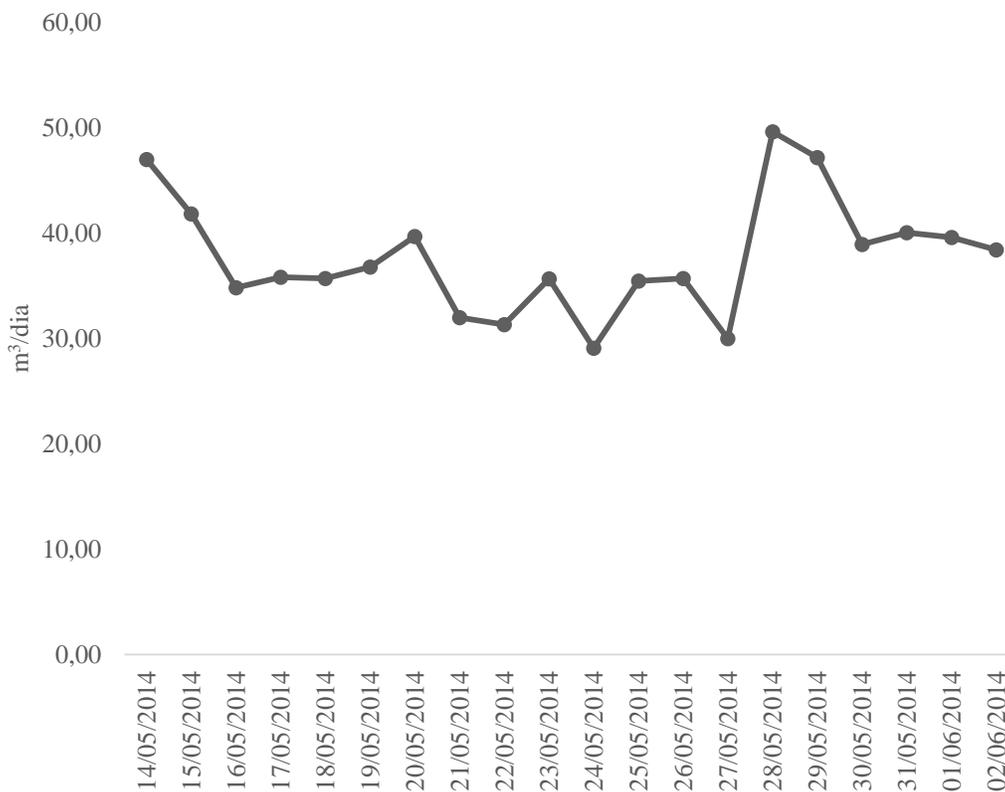


Figura 4.2.1.1. Caudal entrante por día en la laguna facultativa.

Estos valores corresponden a la cantidad de agua total que entro en ese día a la laguna. Estos datos, se tomaron en días soleados y días lluviosos, por lo que representa bien ambos escenarios.

Como puede observarse en la figura 4.2.1.1, el caudal por día que entra a la laguna se mantiene bastante estable, generalmente entre 30 y 50 m³/día. Es interesante recalcar, que la laguna está construida con base en un caudal de diseño de 86,4 m³/día, lo cual es mucho mayor a los valores obtenidos.

Si se calcula el valor teórico del caudal de diseño, tomando en cuenta que la población de la Urbanización Las Lomas es de 325 habitantes, adoptando una dotación de 150 L/hab.día y un porcentaje de contribución del 80%, el caudal de diseño sería de 39 m³/día, el cual se apega al rango normal que tiene la laguna en condiciones reales (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Por lo tanto, dadas las circunstancias anteriores, se toman los siguientes valores para el caudal promedio diario y el caudal máximo diario:

Caudal de diseño (promedio diario): 40 m³/día

Caudal máximo diario: 50 m³/día

4.2.2. Determinación de la carga orgánica promedio y sólidos suspendidos totales promedio

Para la determinación de la carga orgánica y el promedio de los SST de entrada a la laguna facultativa, se decidió calcularlos a partir de los datos históricos disponibles. Se tomaron desde el último trimestre del año 2012 hasta el primer trimestre del año 2014, obteniendo los resultados mostrados en el cuadro 4.2.2.1.

Cuadro 4.2.2.1. Datos históricos de la DBO y los SST en la PTAR

FECHA	DBO			SST		
	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	Eficiencia (%)	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	Eficiencia (%)
01/11/12	316	52	84	125	70	44
20/02/13	204	74	64	371	84	77
29/05/13	336	54	84	115	46	60
28/08/13	274	51	81	380	47	87
05/11/13	332	33	90	227	53	76
05/03/14	187	49	74	242	49	80
Promedio	275	52	80	243	58	70
Desviación estándar	65	13	9	115	15	16

*Los resaltados son los valores que sobrepasan la normativa nacional
Fuente: AyA, 2014

Con base en estos datos, para los cálculos de la evaluación de la planta, se considera que la concentración de la DBO en el afluente y la carga orgánica promedio es:

DBO afluente promedio= 300 mg/L

Carga DBO = 12 kg/día

Si se decidiera calcular la carga orgánica de forma teórica (ecuación 3), tomando que la población de la Urbanización Las Lomas es de 325 habitantes, y un valor normal de la carga orgánica provista por cada habitante de 43 g DBO/hab.día; la carga orgánica teórica sería de 13,97 kg/día, lo cual es bastante cercano al valor real del sistema de tratamiento en estudio.

Por otra parte, la concentración de los SST en el efluente es:

SST efluente promedio= 50 mg/L

En ambos casos, se elige un valor levemente mayor al que, según los datos del cuadro 4.2.2.1, serían los elegidos. Esto se realiza ya que para efectos de una evaluación teórica, es recomendable elegir datos mayores para tener un margen de seguridad.

4.3.EVALUACIÓN DE LA LAGUNA FACULTATIVA ACTUAL

Para la evaluación de la conformación actual de la laguna facultativa, se tomaron los datos detallados en el cuadro 4.3.1.

Cuadro 4.3.1. Datos para realizar la evaluación actual de la laguna facultativa

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal de diseño	40	m ³ /día
	0,46	L/s
Caudal máximo	50	m ³ /día
	0,58	L/s
Área	4273,16	m ²
Profundidad útil	1,65	m
DBO promedio afluente	300	mg/L
SST promedio efluente	50	mg/L
DBO particulada efluente*	22,5	mg/L
Temperatura promedio	24,9**	°C

*Calculada a partir de la ecuación 15

**Temperatura del agua en el mes más frío

Por lo tanto, con estos datos, se aplica la metodología indicada en el apartado 3.4, y los resultados se presentan en el cuadro 4.3.2.

Cuadro 4.3.2. Evaluación de parámetros de diseño para la conformación actual de la laguna facultativa

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR	LITERATURA
Largo/Ancho	adimensional	1,16	2 a 4
Coefficiente de remoción k a 20°C	1/días	0,35	
Coefficiente de remoción k a 24,9°C	1/días	0,52	$\theta = 1,085$ para $k_{20} = 0,35$
Número de dispersión	adimensional	0,83	Mezcla completa
Para Q promedio=40 m ³ /día			
Tiempo de retención	días	176,27	15 a 45
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha.día	28,08	100 a 350
DBO total efluente	mg/L	25,73	<50
% DBO removida	%	91%	
Para Q máximo=50 m ³ /día			
Tiempo de retención	días	141,01	
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha.día	35,10	
DBO total efluente	mg/L	26,52	
% DBO removida	%	91%	

Con la información anterior, se puede observar que en la laguna actual hay varias situaciones por mejorar, estas son:

- **Relación Largo/Ancho:** En la literatura se recomienda que el valor se encuentre entre 2 y 4. Y en este caso está por debajo de este valor. Esto indica que la laguna es muy ancha, lo cual probablemente está causando problemas al favorecer que se produzcan cortos circuitos y la presencia de zonas muertas a lo largo de la laguna. Es recomendable realizar un estudio a fondo para demostrar estas situaciones.
- **Tiempo de retención:** El valor recomendado por la literatura es de 15-45 días. En este caso el valor es casi 10 veces del valor recomendado para las condiciones normales y para el caudal máximo. Este es sin duda alguna uno de los principales problemas que hay que resolver. Al tener un tiempo de retención tan alto, causa que

el agua prácticamente se encuentre estancada, lo cual es el escenario ideal para el crecimiento descontrolado de microalgas.

- **Tasa de aplicación superficial:** El valor recomendado por la literatura es de 100-350 kg DBO/ha/día. En la evaluación de la laguna facultativa se observa que el valor es mucho más bajo, esto en general no produce grandes problemas. Sin embargo, deja en evidencia que el área disponible es demasiado grande para la carga orgánica que recibe, y es por esto que la laguna trabaja subcargada, lo cual provoca problemas de estancamiento y proliferación de microalgas.

Un aspecto importante, es que según estos cálculos, la DBO efluente debería ser de 25,73 mg/L, sin embargo, en la realidad no es así. Como se observa en el cuadro 4.2.2.1, el promedio actual es de 52 mg/L. En este caso, es claro que hay problemas en la laguna como ya se ha mencionado, por lo que jamás podría dar este valor teórico. La experiencia en la operación de lagunas deja ver que los valores teóricos de DBO nunca se apegan a la realidad, ya que siempre aumenta considerablemente, esto porque depende muchísimo de las condiciones ambientales y otros.

Debido a lo anterior, es necesario corregir estos parámetros de diseño, ya que si estas condiciones no se presentan, entonces surgen problemas operacionales, un ineficiente tratamiento del agua residual y baja calidad del efluente.

4.4.PROPOSTA DE DISEÑO PRELIMINAR DE LA LAGUNA FACULTATIVA

Como se mencionó en el apartado anterior, la laguna facultativa actual, tiene un área muy extensa para el caudal y carga que recibe. Por lo tanto, es indispensable conocer cuál es el área real que se requiere, para partir de allí al hacer propuestas de mejora.

Para calcular el área requerida, se tomaron en cuenta los datos del cuadro 4.4.1. Tomando en cuenta estos valores, el área requerida para el tratamiento del agua residual de la Urbanización Las Lomas, se encuentra en el cuadro 4.4.2, según la ecuación 4 (volumen) y el procedimiento detallado en la sección 3.3.3.

Cuadro 4.4.1. Datos para realizar una propuesta de diseño preliminar del área de la laguna

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal promedio diario	40	m ³ /día
	0,46	L/s
Caudal máximo diario	50	m ³ /día
	0,58	L/s
Profundidad útil	1,65	m
DBO promedio afluente	300	mg/L
Temperatura promedio	24,9	°C

Cuadro 4.4.2. Área real requerida para el tratamiento de las aguas residuales de la urbanización Las Lomas

PARÁMETRO	UNIDAD	LAGUNA
Para Q promedio=40 m ³ /día		
Volumen	m ³	957,39
Área	m ²	580,24
Para Q máximo=50 m ³ /día		
Volumen	m ³	1196,74
Área	m ²	725,30

Como puede observarse en el cuadro 4.4.2, el área que realmente se necesita para tratar esta agua residual, es de 725,3 m². Comparado con el área actual, esto deja ver que lo que realmente se ocupa es 1/6 de la laguna construida, lo cual apoya la evaluación que se presentó en el apartado 4.3.

Por lo tanto, las propuestas de mejora que se hacen, están basadas en utilizar el área que realmente se ocupa para el tratamiento de estas aguas residuales, tomando el área calculada en este apartado, para el caso del caudal máximo diario.

