

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “GABRIEL RENÉ MORENO”  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE TECNOLOGÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS DE  
ESTABILIZACIÓN PARA LAS CONDICIONES DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA



Santa Cruz de la Sierra – Bolivia  
Marzo de 2010

2010

# ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN PARA LAS CONDICIONES DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA

## **EQUIPO DE TRABAJO**

Dr. Carlos Orlando Hernández Suárez

Ing. Carmen Ofelia Maida Vargas

Est. Ing. Civil Andrea Alpire Koller

Santa Cruz de la Sierra – Bolivia

Marzo de 2010

# ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN PARA LAS CONDICIONES DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA

<b>ALCANCE</b>	Pág.
<b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN</b>	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Marco de referencia	4
1.3. Metodología de la investigación	4
<b>CAPITULO II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	5
<b>CAPITULO III. MARCO TEORICO</b>	7
3.1. Definición de laguna de estabilización	7
3.2. Tipos de lagunas de estabilización	7
3.3. Criterios de diseño	9
3.4. Recomendaciones para el diseño de las lagunas	13
3.5. Métodos para el diseño de las lagunas de estabilización	14
3.6. Modelos matemáticos para el diseño de lagunas aeróbicas y facultativas	14
3.7. Modelos matemáticos para el diseño de lagunas anaerobias	15
3.8. Modelos matemáticos para el diseño de lagunas aeróbicas, facultativas y anaerobias	17
3.9. Métodos para la determinación de coliformes fecales en las lagunas	18
3.10. Recomendaciones de la bibliografía especializada acerca de las constantes a emplear en el diseño de lagunas	20

<b>CAPITULO IV. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>32</b>
4.1. Antecedentes .....	32
4.2. Metodología a seguir para el procesamiento y análisis de la información .....	35
<b>CAPITULO V. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....</b>	<b>37</b>
5.1. Resumen de la información obtenida para los diferentes sistemas de tratamientos localizados en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra .....	37
5.2. Procesamiento de la información .....	39
5.3. Análisis de los resultados obtenidos .....	45
5.4. Elaboración de los gráficos con los parámetros a emplearse en el diseño de las lagunas de estabilización para las condiciones de Santa Cruz de la Sierra o similares .....	46
<b>CAPITULO VI. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
6.1. Conclusiones generales .....	53
6.2. Recomendaciones .....	53
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>55</b>

# **ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN PARA LAS CONDICIONES DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA**

## **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

Las lagunas de estabilización son estructuras muy simples donde ocurren procesos muy complejos. Estas consisten en una excavación de poca profundidad y gran área, con dispositivos de entrada y salida, donde se embalsa el agua residual, generalmente con flujo continuo (lo que entra igual a lo que sale), con un tiempo de retención relativamente largo (días).

Las lagunas como sistema de depuración, se utilizan cada día con mayor fuerza en el mundo, pues alcanzan un elevado rendimiento de depuración biológica con un bajo costo de construcción y operación.

Las lagunas de estabilización se utilizan en el tratamiento del agua residual doméstica e industrial, donde, por la actuación de algas, hongos y bacterias, se verifican fenómenos físicos, químicos y biológicos, lo cual permite que en ella se verifiquen todos los tipos de tratamiento posibles del agua residual en un mismo dispositivo.

En Bolivia y en especial en el departamento de Santa Cruz, uno de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales de origen doméstica e industrial que más se emplea son las lagunas de estabilización, sin embargo a pesar de esta preferencia entre los especialistas del tema, motivado por las ventajas económicas que reporta sobre los otros tratamientos, no se conocen estudios a nivel departamental, que permitan orientar a los profesionales sobre el comportamiento de los parámetros que intervienen en el adecuado diseño de estos dispositivos de tratamiento y su comportamiento en las condiciones específicas que se presentan en la región.

Por todas las razones antes mencionadas, con en el presente trabajo, se pretende abordar un estudio a nivel de prototipo, aprovechando la información y las instalaciones de las lagunas de estabilización que operan en la región, además de los parámetros fundamentales que intervienen en el diseño y el adecuado funcionamiento de este tipo de tratamiento de las aguas residuales, aplicado a las condiciones locales del departamento de Santa Cruz.

## **1.2. Marco de referencia**

Se desconocen estudios a nivel departamental, que permitan orientar a los especialistas sobre los parámetros de diseños de las lagunas de estabilización, que se adecuen a las condiciones específicas que se presentan en la región.

Si a lo antes mencionado, se le suma el hecho de que en Bolivia y en especial en el departamento de Santa Cruz, uno de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales de origen doméstica e industrial más empleado lo constituyen las lagunas de estabilización, esto ha sido razón suficiente para motivar el desarrollo de presente trabajo de investigación, donde se pretende al finalizar el mismo, poner en mano de los especialistas vinculados con el tema un documento que les permita el diseño eficiente y racional de estos dispositivos de tratamiento.

## **1.3. Metodología de la investigación**

Para lograr este objetivo, se plantea realizar una investigación experimental a nivel de prototipo, basada en la obtención, ordenamiento, procesamiento y análisis de resultados alcanzados, a partir de los datos de los ensayos de laboratorio, haciendo uso de técnicas matemáticas que permitan el establecimiento de los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización para las condiciones estudiadas.

## **CAPITULO II. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1. Objetivo general**

Establecer, mediante estudios de campo a nivel de prototipo, los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización (anaerobias, facultativas y aerobias), aplicados a las condiciones específicas de Santa Cruz de la Sierra, de manera de dotar a los proyectistas, vinculados con el tema, de una herramienta que les permita el diseño eficiente de estos dispositivos de tratamiento.

### **2.2. Objetivos específicos**

- a. Realizar una revisión bibliográfica acerca del comportamiento de los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización en diferentes condiciones de funcionamiento.
- b. Análisis de la información recolectada en la revisión bibliográfica.
- c. Coordinar con las instituciones del medio, el Laboratorio de Medio Ambiente y UTALAB con el objetivo de recabar la información histórica sobre la toma de muestras del afluente y el efluente de las diferentes lagunas, para su análisis y procesamiento.
- d. Procesar la información obtenida con el empleo de modelos matemáticos.
- e. Establecer los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización para las condiciones estudiadas.
- f. Comparar los resultados obtenidos con los registrados en la bibliografía especializada, a fin de poder validarlos.

- g. Presentación de los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización, aplicados a las condiciones específicas de Santa Cruz de la Sierra.
- h. Presentación de los resultados en un congreso internacional de Ingeniería Sanitaria.



## **CAPITULO III. MARCO TEORICO**

### **3.1. Definición de laguna de estabilización**

Una laguna de estabilización es una estructura muy simple donde ocurre un proceso muy complejo. Consiste en una excavación de poca profundidad y gran área, con dispositivos de entrada y salida, donde se embalsa el agua residual, generalmente con flujo continuo (lo que entra igual a lo que sale), con un tiempo de retención relativamente largo (días).

Las lagunas como sistema de depuración, se utilizan cada día con mayor fuerza, pues alcanzan un elevado rendimiento de depuración biológica con un bajo costo de construcción y operación.

Las lagunas de estabilización se utilizan para el tratamiento del agua residual doméstica e industrial, donde, por la actuación de algas, hongos y bacterias, se verifican fenómenos físicos, químicos y biológicos, lo cual permite que en ella se verifiquen todos los tipos de tratamiento posibles del agua residual en un mismo dispositivo.

### **3.2. Tipos de lagunas de estabilización**

Las lagunas de estabilización se pueden clasificar en aeróbicas, facultativas y anaeróbicas, de acuerdo a las características del proceso que en ellas se desarrolla.

**Las lagunas aeróbicas**, también conocidas como lagunas de maduración o acabado, son depósitos de poca profundidad, donde existe intercambio entre bacterias y algas que estabiliza la materia orgánica.

Las bacterias al degradar la materia orgánica en un ambiente aeróbico (con oxígeno disuelto en el medio), producen dióxido de carbono y sales inorgánicas, las cuales junto a la energía suministrada por el sol son utilizadas por las algas para el desprendimiento de oxígeno, que junto con el que recibe el agua por difusión del aire, son empleados en el

metabolismo bacteriano para continuar la estabilización de la materia orgánica hasta su total mineralización.

Con ellas se persigue una alta mineralización de las materias sedimentables en el fondo y una depuración elevada de la parte líquida alcanzándose un efluente de gran calidad, que cumplen con los requisitos exigidos para el vertimiento.

**Las lagunas facultativas**, son depósitos de mediana profundidad, capaces de estabilizar el líquido residual afluente, produciendo un efluente con bajo contenido de  $\text{DBO}_5$  y microorganismos.

En una laguna facultativa se pueden distinguir tres zonas; una superior, que incluye la superficie de las lagunas, que suele llenarse de algas microscópicas (Clorelas y euglenas), que en presencia de la luz solar, producen grandes cantidades de oxígeno, haciendo que el agua llegue a estar sobresaturada de oxígeno disuelto, permitiendo condiciones aeróbicas para la degradación de la materia orgánica; otra intermedia, donde existen microorganismos o bacterias facultativas, que tienen la facilidad de degradar la materia orgánica, lo mismo en presencia de oxígeno que sin él y una inferior, cerca del fondo, en la cual se desarrollan los procesos de digestión anaerobios, debido a la ausencia de oxígeno.

**Las lagunas anaerobias**, son aquellas donde se crea intencionalmente condiciones anaerobias para la estabilización de los residuales orgánicos, se recomienda su construcción para valores de cargas orgánicas grandes, de manera tal que exceden la capacidad de producción de oxígeno de las algas, lo cual hace que la laguna se convierta en anaerobia.

### 3.3. Criterios de diseño

En el diseño de lagunas de estabilización se deben tener en cuenta, como criterios de diseño, la carga orgánica a ser aplicada a la laguna, la profundidad, el tiempo de retención del líquido en ésta y la forma de la laguna, en función del tipo de laguna a diseñar.

#### a. Cargas orgánicas

En las lagunas aeróbicas, es recomendable emplear cargas orgánicas entre 80 ~ 120 (Kg DBO<sub>5</sub> / Ha·día), para profundidades del agua entre 1.00 ~ 1.20 (m).

No se aconseja emplear profundidades del agua menores de 1.00 (m) por la posibilidad del crecimiento de hierbas y arbustos que obstruirán la laguna, además cuando la profundidad del agua es pequeña, todo el volumen se ve afectado por la temperatura ambiente, mayormente en verano, cuando las temperaturas muy altas crean condiciones críticas por aumento de la actividad microbiana y la disminución de la solubilidad de oxígeno en el agua, simultáneamente.

En las lagunas facultativas, se recomienda tomar valores de carga orgánica entre 80 ~ 300 (Kg DBO<sub>5</sub>/Ha.día), para profundidades del agua entre 1,2 ~ 1,5 (m).

En las lagunas anaerobias se recomienda se tomen valores de carga orgánica mayores de 300 (KgDBO<sub>5</sub>/Ha·día), con profundidades del agua entre 1,5 ~ 4,00 (m). Como referencia se recomienda tener en cuenta los valores detallados en la tabla 3.1.

Tipo de laguna	DBO <sub>5</sub> afluente (mg/l)	Carga superficial (kg.DBO <sub>5</sub> /ha·día)	tr (días)	Profundidad h (m)	Eficiencia en la remoción de DBO <sub>5</sub> (%)
Anaerobia	≥ 300	≥ 300	4 ~ 12	1,5 ~ 4,0	40 ~ 80
Facultativa	< 300	80 ~ 300	7 ~ 30	1,2 ~ 1,5	85 ~ 98
Aerobia	< 300	80 ~ 120	7 ~ 30	1,0 ~ 1,2	80 ~ 95

Tabla 3.1. Valores recomendados para los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización

## **b. Tiempo de retención**

El tiempo de retención es otro criterio importante a la hora del diseño. Mientras mayor sea el tiempo de retención, mejores resultados se lograrán, aunque éste tiene un límite económico, ya que al aumentarlo se está incrementando el área superficial que ocuparían las lagunas.

Al definir el tiempo de retención, se tiene que satisfacer las exigencias de reducir la  $\text{DBO}_5$ , reducir los microorganismos (coliformes fecales) y lograr que se produzcan distribuciones uniformes del flujo.

En relación con este tema Marais recomienda como tiempo de retención mínimo 7 días, para lograr que se produzcan distribuciones uniformes del líquido residual afluente, evitando así los cortos circuitos.

Como tiempo de retención máximo, se recomienda que éste oscile en los 30 días. Por esta razón, se recomiendan tiempos de retención entre 7 y 30 días.

En el caso de las lagunas facultativas, al igual que en las aeróbicas, se recomienda que el tiempo de retención sea mayor o igual a los 26 días para lograr una buena remoción de los coliformes fecales, cuando este sea el único tratamiento biológico a emplear. En caso de emplearse varias lagunas, en serie, se puede dividir el tiempo de retención total entre ellas.

Resulta aconsejable acometer el diseño de las lagunas de estabilización para tiempos de retención mayor o iguales a los 26 días, pues se ha podido demostrar que los coliformes fecales o bacterias parásitas no viven más de 26 días fuera de los cuerpos de agua caliente.

En aquellos casos en que se construye una planta de tratamiento con una combinación de lagunas (anaerobia para rebajar carga y facultativa o aerobia para la remoción de  $\text{DBO}_5$  y coliformes fecales), se recomienda que el tiempo de retención total del sistema de lagunas sea mayor o igual a los 26 días.

### **c. Forma de las lagunas**

Otro criterio importante en el diseño de las lagunas es la forma que se adopte, ya que las lagunas de estabilización pueden adoptar diversas formas, entre ellas circulares, cuadradas, rectangulares o irregulares, teniéndose en cuenta que lo que ha de lograrse con la forma que se le dé a la laguna, es que la distribución del residual que circula por ella sea lo más homogénea posible, para evitar la formación de zonas muertas donde existan regímenes de operación distintos al del cuerpo de la laguna, que puedan interferir en el buen funcionamiento de la misma.

Es recomendable que la forma de la laguna sea rectangular, y que guarde una relación entre sus lados (ancho: largo) de 2:3, o de 1:4, para lograr con ello dimensiones que provoquen la ocurrencia de un modelo hidráulico tendiendo al flujo pistón, para así disminuir los efectos de corto circuitos y por ende menores tiempos de retención que los calculados.

### **d. Ubicación de las estructuras de entrada y de salida**

La ubicación de las estructuras de entrada y de salida del residual en las lagunas influye en el proceso que se desarrolla en estos dispositivos y por tanto en la calidad del efluente, es importante que, según el ancho de la laguna, se coloquen varias entradas y salidas, a fin de ayudar a la uniformidad del flujo. Además de la ubicación y distribución de las estructuras de entrada y salida del líquido en la laguna, debe tenerse en cuenta las formas de ingreso y salida del afluente y el efluente.

En las lagunas aeróbicas y facultativas, el afluente debe entrar por encima del nivel del agua, a fin de que ésta adquiera oxígeno al caer y cree una agitación en la superficie, debiéndose prever que en la zona donde será descargado el chorro deberá protegerse el talud, para evitar la erosión provocada por éste, con cualquier tipo de recubrimiento tales como hormigón pobre, asfalto, roca, entre otros.

La salida del efluente, se debe ubicar a no menos de 0,30 (m) por debajo del nivel normal de operación para evitar la extracción del estrato o colchón superficial de algas las cuales, son en gran parte responsable del buen funcionamiento de la laguna.

En las lagunas anaerobias, el afluente debe entrar por debajo del nivel del agua en la laguna, para que no favorezca la penetración de oxígeno indeseable en el medio anaerobio y para que la descarga del afluente no incida directamente sobre la capa flotante que evita el escape de gases mal oliente.

La salida del efluente, se recomienda que sea a no menos de 0,5 (m) por debajo del nivel normal de operación de la laguna, para evitar que salga la capa superficial o nata. Si en la entrada se exige la uniformidad del flujo, también en la salida se desea, ya que esto contribuye a un trabajo parejo de la laguna.

En general, las estructuras de entrada y salida deben ser lo más sencillas posible evitando incluir elementos que encarezcan su economía. En todos los casos, deberán emplearse estructuras de salida con facilidades para la toma de muestras.

El talud debe ser protegido de la erosión causada por el caudal de salida empleando grava u otro material que prevenga la socavación. En caso de que la entrada se realice por el talud, se deberá proteger, en las partes susceptibles de erosión, con algún recubrimiento especial como hormigón pobre, asfalto, roca, etc.

### **3.4. Recomendaciones para el diseño de las lagunas**

El tratamiento del agua residual utilizando lagunas de estabilización se ha extendido en todo el mundo, por ello, se hace conveniente exponer en el presente trabajo algunas recomendaciones, que serán de mucho interés para los proyectistas de este tipo de tratamiento.

Este sistema de tratamiento no necesita de estar precedido de otro tipo de tratamiento, ya que, su efecto es perjudicial, al eliminar nutrientes que son necesarios para los microorganismos que se desarrollan en las lagunas. Solo en aquellos casos de residuales que contengan sólidos en suspensión no biodegradables, resulta necesario el empleo de una sedimentación previa, además del uso de una cámara de rejas para evitar que puedan dar un mal aspecto a la superficie.

Aunque para la solución de un residual determinado pudiera emplearse una sola laguna de grandes dimensiones, se recomienda utilizar varias, pues se ha demostrado que se obtienen mejores resultados con varias lagunas en serie que con una sola, cuyo tiempo de retención sea igual a la suma de los tiempos individuales de las lagunas en serie.

En las lagunas anaerobias se requiere de una explotación controlada, ya que es preciso mantener el volumen de la llamada digestión metanófila. Se recomienda sembrar cieno activado en la laguna, antes de que comience la digestión, evitando así que la misma se torne ácida.

En caso de producirse la digestión ácida, es necesario impedirla mediante la adición de sustancias químicas que suban el pH o eventualmente recircular el efluente de las lagunas aeróbicas o facultativas situados después del tratamiento anaerobio.