4.5. PROPUESTAS DE MEJORA

Como se observa en los apartados anteriores, es indispensable hacer un cambio en la conformación de la laguna actual. Los aspectos por mejorar son: aumentar la relación L/A, disminuir el tiempo de retención y aumentar la tasa de aplicación superficial; y lograr todo esto, al tomar como base un área de 725,3 m².

4.5.1. Detalle preliminar de las estructuras de salida

Uno de los principales cambios que se proponen, es el cambio en las estructuras de salida.

El primer cambio es la colocación de una pantalla, que sobrepase el nivel del agua, y que tenga un espacio en el fondo de la laguna para que el agua pase por allí. La implementación de esta pantalla tiene como objetivo principal que funcione como una barrera, para que el material flotante (como microalgas) no llegue a salir por el efluente (Von Sperling, 1986; Yáñez, 1992).

Por otra parte, además de la colocación de la pantalla, se recomienda que la salida de la laguna sea mediante un canal de concreto con varias entradas del agua, por medio de tees de 150 mm y un nipple para favorecer la entrada del agua, colocadas cada aproximadamente 2 metros, esto con el objetivo de evitar zonas muertas, y que el agua pueda salir lo más uniformemente posible. La cantidad de ellas dependerá de cada propuesta de mejora (Figura 4.5.1.1).

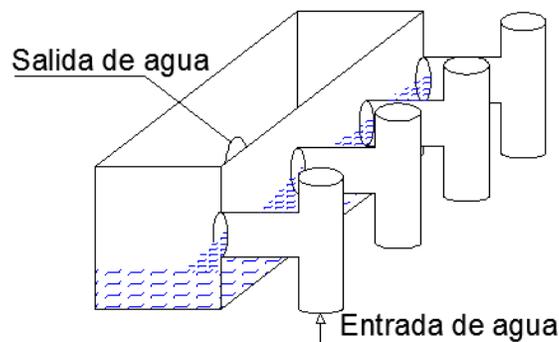


Figura 4.5.1.1. Corte transversal del detalle de la propuesta de las estructuras de salida de cada una de las lagunas facultativas.

Además, el canal de agua, tendrá pendiente hacia el centro, que será donde se coloque la salida del agua y éste tubo de PVC de 200 mm, estará colocado en un nivel más bajo que las tees de entrada del agua.

4.5.2. Propuesta de mejora 1: Dos lagunas en serie (facultativa y de maduración)

Como se mencionó en el apartado 2.5, el uso de lagunas en serie es muy beneficioso para el control de microalgas. Por lo tanto, se propone que se utilice el área requerida de 725,3 m², para construir dos lagunas en serie, la primaria facultativa, y la segunda que sea una laguna de maduración. La conformación de la propuesta 1 se muestra en la figura 4.5.2.1.

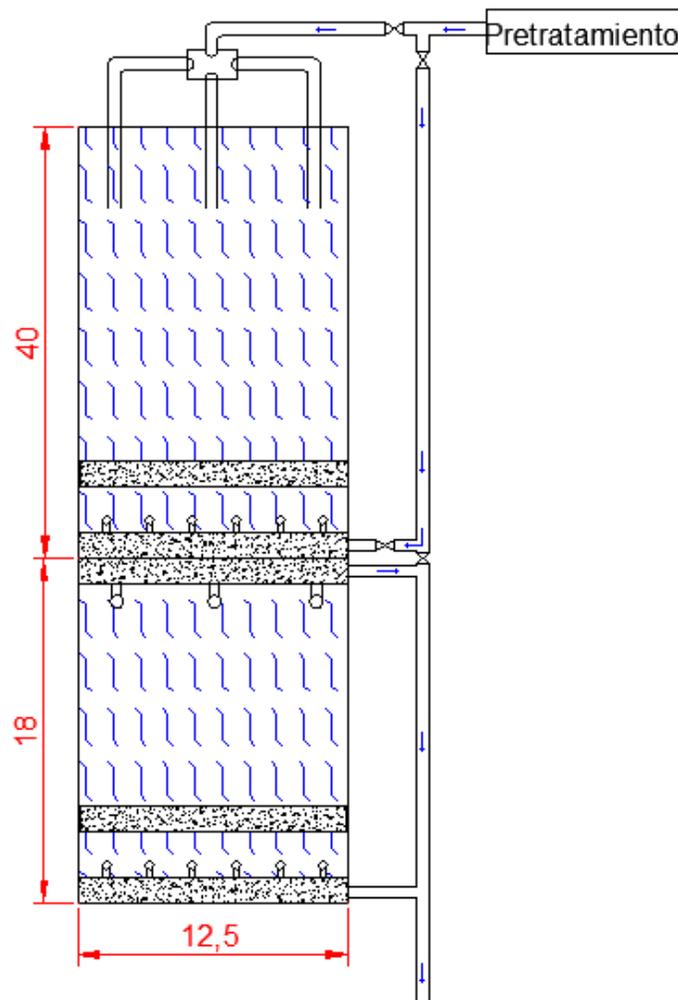


Figura 4.5.2.1. Propuesta de mejora 1: Dos lagunas en serie, facultativa y de maduración

Para la evaluación de ésta propuesta se tomaron los datos del cuadro 4.5.2.1. Además, se siguió la metodología mencionada en el apartado 3.5, y estos resultados se muestran en el cuadro 4.5.2.2.

Cuadro 4.5.2.11. Datos para realizar la evaluación de la propuesta 1: dos lagunas en serie, facultativa y de maduración

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal de diseño	40	m ³ /día
	0,46	L/s
Caudal máximo	50	m ³ /día
	0,58	L/s
Área de la laguna facultativa	500	m ²
Profundidad útil de la laguna facultativa	1,65	m
Área de la laguna de maduración	225,3	m ²
Profundidad útil laguna de maduración	1	m
DBO promedio afluente	300	mg/L
DBO particulada efluente	22,5	mg/L
Temperatura promedio	24,9	°C

Cuadro 4.5.2.2. Evaluación de la propuesta 1: dos lagunas en lagunas en serie, facultativa y de maduración

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR		LITERATURA
		L1	L2	
Largo/Ancho	adimensional	3,20	1,44	L. Facultativa: 2-4 L.Maduración:1-3
Coefficiente de remoción k a 20°C	1/días	0,35	0,30	Para lagunas primarias 0,35, secundarias 0,3
Coefficiente de remoción k a 24,9°C	1/días	0,52	0,44	$k_{20} = 0,35 \rightarrow \theta = 1,085$; $k_{20} = 0,3 \rightarrow \theta = 1,05$
Número de dispersión	adimensional	0,29	0,65	Facultativa: flujo en pistón Maduración: Mezcla completa
Para Q promedio=40 m ³ /día				
Tiempo de retención	días	20,63	5,63	L.Facultativa:15-45 L.Maduración:3-20
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha. día	240,00	182,80	L.Facultativa:100-350 L.Maduración:150-250
DBO total efluente	mg/L	24,21	22,69	<50
% DBO removida	%	92%	6%	Eficiencia final del 92,4%
Para Q máximo=50 m ³ /día				
Tiempo de retención	Días	16,50	4,51	
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha. día	300,00	228,70	
DBO total efluente	mg/L	25,08	22,79	
% DBO removida	%	92%	9%	Eficiencia final del 92,4%

Como puede observarse, esta conformación cumple muy bien con todos los parámetros de diseño, además, muy importante con la DBO de salida.

En este caso, es probable que se acerque a la realidad, ya que se tiene una laguna de maduración, en la cual se espera que se controlen las microalgas que se van a formar en la laguna facultativa. Además, se tiene la ventaja de que se pueda limpiar el lodo de las lagunas sin dejar de realizar el tratamiento.

El presupuesto total aproximado para la implementación de esta propuesta de mejora, considerando los costos directos, indirectos y otros, se mencionan en el cuadro 4.5.2.3.

Cuadro 4.5.2.3. Presupuesto aproximado para la implementación de la propuesta 1.

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario*	Costo Total
COSTOS DIRECTOS				27.642.874,20
TRABAJOS PRELIMINARES				650.615,00
Construcción bodega materiales	1,00	global	455.625,00	455.625,00
Instalaciones provisionales	1,00	global	126.590,00	126.590,00
Trazado y nivelación (Área)	720,00	m ²	95,00	68.400,00
EXTRACCIÓN DE LODOS				7.677.000,00
Extracción, transporte y disposición	511,80	m ³	15.000,00	7.677.000,00
IMPERMEABILIZACIÓN DE LAGUNA				3.245.760,00
Conformación de taludes y superficie	280,80	m ³	1.250,00	351.000,00
Geomembrana HDPE	720,00	m ²	2.040,50	1.469.160,00
Geotextil no tejido	720,00	m ²	671,00	483.120,00
Instalación de geosintéticos	720,00	m ²	1.309,00	942.480,00
CONSTRUCCIÓN MUROS DIVISORIOS				4.970.277,50
Movimiento de tierras	12,95	m ³	5.500,00	71.214,00
Placa de fundación	33,20	m ²	38.680,00	1.284.176,00
Muros de concreto	70,50	m ²	51.275,00	3.614.887,50
OBRAS COMPLEMENTARIAS				2.263.617,50
Canales de recolección	37,50	m	55.145,00	2.067.937,50
Pasarelas de concreto	0,00	m ²	45.260,00	0,00
Barandas metálicas HG 38mm	0,00	m	35.615,00	0,00
Cajas de distribución	1,00	unidad	195.680,00	195.680,00
INSTALACIÓN MECÁNICA				8.926.758,90
Tubería PVC 200mm SDR41	90,30	m	20.875,00	1.885.012,50
Codo 90° PVC 200mm SDR41	1,00	unidad	69.019,00	69.019,00
Tee PVC 200mm SDR41	7,00	unidad	154.382,00	1.080.674,00
Válvula de compuerta 200mm	4,00	unidad	325.000,00	1.300.000,00

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario*	Costo Total
Tubería PVC 150mm SDR41	21,00	m	14.700,00	308.700,00
Codo 90° PVC 150mm SDR41	2,00	unidad	13.381,00	26.762,00
Tee PVC 150mm SDR41	12,00	unidad	15.655,00	187.860,00
Válvula de compuerta 150mm	0,00	unidad	156.980,00	0,00
Accesorios de anclaje	1,00	global	2.429.013,75	2.429.013,75
Mano de obra instalación	1,00	global	1.457.408,25	1.457.408,25
Zanjeo, relleno y compactación	52,09	m ³	3.500,00	182.309,40

RESUMEN FINAL DE COSTOS DE PROYECTO	Costo Total (¢)	Costo Total (\$)
COSTOS DIRECTOS	27.642.874,20	51.960,29
COSTOS INDIRECTOS (14% de CD)*	3.870.002,39	7.274,44
IMPREVISTOS (5% CD + CI)*	1.575.643,83	2.961,74
ADMINISTRACIÓN DE PROYECTO (4 meses)*	4.800.000,00	9.022,56
UTILIDAD DEL CONTRATISTA (12% CD + CI)*	3.781.545,19	7.108,17
MONTO TOTAL	41.670.065,61	78.327,19

*Fuente: (Vargas, 2014)

Tipo de cambio: \$1=¢532

Para el cálculo del costo requerido para la limpieza de la laguna, se toma en cuenta toda el área actual (apéndice 1).

Es importante mencionar que este presupuesto (y los demás que serán presentados) es aproximado, y aunque se intenta que sea lo más apegado a la realidad, no corresponde a un valor exacto, ni a un diseño definitivo.