Es aconsejable ubicar lagunas anaerobias de reserva en paralelo, para no interrumpir el tratamiento cuando sea necesaria la remoción de los sólidos acumulados en el fondo.

### **3.5. Métodos para el diseño de las lagunas de estabilización**

Existen varios métodos para el diseño de las lagunas de estabilización. Cada investigador o grupo de investigación que ha experimentado en este campo, como producto ha desarrollado un modelo matemático. Entre ellos se pueden mencionar:

Para el diseño de lagunas aeróbicas o facultativas:

- Método racional basado en la cinética del proceso desarrollado por Marais, Shaw y otros.
- Diseño empírico por carga superficial desarrollado por Towne y Davis y otros.

Para el diseño de lagunas anaerobias:

- Método racional cinético y de mezcla completa desarrollado por Vincent.
- Método de la tasa de aplicación volumétrica.
- Diseño empírico por carga superficial desarrollado por Towne y Davis y otros.

### **3.6. Modelos matemáticos para el diseño de lagunas aeróbicas y facultativas**

#### **a. Método racional basado en la cinética del proceso desarrollado por Marais, Shaw y otros**

Las premisas en las que se basa este modelo son:

- \* Para un tiempo de retención cualquiera, la mezcla es completa e instantánea.
- \* El modelo está basado en un balance de masa alrededor de la laguna, el cual se expresa a través de la siguiente ecuación:



$S_e = \frac{S_a}{K \cdot t_r + 1}$	<p>Donde</p> <p><math>S_e</math> = DBO<sub>5</sub> efluente (mg/l)</p> <p><math>S_a</math> = DBO<sub>5</sub> afluente (mg/l)</p> <p><math>t_r</math> = tiempo de retención (días)</p> <p><math>K = \theta^{(T-20^\circ \text{C})}</math> (día<sup>-1</sup>): constante de degradación de la materia orgánica</p> <p><math>\theta = 1,047</math></p> <p><math>T</math> = temperatura promedio del agua en el mes más frío (°C)</p>
-------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

- \* Este método es aplicable tanto para el diseño de una laguna, como para un sistema de lagunas en serie. Si se desea diseñar un sistema de lagunas, se debe tener en cuenta que la carga efluente de la laguna anterior será la carga afluente de la laguna siguiente, de manera secuencial, por ello:

1ª Laguna	$S_{e1} = \frac{S_a}{K \cdot t_{r1} + 1}$
2ª Laguna	$S_{e2} = \frac{S_{e1}}{K \cdot t_{r2} + 1} = \frac{S_a}{(K \cdot t_{r1} + 1) \cdot (K \cdot t_{r2} + 1)}$
3ª Laguna	$S_{e3} = \frac{S_{e2}}{K \cdot t_{r3} + 1} = \frac{S_a}{(K \cdot t_{r1} + 1) \cdot (K \cdot t_{r2} + 1) \cdot (K \cdot t_{r3} + 1)}$

### 3.7. Modelos matemáticos para el diseño de lagunas anaerobias

#### a. Método racional cinético y de mezcla completa desarrollado por Vincent

Para el caso de las lagunas anaerobias, se recomienda el uso de la ecuación de Vincent cuya expresión propuesta es:

$S_e = \frac{S_a}{K_{pa} \left( \frac{S_e}{S_a} \right)^n t_r + 1}$	<p>Donde :</p> <p><math>\frac{S_e}{S_a} = 0,3 \sim 0,5</math> (según Vincent)</p> <p><math>S_e</math> = DBO<sub>5</sub> efluente (mg/l)</p> <p><math>S_a</math> = DBO<sub>5</sub> afluente (mg/l)</p> <p><math>t_r</math> = tiempo de retención = 4 ~ 6 días</p> <p><math>K_{pa}</math> = constante de reacción en lagunas anaerobias (día<sup>-1</sup>)</p> <p><math>n</math> = constante adimensional</p>
---------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tanto el valor de  $K_{pa}$ , y el de  $n$  dependen de la temperatura y el clima. Se recomienda que se utilicen los valores que se presentan en la tabla 3.2.

Elevación	Temperatura	$K_{pa}$	$n$	Eficiencia	$t_r$
(≤ 1000 msnm)	22 °C	6 (día) <sup>-1</sup>	4,8	30~50%	4~6 días

Tabla 3.2. Valores recomendados por Vincent para las lagunas anaerobias

## b. Método de la tasa de aplicación volumétrica

Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$V = \frac{L_o}{L_c} \quad (m^3)$	<p>Donde:</p> <p><math>V</math> = volumen de la laguna</p> <p><math>L_o</math> = aporte del afluente (Kg DBO<sub>5</sub> / día)</p> <p><math>L_c</math> = carga superficial o tasa de trabajo de la laguna, en (Kg DBO<sub>5</sub> / m<sup>3</sup>. día)</p>
-----------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fisher recomienda que la carga volumétrica esté comprendida entre 40 - 283 (Kg DBO<sub>5</sub> / m<sup>3</sup>. día) para tener la certeza de condiciones anaerobias en la laguna durante todo el tiempo. Por su parte, Marais recomienda que la carga volumétrica sea ≤ 400 (Kg DBO<sub>5</sub> / m<sup>3</sup>. día) para evitar los malos olores.

### 3.8. Modelos matemáticos para el diseño de lagunas aeróbicas, facultativas y/o anaerobias

#### a. Diseño empírico por carga superficial

Este método, denominado también por tasa de trabajo, ha sido desarrollado mediante la evaluación del comportamiento de un sistema de lagunas experimentales o piloto.

Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$A = \frac{L_o}{L_c} \quad (\text{Ha})$	Donde: A = área de la laguna (Ha) $L_o$ = aporte del afluente (Kg DBO <sub>5</sub> /día) $L_c$ = carga superficial o tasa de trabajo de la laguna (Kg DBO <sub>5</sub> /Ha .día)
-----------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

En la tabla 3.1 se presentan los valores de carga superficial y profundidad de las lagunas para los casos de tratamientos aeróbicos, facultativos y anaerobios.

Este método se aplica en términos de carga superficial (Kg DBO<sub>5</sub>/Ha·día), aunque según Gloyna (1971), es incorrecto referirse a una laguna anaerobia en función del área superficial, sin embargo, constituye una costumbre que sólo será totalmente abandonada después de muchos años, debido a que muchos autores toman como base este parámetro.

En la actualidad se ha comprobado que el volumen tiene influencia en los procesos anaerobios, mientras que la superficie no.

Actualmente se trata de profundizar los estanques anaerobios al valor máximo económicamente factible (3 a 5 m) manteniendo la mínima superficie posible a fin de absorber menos oxígeno de la atmósfera y perder menos calor.

La literatura especializada recomienda que la carga superficial debe ser mayor a 1000 (Kg DBO<sub>5</sub>/Ha·día) para tener la certeza de las condiciones anaerobias en la laguna.

### 3.9. Métodos para la determinación de coliformes fecales en las lagunas

La teoría propuesta por muchos autores, en lo relativo al total o casi total eliminación de coliformes fecales, plantea la necesidad de suponer tiempos de retención mayores o iguales a 26 días. Sin embargo, suele ocurrir con frecuencia que el tiempo de retención resulta ser menor en los estanques de estabilización, sobre todo en los climas tropicales, donde se producen variaciones en las características de mezclado, debido a la ocurrencia de corto circuitos y del factor dispersión principalmente.

Debido a lo planteado anteriormente, es necesario evaluar, durante la etapa de cálculo las características del flujo que se dan en los distintos tipos de laguna y el parámetro utilizado para ello es la dispersión. La dispersión se puede calcular a través de la expresión:

$d = \frac{C_d}{v \cdot L}$	<p>Donde</p> <p>d = dispersión</p> <p>C<sub>d</sub> = coeficiente de dispersión longitudinal axial, que caracteriza el grado de mezclado del flujo</p> <p>v = velocidad del flujo</p> <p>L = longitud del paso del fluido, desde el afluente hasta el efluente</p>
-----------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

A medida que aumenta el término (L), la dispersión tiende a cero, entonces, el flujo se clasifica como tipo pistón. Cuando el término (L) disminuye, la dispersión tiende a infinito y el flujo se clasifica como de mezcla completa.

Las lagunas que se aproximan a las condiciones de flujo tipo pistón (valores bajos de d) tienen menos corto circuitos y proporcionan más tiempo para las reacciones que tendrán lugar en el estanque.

Thirumurthi fija como base que para los valores de dispersión:

- $d > 5$  la laguna trabaja bajo el régimen de mezcla completa.
- $d < 2$  la laguna tiende al flujo pistón.

El CEPIS propone, para determinar la dispersión, para lagunas aeróbicas, facultativas o anaeróbicas, en temperaturas de 20 °C la siguiente expresión:

$d = \frac{1,158[t_r(W + 2Z)]^{0,489} \cdot W^{1,511}}{(T + 42,50)^{0,734} \cdot (L \cdot Z)^{1,489}}$	<p>Donde</p> <p><math>d</math> = dispersión</p> <p><math>t_r</math> = tiempo de retención (días)</p> <p><math>L</math> = longitud del paso del fluido, desde el afluente al efluente (m)</p> <p><math>W</math> = ancho la laguna (m)</p> <p><math>Z</math> = profundidad de la laguna (m)</p> <p><math>T</math> = temperatura promedio del agua en el periodo considerado (°C)</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Una vez calculado el valor de la dispersión, se puede obtener una estimación de los coliformes fecales en el efluente a partir de la expresión de Thirumurthi, válida para lagunas aeróbicas, facultativas o anaeróbicas, y que a continuación se presenta:

$\frac{N}{N_o} = \frac{4 \cdot ab \cdot e^{\left(\frac{1-ab}{2d}\right)}}{(1+ab)^2}$	<p>Donde</p> <p><math>d</math> = dispersión</p> <p><math>N</math> = concentración de coliformes en el efluente (NMP/100 ml)</p> <p><math>N_o</math> = concentración de coliformes en el afluente (NMP/100 ml)</p> <p><math>ab = (1 + 4 K_b t_r d)^{0,5}</math>: parámetro adimensional</p> <p><math>K_b = 0,622677 \cdot (1,037409)^{(T-20)}</math> día<sup>-1</sup>: razón de decaimiento coli-fecal</p> <p><math>t_r</math> = tiempo de retención (días)</p> <p><math>T</math> = temperatura promedio del agua (°C)</p>
--------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 3.10. Recomendaciones de la bibliografía especializada acerca de las constantes a emplear en el diseño de lagunas

Ningún sistema convencional puede competir con la eficiencia que se logra en las lagunas de estabilización sobre la base de la remoción de microorganismos patógenos y por tanto, en la actualidad éstas se han convertido en una opción importante para el tratamiento de los residuales líquidos de centros poblacionales e industrias, tanto en países en desarrollo, como en países desarrollados donde se planifique el reuso de las aguas residuales.

A partir de la segunda mitad de este siglo comenzaron a elaborarse criterios para el dimensionamiento de las lagunas de estabilización y desde entonces se han propuesto diferentes teorías para el diseño de estas obras.

En las lagunas de estabilización, se considera como aproximación que ocurre una cinética de primer orden y que la constante de reacción depende invariablemente de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias reaccionantes, por lo que esta constante se ha postulado en la generalidad de los casos, tanto para la remoción de materia orgánica, nutrientes o bacterias, como proporcional a la temperatura del agua.

Una de las fórmulas mas aplicada en la determinación de esta constante cinética se da siguiendo la ley de Arrhenius modificada, la cual se expresa por la ecuación:

$K_t = K_{20} \times e^{(t - 20)}$	<p>donde:</p> <p>K<sub>t</sub>: constante de reacción por unidad de tiempo de una especie a la temperatura t (dia<sup>-1</sup>).</p> <p>K<sub>20</sub>: constante de reacción por unidad de tiempo de una especie a la temperatura de 20°C (dia<sup>-1</sup>).</p> <p>t : temperatura (°C).</p>
------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Sin embargo, los valores que realmente afectan a esta constante son más complejos ya que en el ecosistema de la laguna hay más de una fase relacionada y se debe, por tanto, determinar con precisión el grado de afectación sobre la misma cuando ocurre alguna modificación, tanto de las condiciones externas, como internas del reactor.

Así pues, además de la dependencia de esta constante de especie con la temperatura y la naturaleza de las sustancias reaccionantes (existencia de sustancias tóxicas o catalizadoras, disponibilidad de nutrientes y factores de crecimiento), se deben tener en cuenta las condiciones ambientales (intensidad de la luz solar, radiación ultravioleta y vientos) o del proceso en sí (geometría del reactor, profundidad, ocurrencia de mezcla o estratificación termal, régimen de flujo, entre otros).

Hace algún tiempo se han venido realizando investigaciones importantes que demuestran que las condiciones ambientales en general y del proceso en particular, desempeñan un papel primordial en el valor que puede alcanzar esta constante cinética para el caso de la remoción de bacterias coliformes, pudiéndose elevar la eficiencia de este proceso en el momento del diseño.

Algunas de las consideraciones anteriores se comentan a continuación.

### **3.10.1 Fórmulas para determinación de los parámetros cinéticos de las lagunas en diferentes países y regiones**

#### **a. Perú**

Según estudios realizados, con balance de  $\text{DBO}_5$  alrededor de la laguna:

$$V \cdot dS/dt = Q_a \cdot S_a - Q \cdot S - K_1 \cdot X_b \cdot S \cdot V$$

En estado estable  $d/dt = 0$ ;  $PR = V/Q_a$  y  $K' = K_1 \cdot X_b$ , se obtiene que:

$S = S_a / (1 + K' \cdot PR)$	<p>Donde:</p> <p>Sa: DBO total 5 días en el afluente, mg/l</p> <p>S: DBO soluble 5 días en el efluente, mg/l</p> <p>K1: constante de degradación específica de primer orden a la temperatura T, l/(mg.día)</p> <p>Xb: concentración de biomasa activa, mg/l</p> <p>K': constante de degradación global de primer orden a la temperatura T, (día<sup>-1</sup>)</p> <p>Ko: constante de degradación global de primer orden a la temperatura To, (día<sup>-1</sup>)</p> <p>PR: período de retención nominal, días</p>
-------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Donde se puede obtener también, con algunas simplificaciones, la Ley modificada de Arrhenius :

$$K' = K_o \times e^{T-T_o} = K_o \times 1.085^{T-20}$$

De la cual, tomando en cuenta ciertos factores tales como:

- Se asume mezcla completa, lo cual no es apropiado.
- No hay sedimentación de sólidos.
- Reacción de primer orden para la constante de degradación y dependiente de la temperatura.
- No hay pérdidas por evaporación y percolación.
- La biomasa y el líquido tienen el mismo submodelo hidráulico.
- Las constantes de degradación global han sido determinadas con el modelo de mezcla completa.



Se obtiene para las condiciones de esta region valores de:

Para evaluaciones de lagunas aeróbias y facultativas, durante 55 semanas, se obtuvo que la constante de degradación global de primer orden a la temperatura (T) se comporta como:

$$K' = PR/(-14.77 + 4.64 PR)$$

Recomendada para un período de retención nominal (PR = 8 días o más); se obtiene que la constante de degradación global de primer orden a la temperatura fue de:

$$K' = 0.35 \text{ (día}^{-1}\text{)}$$

- **Brasil**

Haciendo el analisis, y tomando en cuenta las mismas fórmulas y factores que en el caso anterior, se obtuvo un valor muy similar al valor desarrollado en el Perú.

Mara y Silva obtuvieron que la constante de degradación global de primer orden a la temperatura (T) , para lagunas anaerobias y facultativas fue:

$$K' = 0.527/(1 + 0.052 PR)$$

Recomendando para un período de retención nominal (PR = 10 días o más); el valor de la constante de degradación global de primer orden a la temperatura (T), siguiente:

$$K' = 0.347 \text{ (día}^{-1}\text{)}$$

- **México (Jiutepec)**

La determinación del valor correcto de las constantes cinéticas a utilizar, viene a ser un problema frecuente a la hora del diseño de lagunas, ya que este valor es afectado por parámetros ambientales y de carga orgánica. Por lo que no es posible recomendar un valor general, la tendencia es determinar estos valores en forma regional y generar ecuaciones de diseño en función de los parámetros que más le afecten.

En el trabajo presentado se determinaron las constantes cinéticas de carga orgánica (K) y decaimiento bacteriano ( $K_b$ ), en un sistema lagunar ubicado en la región norte de México. El sistema está integrado por 3 lagunas en serie: anaerobia, facultativa y maduración con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 8.71, 5.44 y 5.44 días respectivamente.

El agua residual a tratar es de tipo municipal con descargas de una empacadora de carnes, una fábrica de productos lácteos y un rastro municipal.

El trabajo para la determinación de los parámetros, se realizó en un sistema de lagunas ubicado en una región del Norte de México (altitud 2027 m.s.n.m, con una temperatura media en el mes más frío de 9.2°C); representativa de un clima seco estepario semicálido.

El sistema está formado por un desarenador, una laguna anaerobia de 160 m de largo, 80 m de ancho y 3.50 m de profundidad, una laguna facultativa y una de maduración con las siguientes dimensiones: 205 m de largo, 105 m de ancho y 1.30 m de profundidad.

La planta de tratamiento fue diseñada para un caudal de 63 l/s, una remoción de  $DBO_5$  del 99%, con TRH de 4 días para la laguna anaerobia y facultativa y 5 días para la de maduración; dentro de las consideraciones de diseño se estableció una carga volumétrica para la laguna anaerobia de 64.3 g  $DBO_5/m^3.día$  y una carga máxima de 400 Kg  $DBO_5/Ha.día$  para la laguna facultativa y de maduración.

En la determinación del comportamiento cinético y las condiciones operativas del sistema de tratamiento, se consideraron los criterios de evaluación que marca el Manual de Diseño y de Optimización de Sistemas de Lagunas elaborado en 1993.