4.5.3. Propuesta 2: Dos lagunas en serie, la primaria facultativa y la secundaria de macrófitas

En el apartado 2.6.1, se mencionaron las grandes ventajas que presentan las lagunas con macrófitas, ya que representan una disminución muy importante en parámetros como DBO, SST y nutrientes (N y P). Al comparar ambas macrófitas mencionadas, se escoge como mejor opción para la aplicación en este proyecto la *lemna sp*, ya que presenta muy buenas eficiencias, y su mantenimiento y operación es más sencillo que el lirio acuático.

Es por esto que se plantea como propuesta 2 de mejora, la implementación de dos lagunas en serie, la primera una laguna facultativa y la segunda como una laguna de macrófitas.

La conformación de la propuesta 2 se muestra en la figura 4.5.3.1.

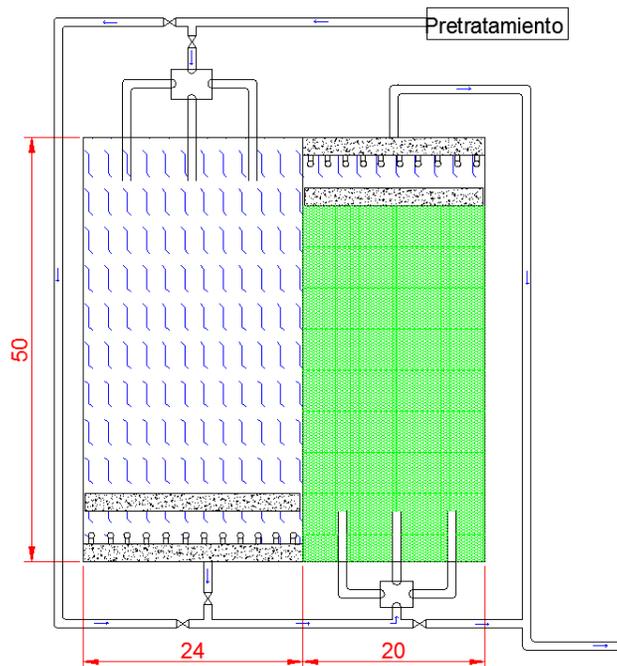


Figura 4.5.3.1. Propuesta de mejora 2: Dos lagunas en serie, facultativa y de macrófitas

Para la evaluación de ésta propuesta se tomaron los datos del cuadro 4.5.3.1. Además, se siguió el procedimiento de la sección 3.5 y estos resultados se muestran en el cuadro 4.5.3.2.

Cuadro 4.5.3.1. Datos para realizar la evaluación de la propuesta 2, dos lagunas en serie, una facultativa y la segunda con *lemna sp.*

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal de diseño	40	m ³ /día
	0,46	L/s
Caudal máximo	50	m ³ /día
	0,58	L/s
Área de la laguna facultativa	1200	m ²
Profundidad útil de la laguna facultativa	1,2	m
Área de la laguna de macrófitas	1000	m ²
Profundidad útil laguna de macrófitas	1,2	m
DBO promedio afluente	300	mg/L
DBO particulada efluente	22,5	mg/L
Temperatura promedio	24,9	°C

Cuadro 4.5.3.2. Evaluación de la propuesta 2, dos lagunas en serie, una facultativa y la otra con *lemna sp.*

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR		LITERATURA
		L1	L2	
Largo/Ancho	adimensional	2,08	2,50	2-4 L. Facultativas 1-3 L. Macrófitas
Coefficiente de remoción k a 20°C	1/días	0,35	0,30	Para lagunas primarias 0,35, secundarias 0,3
Coefficiente de remoción k a 24,9°C	1/días	0,52	0,44	$k_{20} = 0,35 \rightarrow \theta = 1,085$; $k_{20} = 0,3 \rightarrow \theta = 1,05$
Número de dispersión	adimensional	0,45	0,37	Flujo en pistón
Para Q promedio=40 m³/día				
Tiempo de retención	días	36,00	30,00	15-45 L. Facultativas 20-35 L. Macrófitas
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha. día	100,00	75,70	100-350 L. Facultativas <100 L. Macrófitas
DBO total efluente	mg/L	22,89	5,64	L. Macrófitas 75% de eficiencia
% DBO removida	%	92%	75%	Eficiencia final del 98,12%
Para Q máximo=50 m³/día				
Tiempo de retención	Días	28,80	24,00	
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha. día	125,00	94,83	
DBO total efluente	mg/L	23,10	5,64	
% DBO removida	%	92%	76%	Eficiencia final del 98,12%

Es importante mencionar, que el uso de macrófitas en lagunas, requiere valores muy bajos de tasa de aplicación superficial (cuadro 2.6.1.2), y un tiempo de retención en un rango muy estricto (20-25 días), por lo que para lograr cumplir con todos estos parámetros, fue necesario aumentar el área de ambas lagunas y ajustar la profundidad de ambas.

En esta evaluación, pueden observarse resultados muy satisfactorios, ya que se cumple con todos los parámetros de diseño, y además, al utilizar macrófitas como las lentejas de agua, se logra una mejoría notable en la calidad del efluente e incluso de las microalgas que vayan a llegar a la laguna de macrófitas, van a ser tratadas allí, y no saldrán por el efluente.

El presupuesto total aproximado para la implementación de esta propuesta de mejora, se muestra en el cuadro 4.5.3.3.

Cuadro 4.5.3.3. Presupuesto aproximado para la implementación de la propuesta 2

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario*	Costo Total
COSTOS DIRECTOS				43.586.287,60
TRABAJOS PRELIMINARES				791.215,00
Construcción bodega materiales	1,00	global	455.625,00	455.625,00
Instalaciones provisionales	1,00	global	126.590,00	126.590,00
Trazado y nivelación (Área)	2.200,00	m ²	95,00	209.000,00
EXTRACCIÓN DE LODOS				7.677.000,00
Extracción. transporte y disposición	511,80	m ³	15.000,00	7.677.000,00
IMPERMEABILIZACIÓN DE LAGUNA				9.917.600,00
Conformación de taludes y superficie	858,00	m ³	1.250,00	1.072.500,00
Geomembrana HDPE	2.200,00	m ²	2.040,50	4.489.100,00
Geotextil no tejido	2.200,00	m ²	671,00	1.476.200,00
Instalación de geosintéticos	2.200,00	m ²	1.309,00	2.879.800,00
CONSTRUCCIÓN MUROS DIVISORIOS				7.171.370,00
Movimiento de tierras	22,46	m ³	5.500,00	123.552,00
Placa de fundación	57,60	m ²	38.680,00	2.227.968,00
Muros de concreto	94,00	m ²	51.275,00	4.819.850,00
OBRAS COMPLEMENTARIAS				2.817.740,00
Canales de recolección	44,00	m	55.145,00	2.426.380,00
Pasarelas de concreto	0,00	m ²	45.260,00	0,00
Barandas metálicas HG 38mm	0,00	m	35.615,00	0,00
Cajas de distribución	2,00	unidad	195.680,00	391.360,00
INSTALACIÓN MECÁNICA				15.431.919,30
Tubería PVC 200mm SDR41	235,30	m	20.875,00	4.911.887,50
Codo 90° PVC 200mm SDR41	4,00	unidad	69.019,00	276.076,00
Tee PVC 200mm SDR41	4,00	unidad	154.382,00	617.528,00
Válvula de compuerta 200mm	5,00	unidad	325.000,00	1.625.000,00
Tubería PVC 150mm SDR41	34,00	m	14.700,00	499.800,00
Codo 90° PVC 150mm SDR41	4,00	unidad	13.381,00	53.524,00
Tee PVC 150mm SDR41	22,00	unidad	15.655,00	344.410,00
Válvula de compuerta 150mm	0,00	unidad	156.980,00	0,00
Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario*	Costo Total
Accesorios de anclaje	1,00	global	4.164.112,75	4.164.112,75
Mano de obra instalación	1,00	global	2.498.467,65	2.498.467,65
Zanjeo. relleno y compactación	126,03	m ³	3.500,00	441.113,40
RESUMEN FINAL DE COSTOS DE PROYECTO			Costo Total (€)	Costo Total (\$)
COSTOS DIRECTOS			43.586.287,60	81.929,11
COSTOS INDIRECTOS (14% de CD)			6.102.080,26	11.470,08
IMPREVISTOS (5% CD + CI)			2.484.418,39	4.669,96
ADMINISTRACIÓN DE PROYECTO (4 meses)			4.800.000,00	9.022,56
UTILIDAD DEL CONTRATISTA (12% CD + CI)			5.962.604,14	11.207,90
MONTO TOTAL			62.935.390,40	118.299,61

*Fuente: (Vargas, 2014) Tipo de cambio: \$1=€532

La aplicación de esta propuesta es claro que implica una inversión más alta, ya que para lograr la tasa de aplicación superficial necesaria para utilizar lentes de agua es realmente baja, por lo cual se requiere un área mayor. Además, para lograr que en el futuro se pueda realizar la limpieza del lodo del fondo de las lagunas, se proveen los accesorios y tuberías necesarias para que mientras se limpie una laguna, se pueda de igual forma tratar el agua residual.

El uso de esta macrófita y su implementación, se amplía en el apartado 4.6.1.

4.5.4. Propuesta 3: Tres lagunas (dos facultativas en paralelo y una en serie de maduración)

La propuesta 3, consiste en utilizar el área requerida para formar dos lagunas facultativas que trabajen en paralelo y el efluente de ambas va a una laguna de maduración.

La conformación de la propuesta 3 se muestra en la figura 4.5.4.1.

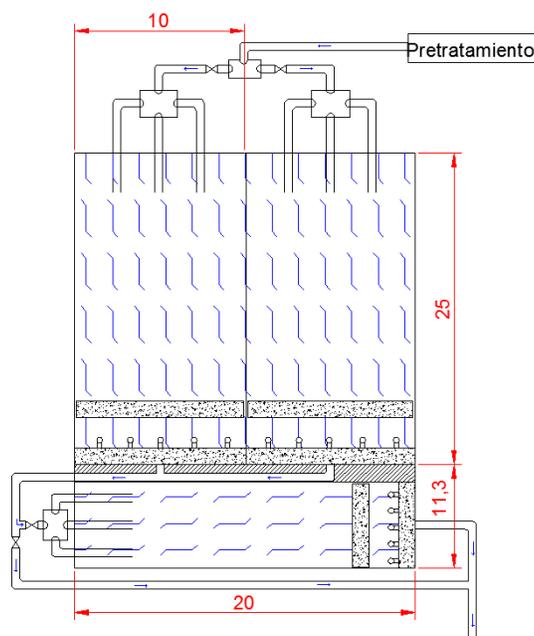


Figura 4.5.4.1. Propuesta de mejora 3: Dos lagunas facultativas en paralelo y una de maduración en serie.

Para la evaluación de ésta propuesta se tomaron los datos del cuadro 4.5.4.1. Además, se siguió la metodología indicada en la sección 3.5 y estos resultados se muestran en el cuadro 4.5.4.2.

Cuadro 4.5.4.1. Datos para realizar la evaluación de la propuesta 3: dos lagunas facultativas en paralelo y una de maduración en serie

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal de diseño	40	m ³ /día
	0,46	L/s
Caudal máximo	50	m ³ /día
	0,58	L/s
Área de las lagunas facultativas	250	m ²
Profundidad útil de las lagunas facultativas	1,65	m ²
Área de la laguna de maduración	225,3	m ²
Profundidad útil de la laguna de maduración	1	m
DBO promedio afluente	300	mg/L
DBO particulada efluente	22,5	mg/L
Temperatura promedio	24,9	°C

Cuadro 4.5.4.2. Evaluación de la propuesta 3: dos lagunas facultativas en paralelo y una de maduración

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR			LITERATURA
		L1	L2	L3	
Largo/Ancho	adimensional	2,50	2,50	1,77	L. Facultativas: 2-4 L. Maduración: 1-3
Coefficiente de remoción k a 20°C	1/días	0,35	0,35	0,30	Para lagunas primarias 0,35, secundarias 0,3
Coefficiente de remoción k a 24,9°C	1/días	0,52	0,52	0,38	$k_{20} = 0,35 \rightarrow \theta = 1,085$; $k_{20} = 0,3 \rightarrow \theta = 1,05$
Número de dispersión	adimensional	0,37	0,37	0,53	Facultativa: flujo en pistón Maduración: Mezcla completa
Para Q promedio=40 m³/día					
Tiempo de retención	días	20,63	20,63	5,63	L. Facultativas: 15-45 L. Maduración: 3-20
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha. día	240,00	240,00	182,80	L. Facultativas: 100-350 L. Maduración: 150-250
DBO Efluente	mg/L	22,51	22,51	36,81	Respectivo régimen hidráulico
% DBO en efluente	%	92%	92%	18%	Eficiencia final del 91,9%
Para Q máximo=50 m³/día					
Tiempo de retención	Días	16,50	16,50	4,51	
Tasa de aplicación superficial	KgDBO/ha. día	300,00	300,00	228,70	
DBO Efluente	mg/L	22,55	22,55	39,10	
% DBO en efluente	%	92%	92%	13%	Eficiencia final del 89,3%

Esta conformación también cumple con todos los parámetros de diseño. De las ventajas que presenta esta propuesta a las anteriores, es que se puede realizar la limpieza de las lagunas, y de igual forma se tendrá un tratamiento primario y secundario, por lo que es probable que incluso así se pueda cumplir bien los parámetros de importancia.

El presupuesto total aproximado para la implementación de esta propuesta de mejora se muestra en el cuadro 4.5.4.3.

Cuadro 4.5.4.3. Presupuesto aproximado para la implementación de la propuesta 3.

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario*	Costo Total
COSTOS DIRECTOS				32.316.786,20
TRABAJOS PRELIMINARES				651.185,00
Construcción bodega materiales	1,00	global	455.625,00	455.625,00
Instalaciones provisionales	1,00	global	126.590,00	126.590,00
Trazado y nivelación	726,00	m ²	95,00	68.970,00
EXTRACCIÓN DE LODOS				7.677.000,00
Extracción, transporte y disposición	511,80	m ³	15.000,00	7.677.000,00
IMPERMEABILIZACIÓN DE LAGUNA				3.272.808,00
Conformación de taludes y superficie	283,14	m ³	1.250,00	353.925,00
Geomembrana HDPE	726,00	m ²	2.040,50	1.481.403,00
Geotextil no tejido	726,00	m ²	671,00	487.146,00
Instalación de geosintéticos	726,00	m ²	1.309,00	950.334,00
CONSTRUCCIÓN MUROS DIVISORIOS				6.521.786,50
Movimiento de tierras	12,68	m ³	5.500,00	69.755,40
Placa de fundación	32,52	m ²	38.680,00	1.257.873,60
Muros de concreto	101,30	m ²	51.275,00	5.194.157,50
OBRAS COMPLEMENTARIAS				4.176.918,50
Canales de recolección	31,30	m	55.145,00	1.726.038,50
Pasarelas de concreto	16,00	m ²	45.260,00	724.160,00
Barandas metálicas HG 38mm	32,00	m	35.615,00	1.139.680,00
Cajas de distribución	3,00	unidad	195.680,00	587.040,00
INSTALACIÓN MECÁNICA				7.075.882,80
Tubería PVC 200mm SDR41	109,00	m	20.875,00	2.275.375,00
Codo 90° PVC 200mm SDR41	3,00	unidad	69.019,00	207.057,00
Tee PVC 200mm SDR41	3,00	unidad	154.382,00	463.146,00
Válvula de compuerta 200mm	4,00	unidad	325.000,00	1.300.000,00
Tubería PVC 150mm SDR41	63,00	m	14.700,00	926.100,00
Codo 90° PVC 150mm SDR41	6,00	unidad	13.381,00	80.286,00
Tee PVC 150mm SDR41	15,00	unidad	15.655,00	234.825,00
Válvula de compuerta 150mm	0,00	unidad	156.980,00	0,00
Accesorios de anclaje	1,00	global	2.743.394,50	2.743.394,50

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario*	Costo Total
Mano de obra instalación	1,00	global	1.646.036,70	1.646.036,70
Zanqueo, relleno y compactación	80,50	m ³	3.500,00	281.736,00

RESUMEN FINAL DE COSTOS DE PROYECTO	Costo Total (€)	Costo Total (\$)
COSTOS DIRECTOS	32.316.786,20	60.745,84
COSTOS INDIRECTOS (14% de CD)	4.524.350,07	8.504,42
IMPREVISTOS (5% CD + CI)	1.842.056,81	3.462,51
ADMINISTRACIÓN DE PROYECTO (4 meses)	4.800.000,00	9.022,56
UTILIDAD DEL CONTRATISTA (12% CD + CI)	4.420.936,35	8.310,03
MONTO TOTAL	47.904.129,43	90.045,36

*(Vargas, 2014)
Tipo de cambio: \$1=€532

En comparación con la propuesta 1 y 2, esta conformación no ocupa tanta instalación mecánica (tuberías y accesorios), pero si requiere más construcción de los muros divisorios y obras complementarias (ya que este se plantea con la posibilidad de construcción de una pasarela entre las primeras lagunas y la segunda, para facilidad de operación y mantenimiento).

4.5.5. Análisis comparativo de las propuestas de mejora

Una vez que se analizaron individualmente las propuestas de mejora, es necesario definir en términos técnicos, ambientales y económicos, cuál es la opción que mejor se adecúa a las circunstancias requeridas y los parámetros de diseño recomendados.

Para esto, se evalúan tres aspectos para cada propuesta de mejora: la posibilidad de limpieza de la laguna con o sin tratamiento, la DBO total esperada en el efluente y el presupuesto necesario para su implementación (se toma como el más importante). La evaluación se muestra en el cuadro 4.5.5.1. Además, el puntaje de los criterios a evaluar se detalla en el cuadro 4.5.5.2.

Cuadro 4.5.5.1. Análisis comparativo de las propuestas de mejora según su mantenimiento, DBO total efluente y el presupuesto requerido para su implementación

Propuesta	Aspecto a evaluar			
	Mantenimiento	DBO total efluente	Presupuesto(x2)	Total
1 (dos lagunas en serie, una facultativa la otra de maduración)	2	2	6	10
2 (dos lagunas en serie, una facultativa la otra de macrófitas)	2	4	2	8
3 (tres lagunas, dos facultativas en paralelo, una de maduración en serie)	3	2	4	9

*El de mayor valor es el más recomendable

Cuadro 4.5.5.2. Calificación para el análisis comparativo entre las propuestas de mejora

Aspecto	Detalle	Calificación
Mantenimiento	Limpieza del lodo, manteniendo un tratamiento primario y secundario	3
	Limpieza del lodo, sólo con tratamiento primario	2
	Limpieza del lodo, sin ningún tratamiento	1
DBO total efluente	Muy bajo (5-10 mg/L)	4
	Bajo (10-20 mg/L)	3
	Medio (20-30 mg/L)	2
	Alto (>30 mg/L)	1
Presupuesto	Moderado (\$70.000-80.000)	3
	Alto (\$80.000-90.000)	2
	Muy alto (>\$100.000)	1

Por lo tanto, con este análisis, se determina que la mejor opción desde estos puntos de vista es la implementación de la propuesta de mejora 1: dos lagunas en serie (facultativa y de maduración). Esto se toma así ya que al parámetro que más importancia se le dio fue al económico, y por lo tanto, este es el de menor inversión. El presupuesto se le da mayor importancia, ya que por ser un proyecto del estado, generalmente el aspecto económico es el único parámetro al que le dan importancia. Sin embargo, la opción que se recomienda como la ideal, es la propuesta 2, que es el uso de macrófitas como herramienta muy

eficiente de pulido del efluente, en éste análisis no da como la mejor, ya que su inversión es mucho mayor (porque el área es mayor), pero los resultados se verán a largo plazo y en un muy eficiente tratamiento de las aguas residuales.

4.6.PROPUUESTAS DE PULIDO

Las lagunas facultativas, son sistemas eficientes para el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, en su operación hay dos situaciones a tomar en cuenta: la presencia de microalgas en el efluente, y la vulnerabilidad a las condiciones climáticas. Es por esto, que se recomiendan algunas propuestas de pulido, para evitar lo más posible que estas condiciones afecten la calidad del efluente.

4.6.1. Macrófitas flotantes: Lentejas de agua

El uso de macrófitas flotantes provee buenos resultados en la remoción de nutrientes y para mejorar la calidad del efluente. Se recomienda el uso de las Lentejas de agua sobre el Jacinto de agua, porque, inicialmente el crecimiento de la lenteja de agua es más rápido. Además, tiene una mejor eficiencia en remoción de DBO (50-95%). Y por último porque operativamente, el Jacinto de agua por ser de mayor tamaño, es difícil de remover del agua, y es más compleja su disposición final.

La propuesta de mejora 2, involucra la implementación de una laguna secundaria como laguna de macrófitas, con el uso de *lemna sp.* Para lograrlo, debe seguirse el siguiente procedimiento:

- a. Para evitar el movimiento de la biomasa de la lenteja de agua con el viento, es necesaria la instalación de compartimientos superficiales en la laguna donde será sembrada, los cuales pueden corresponder a una red de bambú, PVC u otros, con cuadrículas de 2-5 m por 4-8 m (Iqbal, 1999).
- b. Debe emplearse como inóculo inicial, 200 g biomasa fresca/m² (Ly, 2005). Dado que el área de la laguna de macrófitas es de 1000 m², se requiere emplear 200 Kg de biomasa fresca de lentejas de agua, como inóculo en total para esta laguna.
- c. Es recomendable que se coseche *lemna sp.* cada dos días. Debido a que la biomasa se duplica cada 4 días, debe extraerse un aproximado de 100 kg de biomasa de la

planta cada 2 días. Esto puede realizarse manualmente, con botes, redes u otros. La cosecha y recolección regular de la lenteja de agua asegura que los nutrientes y contaminantes realmente lleguen a ser eliminados del sistema. Además, como las plantas más jóvenes muestran mayor remoción de nutrientes y mayor tasa de crecimiento, una cosecha regular va a mantener un cultivo sano y productivo (Iqbal, 1999).

- d. La biomasa de las lentejas de agua, puede utilizarse para nutrición de animales y peces (Rodríguez *et al*, 1996; Martelo y Lara, 2012). También puede aplicarse directamente en el suelo o utilizarse en procesos de compostaje (Iqbal, 1999). Se deberán disponer 350 Kg de biomasa de lenteja de agua por semana.
- e. Deben planificarse limpiezas del lodo acumulado en el fondo de la laguna con macrófitas, de la misma forma que se haría con una laguna facultativa convencional.