Durante el trabajo de campo se tomaron muestras simples y muestras únicas en siete puntos, cubriendo un muestreo por 24 hrs, las muestras fueron tomadas a intervalos de una hora, desde las 8:00 a.m. y hasta las 4:00 p.m., y a intervalos de dos horas a partir de las 16 hrs. Se determinaron los siguientes parámetros: Flujo, pH, temperatura ambiente y del agua, insolación, nubosidad, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y profundidad de lodos, alcalinidad total, DBO<sub>5</sub> total, DQO total, coliformes fecales, coliformes totales, clorofila "a" y huevos de helmintos. Las muestras tomadas para el análisis de los distintos parámetros fueron colectadas en envases adecuados, preservados y analizados según lo recomienda el Standard Methods.

Para el cálculo de las constantes cinéticas por el método de flujo disperso, se utilizó un programa en QBasic (Pozo Román 1994) que se alimenta con los datos obtenidos de DBO<sub>5</sub> y coliformes fecales del efluente e influente, el valor de la constante de dispersión, el volumen de la laguna y el gasto. Se seleccionaron valores de las constantes obtenidas, utilizando un nivel de confianza del 80%. Con los datos recopilados también se calcularon las constantes K y Kb utilizando la ecuación que define el flujo con mezcla completa.

En el cálculo de la constante de diseño en la laguna anaerobia se utilizó el modelo de Vincent (1963) y Gloyna (1971); donde la reducción de la DBO<sub>5</sub> está relacionada principalmente con el tiempo de retención, la temperatura y la cantidad de lodos. El modelo es principalmente empírico basado en el método racional cinético y de mezcla completa que plantea:

$(S/S_o)^n = 1 / (1 + K_p a t)$	<p>Donde:</p> <p>S: DBO<sub>5</sub> del efluente, en mg/l</p> <p>S<sub>o</sub>: DBO<sub>5</sub> del influente, en mg/l</p> <p>t : tiempo de retención, en días</p> <p>K<sub>pa</sub>: constante de remoción de DBO<sub>5</sub>, en día<sup>-1</sup></p> <p>n: exponente que se determina experimentalmente, adimensional</p>
---------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

El exponente "n" es igual a 4 cuando la temperatura media es de 22°C y para alturas mayores a 2000 m.s.n.m.( CNA-IMTA, 1992). El valor de "n" varia de acuerdo a la altitud del lugar donde se encuentra la laguna.

En el sistema de lagunas la eficiencia de remoción de carga orgánica (DBO<sub>5</sub>) fue de 78.80 %, y de coliformes fecales 99.24%. Con respecto a las constantes cinéticas en la laguna anaerobia se determinó una K<sub>pa</sub> de 1.8 (día<sup>-1</sup>) bajo el modelo de Vincent.

Los coeficientes de correlación más altos se obtuvieron al aplicar el modelo de flujo disperso resultando una K de 0.3411 (día<sup>-1</sup>) y una K<sub>b</sub> de 1.4796 (día<sup>-1</sup>) en la laguna facultativa y una K de 0.0366 (día<sup>-1</sup>) y K<sub>b</sub> de 0.5704 (día<sup>-1</sup>) para la laguna de maduración.

- **Ciudad de La Habana, Cuba (Marianao)**

La construcción de sistemas de tratamiento de las aguas residuales requiere de un diseño adecuado. Para eso se han aplicado diferentes métodos, entre los que se encuentran el uso de ecuaciones empíricas así como el empleo de ecuaciones cinéticas para lo cual es necesario determinar, en ocasiones, constantes cinéticas que deben ser obtenidas mediante estudios pilotos. Entre las ecuaciones empíricas más utilizadas en el diseño de las lagunas de estabilización, así como de los sistemas acuáticos de tratamiento, se encuentra la obtenida al relacionar la CO<sub>a</sub> (carga orgánica superficial aplicada) y la CO<sub>r</sub> (carga orgánica superficial removida). Esta relación ha sido determinada por varios autores en distintas partes del mundo (Stowell y col., 1981; Hayes y col., 1987; DeBusk y Reddy, 1987; Rodríguez, 1997).

Estas ecuaciones son empíricas, sólo pueden ser utilizadas en el lugar donde fueron obtenidas, de aquí la importancia de su determinación a nivel de planta piloto. A pesar de no encontrarse en la literatura una norma específica acerca del uso de ecuaciones para el diseño de las lagunas de alta velocidad con residual pesquero, se decidió aplicar la relación antes mencionada a los datos hallados en dos plantas pilotos que respondían al tipo de sistema mencionado. Otra de las formas aplicada para el diseño de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales es mediante el empleo de ecuaciones matemáticas en las cuales se utilizan constantes de velocidad de remoción, que en ocasiones pueden aparecer en la literatura, pero siempre son obtenidas de forma particular en plantas piloto o sistemas a gran escala. Así lo enfatizan Gotaas y Oswald (1957) desde el comienzo de sus primeras investigaciones acerca del funcionamiento de las lagunas de alta velocidad.

Después de varios análisis empíricos, se determinaron las ecuaciones de diseño con respecto a la carga orgánica superficial aplicada (COa); carga orgánica superficial removida (CO<sub>r</sub>); carga orgánica volumétrica aplicada (CO<sub>va</sub>); carga orgánica volumétrica removida (CO<sub>vr</sub>) y la constante de biodegradabilidad (k) con la ayuda de la ecuación cinética de primer orden siguiente:

$\frac{C_e}{C_o} = e^{-kt}$	<p>donde:</p> <p>C<sub>e</sub>: concentración de DBO efluente (mg/l)</p> <p>C<sub>o</sub>: concentración de DBO afluente (mg/l)</p> <p>e: base de los logaritmos naturales</p> <p>k: constante de degradación biológica (día<sup>-1</sup>)</p> <p>t: tiempo (día)</p>
-----------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Para determinar estas ecuaciones se halló la DBO<sub>5</sub> del agua residual afluente al sistema de tratamiento, la DBO<sub>5</sub> del efluente total, que se corresponde con el agua residual con microalgas al término de la máxima producción fitoplanctónica y la DBO<sub>5</sub> del efluente soluble, que representa el sobrenadante derivado del efluente total, una vez separadas las microalgas del medio, según métodos del APHA (1995). El crecimiento celular se determinó con conteos en la cámara de Neubauer.

Los resultados obtenidos para el diseño de lagunas de alta velocidad en el tratamiento de las aguas residuales de la industria pesquera, para las condiciones cubanas son:

Los valores de (K) encontrados de forma gráfica al plotear el  $\ln (C_e/C_o)$  versus tiempo (t) fue de  $0,47 \text{ día}^{-1}$ , muy cercano al observado en Brasil por Figueiredo (1984) de  $0,41 (\text{día}^{-1})$  para TR de 6,5 (día) en una laguna fotosintética, utilizando residual doméstico.

Se demuestra que la citada ecuación matemática es válida para representar el proceso depurador que ocurre y que pudieran ser la base para el diseño de los mismos, aunque esta constante (K) puede depender, a su vez, de otros factores. La misma podría aplicarse con aproximaciones aceptables según lo señalan Díaz y Col. (1992).

- **Chile**

Mediante diferentes pruebas, para la determinación de factores que influyen en el dimensionamiento de las lagunas de estabilización, se obtienen relaciones directas, en el que se observa el grado de reacción requerido, para un caudal y concentración de reactantes definidos y la cinética de reacción. El caudal a tratar y la concentración de entrada y salida de reactantes están definidos por los requerimientos de diseño del sistema de reacción mientras que la cinética del proceso se debe obtener de observaciones empíricas, evaluadas a la escala de operación, para el mismo sistema.

La concentración de reactantes a la entrada y la salida, por diseño, será la  $\text{DBO}_5$  de entrada (de unos  $200 \text{ mg/l}$  para aguas servidas) y el requisito de salida que se imponga (por ejemplo de  $30 \text{ mg/l}$ ). Es claro que el sistema de tratamiento biológico se diseña sólo para el abatimiento bioquímico de  $\text{DBO}_5$  ya que los sólidos suspendidos se controlan en un sedimentador y los coliformes fecales en una unidad de desinfección.

Entonces, para diseñar el volumen del sistema, se debe citar la cinética del proceso. Los cálculos cinéticos se pueden reducir a expresiones empíricas extremadamente simples, mediante los factores o relaciones de carga volumétrica; tal como se definió en la introducción, se ha constatado que las lagunas aireadas funcionan para cargas por unidad de volumen desde 8 hasta 320 KgDBO<sub>5</sub> por cada 1000 m<sup>3</sup> por día. Este razonamiento podría utilizarse para calcular el volumen de reactor pero adolece de graves deficiencias pues no contempla, explícitamente, la relación existente entre concentración y cinética de reacción (o, en otros términos, supone demasiadas idealizaciones).