4.6.2. Ondas ultrasónicas

La tecnología de ondas ultrasónicas, es una opción muy viable, ya que requiere muy poca operación y mantenimiento, aunque su costo inicial es muy alto.

Para la implementación de esta tecnología, se puede instalar en la laguna primaria de la propuesta 1 (dos en serie, facultativa y de maduración), con el fin de lograr tener un crecimiento controlado de las microalgas. Se recomienda que se coloque en el inicio de la laguna, y se instale con las ondas ultrasónicas en dirección a la salida del agua, con el fin de que abarque toda la laguna. Se recomienda de esta forma, ya que el viento favorece la expansión de las ondas (Figura 4.6.2.1).

El equipo de ultrasonido recomendable para la laguna, se detalla en el anexo 2. En el apéndice 4, su costo aproximado y la instalación para la laguna.

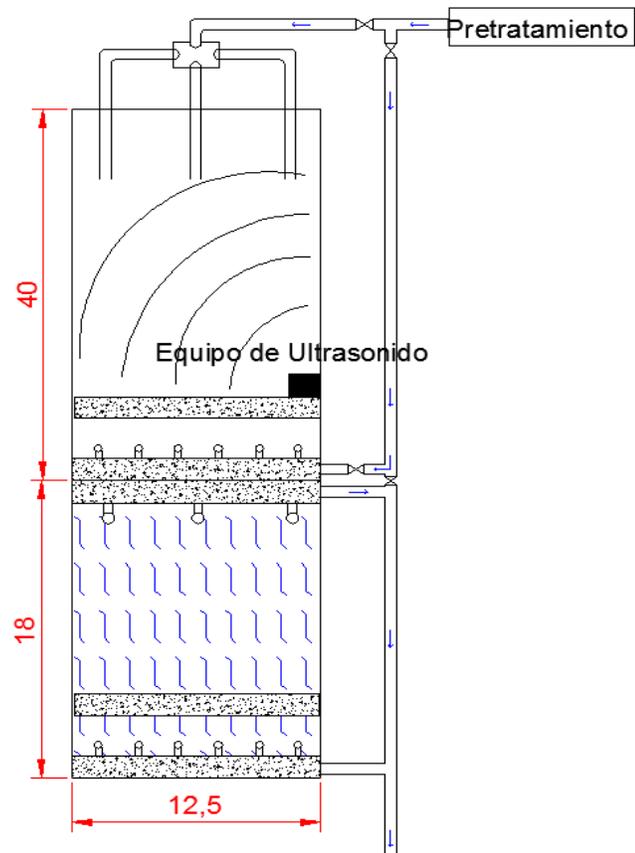


Figura 4.6.2.1. Ubicación del equipo de ultrasonido en la laguna primaria de la propuesta 1

5. CONCLUSIONES

- Según los aforos realizados el caudal promedio diario de la laguna facultativa es de 40 m³/día. Además el caudal máximo diario es de 50 m³/día. Estos valores se apegan a lo mencionado en la literatura y al caudal teórico de diseño (39 m³/día).
- Según los resultados de los análisis históricos del sistema, la carga orgánica promedio entrante a la laguna facultativa actual es de 300 mgDBO/L. Además, el valor de los SST promedio efluente, es de 50 mg/L. Ambos valores son normales según la literatura de agua residual ordinaria.
- La laguna facultativa actual es demasiado grande para los parámetros de caudal y carga orgánica que recibe, el área requerida para un buen tratamiento (tomando el caudal máximo diario) es de 725,3 m², esto representa casi 1/6 del área actual. Esto podría explicar la sobreproducción de microalgas y la baja calidad del efluente.
- La conformación actual de una sola laguna facultativa no cumple con los parámetros de diseño, principalmente: relación L/A, tiempo de retención y tasa de aplicación superficial, por lo tanto es un sistema totalmente ineficiente en lo que respecta a cumplimiento de la legislación, principalmente DBO, DQO y SST.
- Al evaluar algunas de todas las posibles remodelaciones a la planta, la propuesta que mejor resultados en términos técnicos, ambientales y económicos es la propuesta 1, de construir dos lagunas en serie, una facultativa y la otra de maduración.
- Por otra parte, la propuesta 3, compuesta por una laguna facultativa seguida en serie por una laguna con *lemna sp.*, es con la que se obtiene una mejor calidad en el efluente.
- La inversión total aproximada para la implementación de la propuesta de mejora 2 es de \$78.500,00; la propuesta de mejora 3 de \$111.000,00 y la propuesta de mejora 4 de \$89.000,00. Por lo que, tomando la inversión inicial como parámetro más importante en la implementación de las propuestas de mejora, la opción 1 es la mejor, seguida por la propuesta 3 y por último la 2.

6. RECOMENDACIONES

- Es indispensable realizar los cambios a la laguna facultativa actual, ya que el sistema no cumple con los parámetros de diseño, lo que provoca una producción de natas de microalgas y que en ocasiones no llega a cumplir con la normativa nacional.
- La propuesta que más se recomienda es la de dos lagunas en serie, una facultativa y la otra de macrófitas; ya que es la que posee una mejor eficiencia en remoción de parámetros.
- Mediante los análisis correspondientes, sería muy valioso determinar las especies de microalgas que predominan en el sistema lagunar actual, ya que con esta información, se puede saber el comportamiento biológico del agua, y así comparar con los datos calculados.
- Se podría ampliar el estudio con otro proyecto, que valore otras opciones de implementación que sean complementarias a la laguna como: Reactor UASB o un humedal.
- El estudio podría ampliarse en lo que respecta a opciones de pulido con técnicas como: filtros de arena intermitentes, filtros de roca, sistemas por flotación disuelto (DAF), pulgas de agua, precipitación química u otros más, mencionados en la literatura.
- Se recomienda continuar el estudio enfocado a la parte económica y de costos, para conocer aspectos como el tiempo de recuperación de la inversión, e incluso para estudiar a fondo la posibilidad de aumentar el caudal y la carga orgánica entrante, y así aprovechar más el espacio.
- En caso de implementar la tecnología del equipo de ultrasonido, es importante tomar en cuenta que, aunque el fabricante indica que no se esperaría una acumulación excesiva de lodos en el fondo de la laguna debido a la sedimentación de las microalgas, deberían realizarse pruebas de velocidad de sedimentación, para planificar adecuadamente la necesidad de limpieza del lodo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bellinger, E., & Sigeo, D. (2010). *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators*. Manchester: Wiley-Blackwell.
- Comisión Nacional de Agua. (Diciembre de 2007). *Comisión Nacional de Agua*. Recuperado el 7 de Mayo de 2014, de Manual de Agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de lagunas de estabilización: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf>
- Contraloría General de la República. (15 de Febrero de 2013). Informe acerca de la eficacia del estado para garantizar la calidad del agua en sus diferentes usos. San José, Costa Rica: Informe Nro. DFOE-AE-IF-01-2013.
- Crites, R., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Crites, R., Middlebrooks, E., & Reed, S. (2005). Pond modifications for polishing effluents. En R. Crites, E. Middlebrooks, & S. Reed, *Natural Wastewater treatment systems* (págs. 211-238). Florida: CRC Press.
- Cruz, L., Alayón, W., & Monsegny, C. (2000). Metodología Para la Selección del Regimen de Flujo en Lagunas de Estabilización. *Revista Ingeniería e Investigación No. 46 Agosto de 2000*, 14-19.
- Cubillos, A. (2001). Estado del arte en el diseño de lagunas de estabilización. *Ingeniería y competitividad*, 3(2), 80-91. Recuperado el 29 de Abril de 2014, de <http://revistaingenieria.univalle.edu.co:8000/index.php/incompe/article/view/45>
- EPA. (Octubre de 1983). *Desing Manual: Municipal Wastewater stabilization ponds*. Obtenido de Center for Environmental Research Information: <http://yosemite.epa.gov/water/owrcatalog.nsf/065ca07e299b464685256ce50075c11a/83ab49d69434857185256b06007233c2!OpenDocument>

- EPA. (Setiembre de 1988). *Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. Recuperado el 20 de Febrero de 2013, de Center for Environmental Research Information: <http://water.epa.gov/type/wetlands/upload/design.pdf>
- Greyline. (s.f.). *Greyline*. Recuperado el 7 de Mayo de 2014, de Portable Level-Velocity Logger: <http://www.greyline.com/stingray.htm>
- Hygnstrom, J., Skipton, S., & Woldt, W. (Marzo de 2010). *Residential Onsite Wastewater Treatment: Lagoon Design and Construction*. Recuperado el 5 de Mayo de 2014, de Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska–Lincoln: <http://www.ianrpubs.unl.edu/epublic/live/g1441/build/#target6>
- Iqbal, S. (1999). Duckweed Aquaculture: Potentials, Possibilities and Limitations for Combined Wastewater Treatment and Animal Feed Production in Developing Countries. *SANDEC, Report No.6*, 91. Recuperado el 20 de Febrero de 2014, de <http://www.protilemna.com/docs/Duckweed%20Aquaculture%20Potential%20Possibilities%20and%20Limitations%20SANDEC.PDF>
- Kothandaraman, V., & Evans, R. (1972). *Removal of algae from Waste Stabilization Pond Effluents - A state of art*. Illinois: Departamento de Registro y Educación.
- LG SOUND. (2013). *¿Cómo funciona la tecnología LG Sonic?* Recuperado el 7 de Marzo de 2013, de LG Sonic: www.lgsonic.com
- Ly, J. (2005). *Macrófitas flotantes en sistemas integrados de producción animal*. Recuperado el 5 de Agosto de 2014, de Instituto de Investigaciones Porcinas: http://www.avpa.ula.ve/eventos/viii_encuentro_monogastricos/curso_alimentacion_no_convencional/conferencia-8.pdf
- Lynch, W. (2009). *Controlling Filamentous Algae in Ponds*. Obtenido de The Ohio State University: Agriculture and Natural Resources : http://ohioline.osu.edu/a-fact/pdf/A_3_09.pdf

- Martelo, J., & Lara, J. (Enero-Junio de 2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales, una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221-243. Recuperado el 19 de Febrero de 2014, de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/946>
- Medina, M., Gutzeit, G., & Neis, U. (s.f.). Biomasa bacterio-algal: Una alternativa para el mejoramiento de sistemas naturales de tratamiento de agua. *Seminario Internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales*, 247-250.
- Metcalf, & Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill.
- Oakley, S. (2011). Lagunas de Estabilización. En B. Henry, J. Monge, J. Moscoso, S. Oakley, L. Salguero, & P. Saravia, *Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica: Un manual de experiencias, diseño, operación y sostenibilidad* (págs. 82-229). Recuperado el 7 de Mayo de 2014, de <http://www.drh.go.cr/textos/documentos/ca.final.06.06.11.pdf>
- Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización*. Recuperado el 5 de Mayo de 2014, de Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente : <http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/sanea/163esp-diseno-TI.pdf>
- Pearson, H. (2005). Microbiology of waste stabilization ponds. En A. Shilton, *Pond Treatment Technology. Integrated environmental technology series* (págs. 26, 27). London: IWA Publishing.
- Pearson, H., Mara, D., & Arridge, H. (1995). The influence of pond geometry and configuration on facultative and maturation waste stabilisation pond performance and efficiency (Abstract). *Water, Science and Technology*, 31(12) 129-139.

- Pearson, H., Mara, D., Mills, S., & Smallman, D. (1987). Factors Determining Algal Populations in Waste Stabilization Ponds and the Influence of Algae on Pond Performance. *Water Science and Technology*, 19(12) 131-140.
- Rodríguez, C., Díaz, M., Guerra, L., & Hernández, J. (1996). Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. Páginas 1-5.
- Sans, R., & De Pablo, J. (1989). *Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos*. Barcelona: Marcombo.
- Silva, J. (2004). *Evaluación y rediseño del Sistema de lagunas de estabilización de la universidad de piura*. (Tesis para optar por el título de Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Piura). Recuperado de <http://pirhua.udep.edu.pe/handle/123456789/1189>.
- Sonic Solutions. (2009). *Guía de consulta rápida*. Recuperado el 10 de Marzo de 2013, de Sonic Solutions: <http://www.sonicsolutionsllc.com/>
- Stumm, W., & Morgan, J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. Michigan: Wiley.
- Torres, A., Camberato, D., & López, R. (2011). El Control de algas en las lagunas de riego. *Purdue Extension*. Recuperado el 1 de Marzo de 2014, de <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-247-S-W.pdf>
- Universidad Complutense de Madrid. (s.f.). *Biodiversidad y Taxonomía de plantas Criptógamas*. Recuperado el 23 de Marzo de 2013, de Euglenophyta: http://linneo.bio.ucm.es/plantas_criptogamas/materiales/algas/euglenophyta.html
- University of Florida. (2014). *UF/IFAS Center for Aquatic and Invasive Plants*. Recuperado el 16 de Julio de 2014, de University of Florida: <http://plants.ifas.ufl.edu/>
- Vargas, J. D. (7 de Julio de 2014). Costos de obra gris y acabados para las propuestas de mejora. (S. Jiménez, Entrevistador)

Von Sperling, M. (1986). *Lagoas de estabilização*. Belo Horizonte: Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Federal de Minas Gerais.

Von Sperling, M., & Chernicharo, C. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions*. Londres: IWA Publishing.

Yáñez, F. (1980). *Evaluation of the San Juan stabilization ponds: Final research report of the first phase*. Perú: Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences.

Yáñez, F. (1992). *Lagunas de estabilización: Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento*. Ecuador: Ministerio de Salud Pública.

APÉNDICES

APÉNDICE 1. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE LODO DEL FONDO DE LA LAGUNA

Para realizar los presupuestos de las propuestas de mejora, era necesario conocer la cantidad de lodo que debe ser removido para poder realizar la limpieza e impermeabilización.

En el año 2011, funcionarios del AyA, realizaron una batimetría para conocer la cantidad de lodo acumulado en el fondo de la misma. En este momento, el promedio en la laguna era de 0,1 m de lodo. Por lo que el volumen de lodo acumulado para el año 2011 era de:

$$\text{Volumen de lodo (m}^3\text{)} = 4273,16 \text{ m}^2 * 0,1 \text{ m} = 427,32 \text{ m}^3$$

Para calcular los restantes 3 años (2011-2014), se utiliza la proporción dada por la literatura. La literatura menciona que el lodo se acumula en una proporción de 0,08 m³/hab.año. Los habitantes que hay en la Urbanización de las Lomas, son 352 habitantes, y se necesita saber la acumulación de lodo en 3 años, por lo tanto el lodo acumulado es:

$$\text{Lodo acumulado} = 325 \text{ habitantes} * 3 \text{ años} * \frac{0,08 \text{ m}^3}{\text{hab. año}} = 84,48 \text{ m}^3$$

Con ambos datos de lodo acumulado, el total al año 2014 será:

$$427,32 + 84,48 = 511,8 \text{ m}^3$$

APÉNDICE 2. CAUDAL PROMEDIO DIARIO DE LA LAGUNA FACULTATIVA

Cuadro A.2.1. Cantidad de metros cúbicos que entro por día a la laguna facultativa entre el 14 de Mayo al 2 de Junio del 2014

Día	Promedio (m³/día)
14/05/2014	46,95
15/05/2014	41,82
16/05/2014	34,79
17/05/2014	35,79
18/05/2014	35,68
19/05/2014	36,76
20/05/2014	39,65
21/05/2014	31,97
22/05/2014	31,28
23/05/2014	35,65
24/05/2014	29,07
25/05/2014	35,42
26/05/2014	35,67
27/05/2014	29,97
28/05/2014	49,57
29/05/2014	47,14
30/05/2014	38,90
31/05/2014	40,01
01/06/2014	39,58
02/06/2014	38,39
Promedio	37,70

*Los valores **resaltados** corresponden al mínimo, máximo y promedio

APÉNDICE 3. PROCEDIMIENTO PARA EL CAUDAL PROMEDIO DIARIO DE LA LAGUNA FACULTATIVA

Para la determinación del caudal promedio diario, debe conocerse la cantidad de metros cúbicos que entraron en la laguna en un día, por varios días, para luego promediar esta cantidad de agua que entro y así conocer el caudal promedio diario.

El Cuadro A.3.1, muestra solamente los datos de caudal instantáneo tomados cada 5 minutos del 14 de Mayo del 2014, sin embargo para la determinación del caudal promedio diario, se tomaron los mismos datos, y se realizó el mismo procedimiento, hasta el 2 de Junio del 2014. Con estos datos de los metros cúbicos por día que entraron a la laguna, para todos estos días, fue que se realizó el cuadro del apéndice 2 y el gráfico de la figura 4.2.1.1.

Cuadro A.3.1. Datos de 24 horas de caudal instantáneo de la laguna facultativa actual

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio	m³ en 5 min	m³/día
14/05/2014 07:21	1,57	0,95	0,29	46,95
14/05/2014 07:26	0,33	0,93	0,28	
14/05/2014 07:31	1,53	1,52	0,46	
14/05/2014 07:36	1,51	1,14	0,34	
14/05/2014 07:41	0,78	1,19	0,36	
14/05/2014 07:46	1,59	0,98	0,29	
14/05/2014 07:51	0,37	0,35	0,11	
14/05/2014 07:56	0,34	0,94	0,28	
14/05/2014 08:01	1,54	1,15	0,35	
14/05/2014 08:06	0,76	0,85	0,26	
14/05/2014 08:11	0,95	0,69	0,21	
14/05/2014 08:16	0,43	1,32	0,39	
14/05/2014 08:21	2,21	1,42	0,43	
14/05/2014 08:26	0,64	0,79	0,24	
14/05/2014 08:31	0,95	0,72	0,21	
14/05/2014 08:36	0,48	0,46	0,14	
14/05/2014 08:41	0,44	0,51	0,15	
14/05/2014 08:46	0,58	1,12	0,34	
14/05/2014 08:51	1,67	0,98	0,30	
14/05/2014 08:56	0,30	0,38	0,11	
14/05/2014 09:01	0,45	0,94	0,28	
14/05/2014 09:06	1,43	1,03	0,31	
14/05/2014 09:11	0,64	0,84	0,25	

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio	m³ en 5 min	m³/día
14/05/2014 09:16	1,04	0,77	0,23	
14/05/2014 09:21	0,49	0,52	0,16	
14/05/2014 09:26	0,55	0,51	0,15	
14/05/2014 09:31	0,46	0,88	0,26	
14/05/2014 09:36	1,29	0,92	0,28	
14/05/2014 09:41	0,55	0,54	0,16	
14/05/2014 09:46	0,53	0,62	0,19	
14/05/2014 09:51	0,72	0,76	0,23	
14/05/2014 09:56	0,81	0,83	0,25	
14/05/2014 10:01	0,85	0,84	0,25	
14/05/2014 10:06	0,83	0,70	0,21	
14/05/2014 10:11	0,58	0,54	0,16	
14/05/2014 10:16	0,54	0,77	0,23	
14/05/2014 10:21	0,50	0,75	0,22	
14/05/2014 10:26	0,99	0,79	0,24	
14/05/2014 10:31	0,60	0,52	0,16	
14/05/2014 10:36	0,44	0,50	0,15	
14/05/2014 10:41	0,55	0,56	0,17	
14/05/2014 10:46	0,57	0,63	0,19	
14/05/2014 10:51	0,70	0,59	0,18	
14/05/2014 10:56	0,49	0,62	0,19	
14/05/2014 11:01	0,75	0,72	0,22	
14/05/2014 11:06	0,70	0,61	0,18	
14/05/2014 11:11	0,53	0,89	0,27	
14/05/2014 11:16	1,26	1,26	0,38	
14/05/2014 11:21	1,25	0,96	0,29	
14/05/2014 11:26	0,68	0,74	0,22	
14/05/2014 11:31	0,80	0,73	0,22	
14/05/2014 11:36	0,67	0,84	0,25	
14/05/2014 11:41	1,01	1,12	0,34	
14/05/2014 11:46	1,24	1,22	0,37	
14/05/2014 11:51	1,21	0,93	0,28	
14/05/2014 11:56	0,65	0,67	0,20	
14/05/2014 12:01	0,70	0,77	0,23	
14/05/2014 12:06	0,85	0,85	0,25	
14/05/2014 12:11	0,85	1,03	0,31	
14/05/2014 12:16	1,21	1,05	0,32	
14/05/2014 12:21	0,90	0,88	0,26	
14/05/2014 12:26	0,86	0,83	0,25	

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio m³ en 5 min	m³/día
14/05/2014 12:31	0,80	0,58	0,18
14/05/2014 12:36	0,37	0,44	0,13
14/05/2014 12:41	0,50	0,58	0,18
14/05/2014 12:46	0,67	0,62	0,19
14/05/2014 12:51	0,58	0,49	0,15
14/05/2014 12:56	0,39	0,34	0,10
14/05/2014 13:01	0,29	0,37	0,11
14/05/2014 13:06	0,44	0,39	0,12
14/05/2014 13:11	0,34	0,29	0,09
14/05/2014 13:16	0,25	0,34	0,10
14/05/2014 13:21	0,43	0,41	0,12
14/05/2014 13:26	0,40	0,41	0,12
14/05/2014 13:31	0,43	0,45	0,13
14/05/2014 13:36	0,46	0,64	0,19
14/05/2014 13:41	0,82	0,63	0,19
14/05/2014 13:46	0,44	0,38	0,11
14/05/2014 13:51	0,33	0,30	0,09
14/05/2014 13:56	0,26	0,40	0,12
14/05/2014 14:01	0,53	0,51	0,15
14/05/2014 14:06	0,49	0,56	0,17
14/05/2014 14:11	0,64	0,58	0,17
14/05/2014 14:16	0,53	0,53	0,16
14/05/2014 14:21	0,53	0,55	0,16
14/05/2014 14:26	0,57	0,55	0,16
14/05/2014 14:31	0,53	0,51	0,15
14/05/2014 14:36	0,49	0,54	0,16
14/05/2014 14:41	0,58	0,50	0,15
14/05/2014 14:46	0,42	0,38	0,11
14/05/2014 14:51	0,33	0,39	0,12
14/05/2014 14:56	0,45	0,51	0,15
14/05/2014 15:01	0,57	0,47	0,14
14/05/2014 15:06	0,37	0,37	0,11
14/05/2014 15:11	0,37	0,54	0,16
14/05/2014 15:16	0,71	0,52	0,16
14/05/2014 15:21	0,33	0,30	0,09
14/05/2014 15:26	0,26	0,29	0,09
14/05/2014 15:31	0,32	0,41	0,12
14/05/2014 15:36	0,50	0,57	0,17
14/05/2014 15:41	0,64	0,62	0,19
14/05/2014 15:46	0,61	0,57	0,17