Las expresiones cinéticas más utilizadas en reactores bioquímicos siguen la forma matemática sugerida por Monod:

$$\frac{d[\text{DBO}_5]}{dt} = -\frac{\mu_{\text{MAX}} \cdot [\text{DBO}_5] \cdot X}{K_s + [\text{DBO}_5]} + \frac{Q}{V} \cdot ([\text{DBO}_5]_{\text{Entra}} - [\text{DBO}_5])$$

Donde:

DBO<sub>5</sub>: es la concentración en el sistema (que es igual a la de salida del sistema por la hipótesis de mezcla completa)

[DBO<sub>5</sub>]<sub>Entra</sub>: es la concentración de entrada al sistema

Q: es el flujo líquido a través del sistema

V: es el volumen del sistema;

X: es la concentración de microorganismos (usualmente expresado por los sólidos suspendidos volátiles en el sistema) y

$\mu_{\text{MAX}}$  y  $K_s$  son, precisamente, coeficientes intrínsecos del sistema que expresan la cinética de reacción.

Esta expresión depende, claramente, de la concentración de DBO<sub>5</sub> y de la densidad celular del sistema (X); se necesita por lo tanto, una expresión cinética para la biomasa, que resulta de similar estructura pero incorpora un tercer parámetro de productividad de nueva biomasa por unidad de orgánico digerido (el Yield). La expresión de Monod resulta prácticamente imperativa en diseño de reactores de lodos activados, sobre todo aquellos de bajo tiempo de residencia.

La misma expresión podría ser utilizada en lagunas aireadas, pero puede resultar innecesariamente detallada y complicada, pues requiere la determinación de tres parámetros ( $m_{MAX}$ ,  $K_S$  y un Yield).

Es también posible (y usual) utilizar una simple ley de primer orden. Tal hipótesis cinética resulta adecuada, sobre todo, al considerar que los sistemas de lagunas tienen (siempre) tiempos de residencia más bien extensos, de modo que las modificaciones de carga (flujo y  $DBO_5$ ) que se producen en el ciclo diario, no impactan significativamente. El balance de masa para un sistema cuya cinética sea de primer orden tiene la forma:

$$\frac{d[DBO_5]}{dt} = -K_c[DBO_5] + \frac{Q}{V} \cdot ([DBO_5]_{Entra} - [DBO_5])$$

Donde se observa que el balance de  $DBO_5$  del sistema sólo depende de un parámetro cinético (que hemos llamado  $K_c$ ) el que deberá ser medido para cada aplicación pero que, en diseños iniciales puede tomar valores de la literatura.

En el estado estacionario del sistema de reacción, se obtiene por simple despeje algebraico que:

$$K_c = \frac{Q}{V} \cdot \frac{([DBO_5]_{Entra} - [DBO_5])}{[DBO_5]}$$

Donde el término  $Q/V$  suele recibir el nombre de tiempo de residencia hidráulico (o tiempo de retención) y se representa por la letra griega tau ( $\tau$ ).

Al utilizar una serie de reactores, cada uno de ellos en mezcla completa y del mismo volumen, se aplica la misma expresión cinética para estado estacionario a cada uno de ellos. Se obtiene de allí una suma simple que despejada arroja una ley exponencial para el tiempo de residencia del sistema total, compuesto por "n" reactores idénticos en serie:



$$\tau = \frac{n}{K_c} \left\{ \left[ \frac{[\text{DBO}_5]_{\text{Entra}}}{[\text{DBO}_5]_{\text{Final}}} \right]^{\frac{1}{n}} - 1 \right\} = \frac{Q}{V}$$

Los estudios experimentales muestran que la constante de primer orden ( $K_C$ ) depende de la temperatura, la que puede variar significativamente a largo del año. Una buena descripción de la dependencia de la cinética con la temperatura se ha podido obtener de una ley exponencial tradicional:

$$K_{CT} = K_{C(20)} \cdot e^{(T-20)\theta}$$

Donde (T) es la temperatura de operación del sistema en grados centígrados y el parámetro ( $\theta$ ) se obtiene empíricamente para el sistema de reacción particular (mediante la medición de la cinética a distintas temperaturas y ajuste de curvas logarítmicas). Dado que al diseñar no existe el sistema final en operación, se utilizan valores de consenso, con criterios profesionales nacidos de la experiencia. Para esta discusión se utilizará el valor típico de ( $\theta$ ) de 1.085 y un  $K_{C(20)}$  de 2,5 día<sup>-1</sup>.

Es necesario, para el buen diseño de la constante cinética de primer orden, definir (estimar) la temperatura de diseño del agua en el sistema. Dado que la temperatura cambia a lo largo del año, se puede utilizar la temperatura más baja posible de observar a lo largo del año. La temperatura del agua en tratamiento (en las lagunas) depende de la temperatura de las aguas que salen del emisario de alcantarillado a tratamiento y de la temperatura del aire circundante, todo esto, en el peor caso del año.

La relación que permite relacionar las diversas temperaturas es la ya expuesta para el caso de la transferencia de oxígeno, debida a Mancini.

## **CAPITULO IV. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **4.1. Antecedentes**

Como se ha podido observar en los antecedentes descritos con anterioridad referidos en la bibliografía especializada, la determinación del valor correcto de las constantes cinéticas a utilizar,  $K$  (constante de degradación de la materia orgánica considerada para las lagunas aeróbicas y facultativas) y  $K_{pa}$  (constante de reacción considerada en las lagunas anaeróbicas), viene a ser un problema frecuente a la hora del diseño de estos dispositivos de tratamiento (las lagunas de estabilización), ya que este valor es afectado por parámetros ambientales, de altura sobre el nivel medio del mar y de la carga orgánica a tratar, razón esta que no permite recomendar un valor general, siendo la tendencia la de determinar estos valores en forma regional y generar ecuaciones de diseño en función de los parámetros que más le afecten en cada lugar.

Por las razones antes mencionadas, es que en el presente trabajo se pretende realizar una investigación experimental a nivel de prototipo, basada en el ordenamiento, procesamiento, análisis y obtención de resultados, a partir de los datos de los ensayos de laboratorio, haciendo uso de técnicas matemáticas que permitan el establecimiento de los parámetros de diseño de las lagunas de estabilización para las condiciones estudiadas, específicamente para las condiciones de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

En este trabajo se determinarán las constantes cinéticas de carga orgánica  $K$  (constante de degradación de la materia orgánica considerada para las lagunas aeróbicas y facultativas) y  $K_{pa}$  (constante de reacción considerada en las lagunas anaeróbicas), para los sistemas de lagunas ubicados en la región, con una altitud promedio de 400 m.s.n.m y una temperatura media de 24,5°C; representativa del clima tropical imperante en la región de estudio.

Para el desarrollo del trabajo de campo, se recomienda la toma de muestras simples y muestras únicas en los puntos de entrada y salida de cada tipo de laguna, para lo que se deberán determinar los siguientes parámetros:

- \* Flujo
- \* pH
- \* temperatura ambiente y del agua
- \* DBO<sub>5</sub> total
- \* DQO total
- \* coliformes fecales
- \* coliformes totales

Las muestras a ser tomadas para el análisis de los distintos parámetros deben ser colectadas en envases adecuados, preservados y analizados según lo recomienda el Standard Methods.

Para el cálculo de las constantes cinéticas se deberá elaborar una planilla que se alimente con los datos obtenidos de DBO<sub>5</sub>, y coliformes fecales del efluente e influente, las dimensiones de la laguna, el tiempo de retención y el caudal de circulación.

Con los datos recopilados se calcularán las constantes cinéticas K, K<sub>pa</sub> y K<sub>b</sub>, utilizando las ecuaciones que define el flujo con mezcla completa, las cuales son:

- a. En el cálculo de la constante de diseño en la laguna aerobia y facultativa (K), se deberá utilizar el modelo del Método racional basado en la cinética del proceso desarrollado por Marais, Shaw y otros, donde la reducción de la DBO<sub>5</sub> está relacionada principalmente con el tiempo de retención, la temperatura y la cantidad de lodos. El modelo es principalmente empírico y plantea las siguientes premisas:
  - \* Para un tiempo de retención cualquiera, la mezcla es completa e instantánea.

- \* El modelo está basado en un balance de masa alrededor de la laguna, el cual se expresa a través de la siguiente ecuación:

$S_e = \frac{S_a}{K \cdot t_r + 1}$	<p>Donde</p> <p><math>S_e</math> = DBO<sub>5</sub> efluente, en (mg / l)</p> <p><math>S_a</math> = DBO<sub>5</sub> afluente, en (mg / l)</p> <p><math>t_r</math> = tiempo de retención, en (días)</p> <p><math>K = \theta^{(T-20^\circ \text{C})}</math>: constante de degradación de la materia orgánica, en (día<sup>-1</sup>)</p> <p><math>\theta = 1,047</math></p> <p><math>T</math> = temperatura promedio del agua en el mes más frío, en (°C)</p>
-------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

- b. Por su parte para el cálculo de la constante de diseño en la laguna anaerobia ( $K_{pa}$ ), se deberá utilizar el modelo de Vincent (1963), donde la reducción de la DBO<sub>5</sub> está relacionada principalmente con el tiempo de retención, la temperatura y la cantidad de lodos. El modelo es principalmente empírico y está basado en el método racional cinético y de mezcla completa que plantea:

$S_e = \frac{S_a}{K_{pa} \left( \frac{S_e}{S_a} \right)^n t_r + 1}$	<p>Donde :</p> <p><math>\frac{S_e}{S_a} = 0,3 \sim 0,5</math> (según Vincent)</p> <p><math>S_e</math> = DBO<sub>5</sub> efluente (mg / l)</p> <p><math>S_a</math> = DBO<sub>5</sub> afluente (mg / l)</p> <p><math>t_r = 4 \sim 6</math> días tiempo de retención, en (días)</p> <p><math>K_{pa}</math> = constante de reacción en lagunas anaerobias, (día<sup>-1</sup>)</p> <p><math>n</math> = constante adimensional</p>
---------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tanto el valor de ( $K_{pa}$ ), como el de ( $n$ ) dependen de la temperatura y el clima.

- c. El cálculo del decaimiento bacteriano ( $K_b$ ), se realizó a partir de la expresión de Thirimurthi, válida para lagunas aeróbicas, facultativas y anaeróbicas, que a continuación se presenta:

$\frac{N}{N_o} = \frac{4 \cdot ab \cdot e^{\left(\frac{1-ab}{2d}\right)}}{(1+ab)^2}$	<p>Donde</p> <p><math>d</math> = dispersión</p> <p><math>N</math> = concentración de coliformes en el efluente (NMP/100 ml)</p> <p><math>N_o</math> = concentración de coliformes en el afluente (NMP/100 ml)</p> <p><math>ab = (1 + 4 K_b t_r d)^{0.5}</math>: parámetro adimensional</p> <p><math>K_b = 0,622677 \cdot (1,037409)^{(T-20)}</math>: razón de decaimiento coli-fecal (<math>\text{día}^{-1}</math>)</p> <p><math>t_r</math> = tiempo de retención (días)</p> <p><math>T</math> = temperatura promedio del agua (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</p>
--------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 4.2. Metodología a seguir para el procesamiento y análisis de la información

Para la determinación del valor de las constantes cinéticas para las condiciones ambientales y de carga orgánica en Santa Cruz de la Sierra, se seguirán los siguientes pasos:

- 1°. Recopilación de la información existente sobre los sistemas de lagunas construidos en Santa Cruz de la Sierra.
- 2°. Caracterizar el tipo de agua residual tratado en el sistema de lagunas, así como las condiciones ambientales en que se realiza el tratamiento (ubicación del sistema, altitud, temperatura media en el mes más frío y tipo de clima).
- 3°. Describir los elementos que componen el sistema de tratamiento (estación elevatoria, cámara de rejillas, desarenador, laguna anaerobia, laguna facultativa y laguna de maduración).

4°. Describir los parámetros de diseño fundamentales con los que fue diseñado la planta de tratamiento (caudal,  $DBO_5$  afluente,  $DBO_5$  efluente, tiempo de retención hidráulico (TRH) en cada laguna, eficiencia en la remoción de  $DBO_5$  y carga superficial en cada laguna).

5°. Determinación de las constantes cinéticas de carga orgánica ( $K_{pa}$ ) para las lagunas anaeróbicas, ( $K$ ) para las lagunas facultativas y de maduración (aerobias) y ( $K_b$ ) de decaimiento bacteriano, en los sistemas de lagunas ubicados en la región de Santa Cruz de la Sierra.

Para el cálculo de las constantes cinéticas se deberá elaborar una planilla en la cual se introduzcan los datos obtenidos de  $DBO_5$  afluente y efluente, coliformes fecales del afluente y efluente, las dimensiones de la laguna, el tiempo de retención y el caudal de circulación.

Para el cálculo de la constante de diseño en la laguna anaerobia se utilizará el modelo de Vincent (1963), donde la reducción de la  $DBO_5$  está relacionada principalmente con el tiempo de retención, la temperatura y la cantidad de lodos.

Para el cálculo de las lagunas facultativas y aerobias se empleará el modelo del Método racional basado en la cinética del proceso desarrollado por Marais, Shaw y otros, donde la reducción de la  $DBO_5$  está relacionada principalmente con el tiempo de retención, la temperatura y la cantidad de lodos.

6°. Análisis de los resultados obtenidos y comparación de los mismos con los valores registrados en la bibliografía especializada.

## CAPITULO V. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

### 5.1. Resumen de la información obtenida para los diferentes sistemas de tratamientos localizados en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra

La información que se detalla a continuación en los siguientes cuadros, es la que se ha podido obtener del medio y por ende la que se empleará en el presente estudio. La misma refleja los resultados de los análisis físico químicos y bacteriológicos, correspondiente a los sistemas de tratamiento de agua residual por medio de lagunas de estabilización, que se localizan en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra.

SISTEMA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
I	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	6919	6919	-
	Sólidos en suspensión	(mg/l)	1408	111	92,12
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	1647	47	97,15
	DQO	(mg/l)	2342	253	89,20
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	9,3 E+07	5,3 E+03	99,99

SISTEMA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
II	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31217	31217	-
	Sólidos en suspensión	(mg/l)	343	93	72,89
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	308	43	86,04
	DQO	(mg/l)	678	149	78,02
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	7,5 E+07	4,3 E+03	99,99

SISTEMA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
III	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31677	31677	-
	Sólidos en suspensión	(mg/l)	413	86	79,18
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	340	45	86,76
	DQO	(mg/l)	739	155	79,03
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	4,3 E+07	4,9 E+03	99,99

SISTEMA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	EFICIENCIA (%)
IV	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	18282	18282	-
	Sólidos en suspensión	(mg/l)	514	86	83,27
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	346	31	91,04
	DQO	(mg/l)	739	117	84,17
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	2,3 E+07	8,8 E+02	99,99

SISTEMA V										
PARAMETRO	TEMPERATURA		PH		SOLIDOS EN SUSPENSION		DBO <sub>5</sub>		OXIGENO DISUELTO	
Resultados Estadísticos	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET
Media	36,45	25,9	5,22	7,27	2426	185,3	5239	785	1,87	4
Mediana	38	26,5	5	7,3	998	148	3900	352,8	0,5	2,5
Desviación estándar	6,7	3,7	1,16	1,56	3636	170,2			3,2	3,53
R. Mínimo	26	20	4,3	5	92	40	808	12,3	0,0	0
R. Máximo	47	30	7,69	9	10184	447	14025	3330	8,8	9
Nº Datos	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

SISTEMA VI										
PARAMETRO	TEMPERATURA		PH		SOLIDOS EN SUSPENSION		DBO <sub>5</sub>		OXIGENO DISUELTO	
Resultados Estadísticos	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET
Media	33,84	34,1	5,81	5,95	209	231,4	727,68	1127,6	2,08	4,3
Mediana	30	30	6	6,27	209	181,5	946	946	2,0	2,7
Desviación estándar	9,14	9,67	0,81	0,48	-	219,6	387	1513,6	0,96	1,26
R. Mínimo	24	24	4,7	4,7	-	32	524	25,08	1,0	1
R. Máximo	45	45,5	6,78	6,66	-	592	1051	4420	3,2	4
Nº Datos	5	7	5	7	-	6	5	7	5	7

SISTEMA VII										
PARAMETRO	TEMPERATURA		PH		SOLIDOS EN SUSPENSION		DBO <sub>5</sub>		OXIGENO DISUELTO	
Resultados Estadísticos	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET
Media	36,4	29,6	6,26	6,91	1006,2	514	1338,9	519	1,47	6,32
Mediana	39,5	25	6,12	7,12	292	168	900	48,75	1,17	3,6
Desviación estándar	7,38	10,98	0,63	1,5	1203,1	914,1	1340	1063,8	0,43	4,12
R. Mínimo	26	16,6	5,7	4,77	100	31	23,3	17,2	0,0	0
R. Máximo	45	45	7,24	9,02	2896	2370	3100	2680	2,05	11,55
Nº Datos	6	6	6	6	5	6	5	6	6	6



SISTEMA VIII										
PARAMETRO	TEMPERATURA		PH		SOLIDOS EN SUSPENSION		DBO <sub>5</sub>		OXIGENO DISUELTO	
Resultados Estadísticos	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET
Media	31,01	30,35	7,83	7,95	253,9	159,83	396,08	349,3	2,36	4,4
Mediana	30	30	7,25	7,93	297,5	157,5	270	137,58	1,55	3,6
Desviación estándar	5,47	5,38	1,99	1,9	155,1	142,48	403,4	432	2,66	3
R. Mínimo	23,5	23,5	5,6	5,6	35	11	7,9	7,9	0,1	1
R. Máximo	38	36,6	10,34	10,34	453,9	330	940	940	6,9	9,2
Nº Datos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

SISTEMA IX										
PARAMETRO	TEMPERATURA		PH		SOLIDOS EN SUSPENSION		DBO <sub>5</sub>		OXIGENO DISUELTO	
Resultados Estadísticos	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET	A	ET
Media	31,6	28,8	5,3	5,97	391,8	225,4	4068,3	2140,4	0,99	3,63
Mediana	29	27	5,53	5,71	472	96	3826	2508	1,00	1,95
Desviación estándar	5,45	7,88	0,84	1,49	228	229,4	2443,4	1788,7	0,95	1,11
R. Mínimo	25	20	4,38	4,57	70	70	685	95	0,10	0,10
R. Máximo	41	41	6,38	8,09	608,4	608,4	7800	3830	2,00	4,40
Nº Datos	5	5	5	5	5	5	6	6	5	5

## 5.2. Procesamiento de la información

Luego del análisis de la información obtenida y que fuera mostrada en el acápite anterior, se decidió trabajar en el presente estudio, con los sistemas del uno al cuarto, partiendo del criterio que reúnen toda la información necesaria para la obtención de los parámetros objeto de estudio. Estos sistemas de tratamiento de agua residual, se localizan en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, y están compuestos por lagunas anaerobias, facultativas y de maduración(aerobias).