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio m³ en 5 min	m³/día
14/05/2014 15:51	0,54	0,50	0,15
14/05/2014 15:56	0,47	0,58	0,17
14/05/2014 16:01	0,69	0,49	0,15
14/05/2014 16:06	0,29	0,32	0,10
14/05/2014 16:11	0,35	0,27	0,08
14/05/2014 16:16	0,20	0,22	0,07
14/05/2014 16:21	0,24	0,51	0,15
14/05/2014 16:26	0,78	0,66	0,20
14/05/2014 16:31	0,55	0,72	0,21
14/05/2014 16:36	0,88	0,95	0,29
14/05/2014 16:41	1,03	1,00	0,30
14/05/2014 16:46	0,97	1,02	0,31
14/05/2014 16:51	1,07	1,00	0,30
14/05/2014 16:56	0,93	1,08	0,32
14/05/2014 17:01	1,22	0,95	0,29
14/05/2014 17:06	0,68	1,04	0,31
14/05/2014 17:11	1,41	1,57	0,47
14/05/2014 17:16	1,72	1,71	0,51
14/05/2014 17:21	1,71	1,71	0,51
14/05/2014 17:26	1,71	2,80	0,84
14/05/2014 17:31	0,38	2,13	0,64
14/05/2014 17:36	0,26	1,63	0,49
14/05/2014 17:41	1,68	2,23	0,67
14/05/2014 17:46	1,10	1,84	0,55
14/05/2014 17:51	0,82	1,42	0,42
14/05/2014 17:56	0,75	1,09	0,33
14/05/2014 18:01	0,73	1,08	0,32
14/05/2014 18:06	2,31	1,84	0,55
14/05/2014 18:11	3,89	2,68	0,80
14/05/2014 18:16	3,88	2,52	0,76
14/05/2014 18:21	3,00	2,57	0,77
14/05/2014 18:26	2,79	1,98	0,59
14/05/2014 18:36	2,58	2,34	0,70
14/05/2014 18:41	2,01	1,51	0,45
14/05/2014 18:41	1,44	1,50	0,45
14/05/2014 18:46	1,42	1,35	0,41
14/05/2014 18:51	1,37	1,87	0,56
14/05/2014 18:56	1,47	1,34	0,40
14/05/2014 19:01	1,16	0,93	0,28
14/05/2014 19:06	2,13	1,41	0,42

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio m³ en 5 min	m³/día
14/05/2014 19:11	1,17	0,78	0,23
14/05/2014 19:16	2,11	1,28	0,38
14/05/2014 19:21	1,00	0,70	0,21
14/05/2014 19:26	1,56	1,02	0,31
14/05/2014 19:31	1,28	0,83	0,25
14/05/2014 19:36	2,36	1,33	0,40
14/05/2014 19:41	1,21	0,75	0,23
14/05/2014 19:46	0,70	0,48	0,14
14/05/2014 19:51	0,70	0,49	0,15
14/05/2014 19:56	0,38	0,36	0,11
14/05/2014 20:01	0,46	0,43	0,13
14/05/2014 20:06	0,39	0,37	0,11
14/05/2014 20:11	0,48	0,24	0,07
14/05/2014 20:16	0,37	0,37	0,11
14/05/2014 20:21	0,29	0,36	0,11
14/05/2014 20:26	0,30	0,29	0,09
14/05/2014 20:31	0,26	0,27	0,08
14/05/2014 20:36	0,28	0,32	0,10
14/05/2014 20:41	0,34	0,30	0,09
14/05/2014 20:46	0,41	0,40	0,12
14/05/2014 20:51	0,34	0,36	0,11
14/05/2014 20:56	0,00	0,14	0,04
14/05/2014 21:01	0,38	0,32	0,10
14/05/2014 21:06	0,43	0,35	0,10
14/05/2014 21:11	0,27	0,22	0,07
14/05/2014 21:16	0,28	0,23	0,07
14/05/2014 21:21	0,35	0,31	0,09
14/05/2014 21:26	0,27	0,32	0,09
14/05/2014 21:31	0,39	0,25	0,07
14/05/2014 21:36	0,37	0,24	0,07
14/05/2014 21:41	0,28	0,20	0,06
14/05/2014 21:46	0,26	0,17	0,05
14/05/2014 21:51	0,26	0,20	0,06
14/05/2014 21:56	0,18	0,09	0,03
14/05/2014 22:01	0,19	0,09	0,03
14/05/2014 22:06	0,26	0,13	0,04
14/05/2014 22:11	0,36	0,18	0,05
14/05/2014 22:16	0,10	0,05	0,02
14/05/2014 22:21	0,12	0,06	0,02
14/05/2014 22:26	0,11	0,06	0,02

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio m³ en 5 min	m³/día
14/05/2014 22:31	0,08	0,04	0,01
14/05/2014 22:36	0,14	0,07	0,02
14/05/2014 22:41	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 22:46	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 22:51	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 22:56	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:01	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:06	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:11	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:16	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:21	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:26	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:31	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:36	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:41	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:46	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:51	0,00	0,00	0,00
14/05/2014 23:56	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:01	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:06	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:11	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:16	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:21	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:26	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:31	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:36	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:41	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:46	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:51	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 00:56	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:01	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:06	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:11	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:16	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:21	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:26	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:31	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:36	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:41	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:46	0,00	0,00	0,00

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio m³ en 5 min	m³/día
15/05/2014 01:51	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 01:56	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:01	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:06	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:11	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:16	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:21	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:26	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:31	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:36	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:41	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:46	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:51	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 02:56	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:01	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:06	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:11	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:16	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:21	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:26	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:31	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:36	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:41	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:46	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:51	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 03:56	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 04:01	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 04:06	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 04:11	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 04:16	0,00	0,00	0,00
15/05/2014 04:21	0,00	0,10	0,03
15/05/2014 04:26	0,00	0,12	0,04
15/05/2014 04:31	0,00	0,16	0,05
15/05/2014 04:36	0,00	0,14	0,04
15/05/2014 04:41	0,00	0,12	0,04
15/05/2014 04:46	0,00	0,27	0,08
15/05/2014 04:51	0,00	0,25	0,08
15/05/2014 04:56	0,00	0,13	0,04
15/05/2014 05:01	0,00	0,17	0,05
15/05/2014 05:06	0,19	0,30	0,09

Fecha y Hora	Caudal (L/s)	Promedio m³ en 5 min	m³/día
15/05/2014 05:11	0,24	0,30	0,09
15/05/2014 05:16	0,33	0,38	0,11
15/05/2014 05:21	0,29	0,30	0,09
15/05/2014 05:26	0,24	0,28	0,09
15/05/2014 05:31	0,54	0,53	0,16
15/05/2014 05:36	0,50	0,60	0,18
15/05/2014 05:41	0,26	0,31	0,09
15/05/2014 05:46	0,33	0,35	0,10
15/05/2014 05:51	0,40	0,32	0,10
15/05/2014 05:56	0,37	0,35	0,11
15/05/2014 06:01	0,44	0,40	0,12
15/05/2014 06:06	0,31	0,34	0,10
15/05/2014 06:11	0,33	0,29	0,09
15/05/2014 06:16	0,52	1,59	0,48
15/05/2014 06:21	0,70	0,54	0,16
15/05/2014 06:26	0,35	0,59	0,18
15/05/2014 06:31	0,37	0,18	0,05
15/05/2014 06:36	0,31	0,15	0,05
15/05/2014 06:41	0,25	0,12	0,04
15/05/2014 06:46	0,34	0,17	0,05
15/05/2014 06:51	0,37	0,19	0,06
15/05/2014 06:56	0,37	0,19	0,06
15/05/2014 07:01	0,24	0,12	0,04
15/05/2014 07:06	2,66	1,33	0,40
15/05/2014 07:11	0,38	0,19	0,06
15/05/2014 07:16	0,83	0,41	0,12

APÉNDICE 4. COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO DE
ULTRASONIDO EN LA CONFORMACIÓN DE 4 LAGUNAS

La implementación del equipo de ultrasonido en la laguna, para un alcance de 70 m, tiene un costo aproximado de:

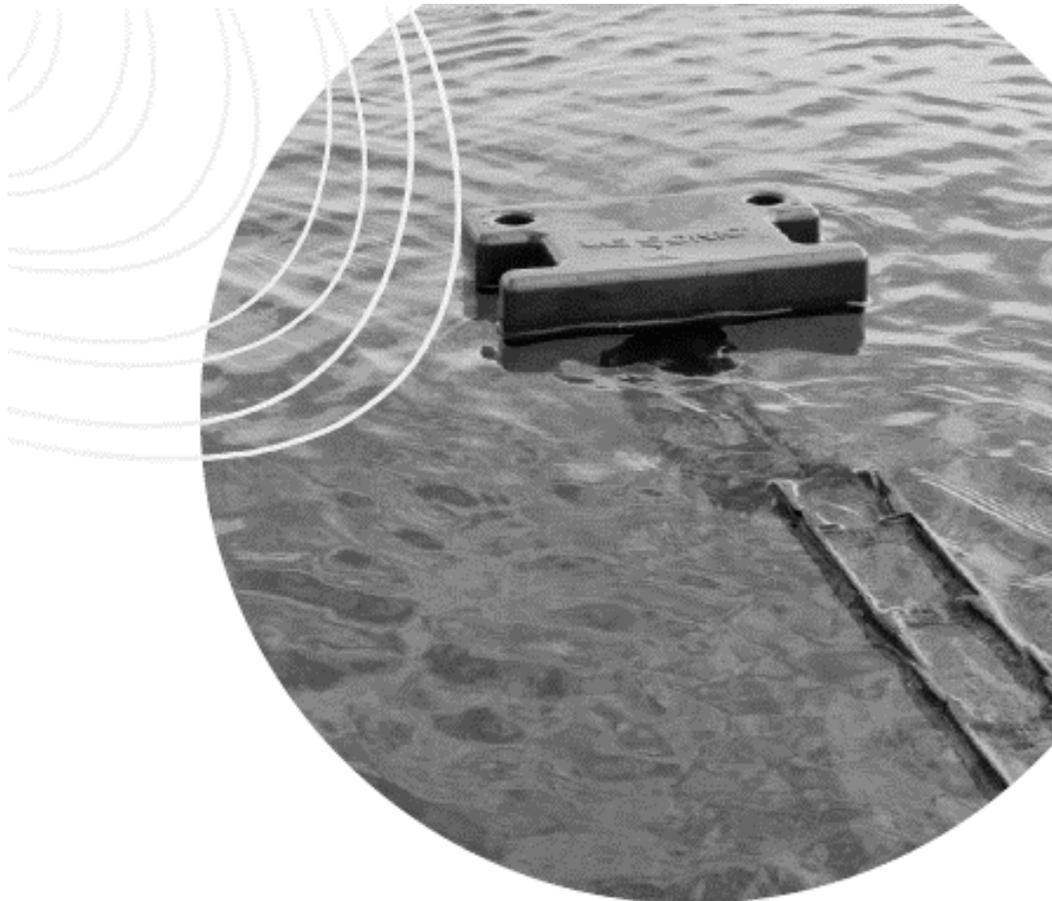
Cuadro A.4.1. Costo de la implementación del equipo de ultrasonido

Detalle	Observaciones	Costo (\$)
Equipo de ultrasonido	e-line tank	2.038 (+IVA y transporte)
Instalación del equipo	Instalación de la caja electrónica, transductor, flotador y demás implicaciones	8.500
TOTAL		10.538

*Tomando el siguiente tipo de cambio: €1=\$1,35

ANEXOS

ANEXO 2. CATÁLOGO DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO LG SONIC: E-LINE TANK



LG SONIC e-line

El equipo de ultrasonidos más avanzado para el control de algas y biopelícula

- Selección de programas ultrasónicos para un control más eficaz
- Control remoto de los equipos mediante GSM
- Limpieza automática del cabezal para reducir el mantenimiento a casi cero.
- Conexión de hasta 4 transmisores a la misma caja electrónica

Cómo funciona nuestra tecnología

Rompe las vesículas de gas

Las cianobacterias son capaces de viajar verticalmente por la columna de agua gracias a sus vesículas rellenas de gas. El ultrasonido emitido por los equipos LG Sonic afecta a estas vesículas, previniendo que las algas logren alcanzar la superficie e impidiendo así que lleven a cabo la fotosíntesis.

Creación de una barrera de sonido

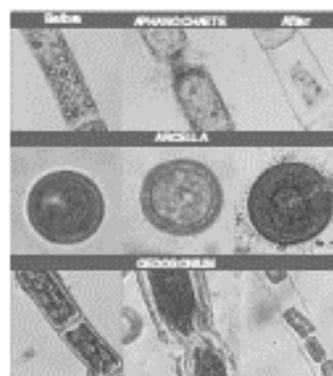
Los ultrasonidos con la frecuencia y amplitud correcta forman una barrera de sonido en la superficie del agua reflejándose en objetos con distinta densidad. Esto afecta directamente a la flotabilidad de muchos tipos de algas e impide sus funciones vitales.

Daño al tonoplasto

Uno de los efectos del ultrasonido es que puede romper el tonoplasto de las algas verdes, liberando el contenido de la vacuola en el interior de la célula.

Previene adherencia

El ultrasonido crea una barrera protectora que hace que las bacterias no puedan adherirse a las superficies, debilitando el biofilm y previniendo su formación.



Antes y después del tratamiento con la tecnología LG Sonic®

Tecnología Camaleón™

Por qué necesita la Tecnología Camaleón™?

Los parámetros físico-químicos, flujo de corriente y microorganismos pueden variar de un cuerpo de agua a otro. Del mismo modo, varían también los tipos de algas incluso durante una misma estación.

Para un control efectivo de las algas y la biopelícula, es fundamental contar con equipos capaces de emitir los rangos de frecuencias eficaces, con amplitudes y pulsos específicos. Solo así es posible controlar los microorganismos de forma efectiva estación tras estación.

Otros equipos disponibles en el mercado trabajan bajo un programa de frecuencias determinado que puede no ser eficaz frente al microorganismo a combatir.

Qué es la Tecnología Camaleón™?

La Tecnología Camaleón, permite el cambio de programa ultrasónico en función del tipo de aplicación, calidad del agua y tipo de microorganismo. Los especialistas de LG Sound instalan el programa más adecuado y si con el paso del tiempo, aparecen nuevos tipos de algas, el cambio de programa puede llevarse a cabo sin problemas por el propio usuario mismo.

La Tecnología Camaleón permite el cambio de programa de forma manual a través de la pantalla LCD o por control remoto enviando un simple mensaje SMS.



Selección de frecuencias en función de las condiciones del agua, tipo de alga y aplicación resulta en un tratamiento:

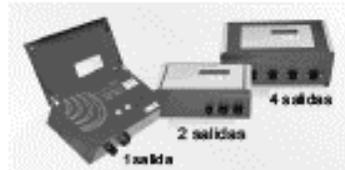
- más eficaz
- Más rápido
- Limita la aparición de algas resistentes

LG SONIC e-line



Multiples
programas
ultrasónicos

Multiples transmisores



El LG Sonic e-Line ofrece la opción de conectar hasta 4 transmisores a la misma caja electrónica. Cada transmisor puede programarse con un programa distinto.

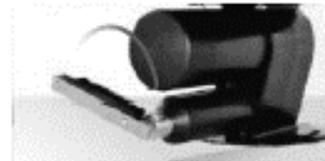
Esta opción permite controlar hasta 4 equipos y tratar varios cuerpos de agua a la vez.

Caja de control robusta



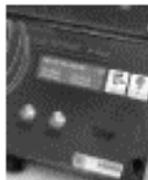
Caja protectora de aluminio resistente a golpes y al agua para proteger el PCB de las inclemencias del tiempo.

Limpeza automática



El LG Sonic e-line es el primer y único sistema de ultrasonidos que incorpora un cepillo automático de limpieza. Este cepillo se acciona automáticamente cada cierto tiempo y limpia la superficie del cabezal de depósitos minerales y suciedad.

* Incluido de serie en los equipos LG Sonic e-XXL.



Pantalla LCD con display y botones

La pantalla LCD muestra el estado de cada transmisor y el programa configurado. Con los botones puede navegar por el menú de usuario y seleccionar un programa entre los más de 10 programas de frecuencias disponibles.



Control remoto por GSM

El Control GSM-2 Control incluido en cada equipo permite el monitoreo y control de los equipos mediante teléfono móvil:

- Envío de mensaje SMS para cambiar programa
- Envío de mensaje SMS para solicitar estado operativo del transmisor
- Recepción de alerta si el transmisor está desconectado
- Editar un programa propio de frecuencias

Tecnología Low Power- Bright Signal II™

La tecnología Lp-Bs™ permite que los equipos combinen la perfecta combinación generación-emisión de sonido. De esta forma, no es necesario aplicar elevadas potencias para obtener los resultados deseados.

Transmisor de banda ancha

Los transmisores LG Sonic® incorporan la tecnología más avanzada y tiene una fórmula protegida. Estos han sido diseñados para generar y enviar ondas ultrafrecuencias sin ruidos armónicos.

Sistema solar disponible

Los modelos LG Sonic® e-line vienen preparados para operar también a 24V DC y consumen entre 10W y 40W.

LG Sound equipa y proporciona el equipo solar completo. Panel solar, baterías, pinzas y regulador de carga.

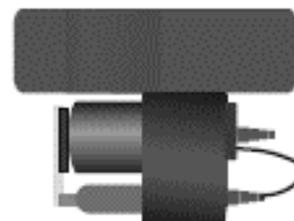
LG SONIC E-LINE

Especificaciones de los transmisores:

Tipo de transmisor	e-Tank	e-XL	e-XXL
Alcance	70 metros/ 230 pies	120 metros/ 400 pies	186 metros / 650 pies
Wiper	opcional	opcional	Si
Technologie Camaleón™	Si	Si	Si
Programas de frecuencias	11	11	11
Max frec/programa	80	80	80
LpBS/2	Si	Si	Si
Longitud cable transductor m (pies)	20 (65)	20 (65)	20 (65)
Extensión opcional	Si	Si	Si
Flotador	Si	Si	Si

Especificaciones de la e-Box (caja electrónica):

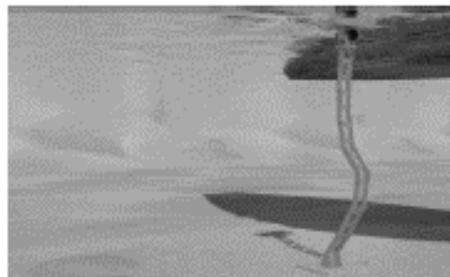
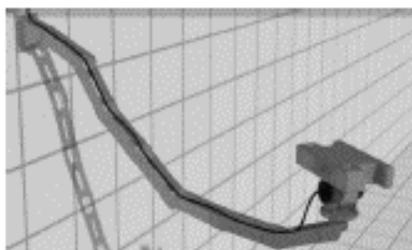
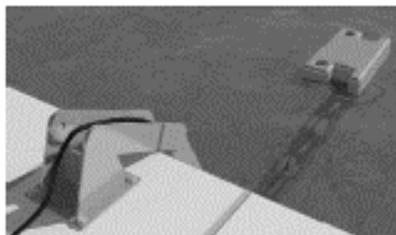
Tipo de e-Box	e-Box 1	e-Box 2	e-Box 4
Número de salidas	1	2	4
Display LCD	Si	Si	Si
Editar programa por mensaje SMS	Si	Si	Si
GSM/2	Si	Si	Si
Voltaje AC (V)	100v-240v AC, 50/60hz	100v-240v AC, 50/60hz	100v-240v AC, 50/60hz
Voltaje DC (V)	24V DC	24V DC	24V DC
Consumo de energía (W/h)	5-10 W	10-20 W	20-40 W
Material e-box	Aluminio	Aluminio	Aluminio
Estándar de Protección	IP67	IP67	IP67



Flexi-arm:

El Flexi-arm ha sido concebido para facilitar y asegurar la instalación de los equipos LG Sonic.

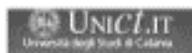
El Flexi-arm es un brazo articulado que ofrece la posibilidad de apuntar el LG Sonic® de forma precisa para un tratamiento correcto. El brazo de instalación es flexible (sube y baja con el nivel de agua) y puede ser alargado a voluntad hasta los 50 metros o más.



LG Sound empresa

LG Sound ha desarrollado la tecnología LG Sonic para el control de algas, cianobacterias y biopefícula.

Nuestro compromiso ha sido siempre reducir o evitar por completo el uso de químicos perjudiciales. La tecnología LG Sonic controla las algas de forma sostenible manteniendo el equilibrio natural del ecosistema.



LG SOUND B.V.
Plafinstraat 7
2718 SZ, Zoetermeer
Holanda

0031- 70 77 09030
0031- 70 77 09039

www.lgsonic.com
info@lgsonic.com

ANEXO 3. TESTIMONIO DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO PARA EL CONTROL DE MICROALGAS EN BRASIL



Company: Sabesp, Itapetininga
Brazil

Description: 20.000 m² and 1.5 m deep
facultative oxidation lagoon

Problem Description: In June 2012, the Brazilian Public Water company Sabesp decided to install one LG Sonic XXLplus device at their facultative oxidation lagoon in Itapetininga. The BOD removal from the waste water constantly varied and the pertinent growth of unwanted algae needed to be tackle.

Waste Water Oxidation Lagoon

Before treatment

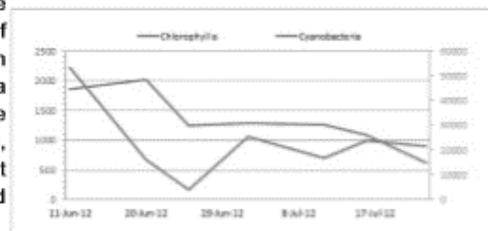
Nuisant odours caused by periodic occurrence of excessive quantities of filamentous, and blue-green algae were posing operational problems at the facultative lagoon in Itapetininga, state of São Paulo. This group of algae which flourishes in this kind of lagoons during the summer months does not settle like green algae but floats and accumulates at the surface where it decays in the sun, giving off noxious odors. Moreover, suspended solids were difficult to remove due to the high concentration of algae, thus posing a pollution threat to the receiving water body.



Photo 2:
Facultative lagoon treated by
the LG Sonic technology.

After treatment

Water samples were taken weekly to assess the evolution of the algal population. The laboratory of Sabesp monitored the phytoplankton in the water in terms of chlorophyll-a and cyanobacteria concentration (micrograms per liter). Results are evident just after 2 weeks treatment. After 2 months, the results showed a significant reduction of pigment concentration in the effluent that could be discharged safely into the nearby surface water.



Results

- Up to 80 % reduction in Cyanobacteria concentration
- Up to 60% reduction in Chlorophyll a concentration
- Indirect improvement of adjoining river and waterways overall quality.