A continuación se presenta la información disponible en cada sistema, así como los resultados del procesamiento misma, donde se determinaron las constantes cinéticas de carga orgánica ( $K_{pa}$ ) para las lagunas anaeróbicas, ( $K$ ) para las lagunas facultativas y de maduración (aeróbicas) y ( $K_b$ ) de decaimiento bacteriano. Es importante resaltar que para la obtención de estos parámetros se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- a. El cálculo de las constantes cinéticas se realizó a partir de una planilla que fue alimentada con los datos de  $DBO_5$  del afluente y el efluente, los coliformes fecales del afluente y el efluente, las dimensiones de la laguna, el tiempo de retención y el caudal de circulación.
- b. El cálculo de la constante de diseño en la laguna anaerobia ( $K_{pa}$ ), se realizó con el modelo de Vincent (1963).
- c. El cálculo de la constante de diseño ( $K$ ) de las lagunas facultativas y de maduración, se realizó con el modelo del Método racional basado en la cinética del proceso desarrollado por Marais, Shaw y otros.
- c. El cálculo de la constante de decaimiento bacteriano ( $K_b$ ), se realizó a partir de la expresión de Thirimurthi, válida para lagunas anaerobias, facultativas y de maduración.

## SISTEMA N° 1

<b>Ubicación:</b>	Santa Cruz de la Sierra (Bolivia)
<b>Altitud:</b>	400 (m.s.n.m)
<b>Temperatura media anual:</b>	24,5°C
<b>Temperatura media en el mes más frío:</b>	15,0°C
<b>Tipo de clima:</b>	Tropical
<b>Tipo de agua residual a tratar:</b>	Descargas agro industriales
<b>Elementos que componen el sistema:</b>	Cámara de rejás Lagunas anaerobias Lagunas facultativas Lagunas de maduración

### Parámetros de diseño:

TIPO DE LAGUNA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	Constante cinética (día <sup>-1</sup> )	Razón de decaimiento bacteriano (día <sup>-1</sup> )
ANAERÓBIA	Caudal Promedio	(m³/día)	6919	6919	Kpa = 3,45	Kb = 0,38
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	1647	299		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	9,30E+07	2,92E+05		
	Area	(Ha)	4,69			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	2427,87			
FACULTATIVA	Caudal Promedio	(m³/día)	6919	6919	K = 0,24	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	299	161,64		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	2,92E+05	1,87E+04		
	Area	(Ha)	2,78			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	747,06			
MADURACIÓN	Caudal Promedio	(m³/día)	6919	6919	K = 0,24	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	161,64	47		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	1,87E+04	5,32E+03		
	Area	(Ha)	2,08			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	289,43			
Tiempo total del sistema		días	30			

## SISTEMA N° 2

<b>Ubicación:</b>	Santa Cruz de la Sierra (Bolivia)
<b>Altitud:</b>	400 (m.s.n.m)
<b>Temperatura media anual:</b>	24,5°C
<b>Temperatura media en el mes más frío:</b>	15,0°C
<b>Tipo de clima:</b>	Tropical
<b>Tipo de agua residual a tratar:</b>	Tipo municipal
<b>Elementos que componen el sistema:</b>	Cámara de rejás Lagunas anaerobias Lagunas facultativas Lagunas de maduración

### Parámetros de diseño:

TIPO DE LAGUNA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	Constante cinética (día <sup>-1</sup> )	Razón de decaimiento bacteriano (día <sup>-1</sup> )
ANAERÓBIA	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31217	31217	Kpa = 3,50	Kb = 0,86
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	308	248,18		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	7,50E+07	6,25E+06		
	Area	(Ha)	3,67			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	2623,31			
FACULTATIVA	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31217	31217	K = 0,20	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	248,18	154,70		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	6,25E+06	5,22E+05		
	Area	(Ha)	4,64			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	1497,93			
MADURACIÓN	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31217	31217	K = 0,20	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	154,70	51,81		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	5,22E+05	4,32E+03		
	Area	(Ha)	14,01			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	287,33			
Tiempo total del sistema		días	12			

### SISTEMA N° 3

<b>Ubicación:</b>	Santa Cruz de la Sierra (Bolivia)
<b>Altitud:</b>	400 (m.s.n.m)
<b>Temperatura media anual:</b>	24,5°C
<b>Temperatura media en el mes más frío:</b>	15,0°C
<b>Tipo de clima:</b>	Tropical
<b>Tipo de agua residual a tratar:</b>	Tipo municipal
<b>Elementos que componen el sistema:</b>	Cámara de rejás Lagunas anaerobias Lagunas facultativas Lagunas de maduración

#### Parámetros de diseño:

TIPO DE LAGUNA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	Constante cinética (día <sup>-1</sup> )	Razón de decaimiento bacteriano (día <sup>-1</sup> )
ANAERÓBIA	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31677	31677	Kpa = 3,70	Kb = 1,22
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	340	273,96		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	4,30E+07	4,17E+06		
	Area	(Ha)	2,39			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	4505,26			
FACULTATIVA	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31677	31677	K = 0,35	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	273,96	150,32		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	4,17E+06	4,10E+05		
	Area	(Ha)	3,14			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	2767,25			
MADURACIÓN	Caudal Promedio	(m <sup>3</sup> /día)	31677	31677	K = 0,35	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	150,32	45,26		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	4,10E+05	4,90E+03		
	Area	(Ha)	9,47			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	502,95			
Tiempo total del sistema		días	8			

## SISTEMA N° 4

<b>Ubicación:</b>	Santa Cruz de la Sierra (Bolivia)
<b>Altitud:</b>	400 (m.s.n.m)
<b>Temperatura media anual:</b>	24,5°C
<b>Temperatura media en el mes más frío:</b>	15,0°C
<b>Tipo de clima:</b>	Tropical
<b>Tipo de agua residual a tratar:</b>	Tipo municipal
<b>Elementos que componen el sistema:</b>	Cámara de rejás Lagunas anaerobias Lagunas facultativas Lagunas de maduración

### Parámetros de diseño:

TIPO DE LAGUNA	PARÁMETRO	UNIDAD	AFLUENTE	EFLUENTE	Constante cinética (día <sup>-1</sup> )	Razón de decaimiento bacteriano (día <sup>-1</sup> )
ANAERÓBIA	Caudal Promedio	(m³/día)	18282	18282	Kpa = 3,75	Kb = 1,58
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	346,00	272,24		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	2,30E+07	1,14E+06		
	Area	(Ha)	1,51			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	4177,05			
FACULTATIVA	Caudal Promedio	(m³/día)	18282	18282	K = 0,54	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	272,24	176,78		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	1,14E+06	2,55E+05		
	Area	(Ha)	0,96			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	5166,45			
MADURACIÓN	Caudal Promedio	(m³/día)	18282	18282	K = 0,54	
	DBO <sub>5</sub>	(mg/l)	176,78	31,43		
	Coliformes Fecales	(NMP/100 cc)	2,55E+05	8,80E+02		
	Area	(Ha)	5,66			
	Carga superficial	(kgDBO <sub>5</sub> /Ha.día)	571,36			
Tiempo total del sistema		días	7			

### 5.3. Análisis de los resultados obtenidos

Para el análisis de los resultados obtenidos, en la tabla 5.1, se presenta un resumen de la información más relevante a los efectos del presente trabajo.

TIPO DE LAGUNA	PARÁMETRO	SISTEMA Nº1	SISTEMA Nº2	SISTEMA Nº3	SISTEMA Nº4
ANAEROBIA	Kpa ( $\text{día}^{-1}$ )	3,45	3,50	3,70	3,75
	tr (en la laguna)	12,00	3,00	2,00	2,00
	Eficiencia en la remoción de $\text{DBO}_5$	64,33	27,67	20,36	20,59
FACULTATIVA/MADURACION	K ( $\text{día}^{-1}$ )	0,24	0,24	0,35	0,54
	tr (en la laguna)	12,00	9,00	6,00	5,00
	Eficiencia en la remoción de $\text{DBO}_5$	86,61	80,62	78,99	77,95
RAZÓN DE DECAIMIENTO BACTERIANO	Kb ( $\text{día}^{-1}$ )	0,38	0,86	1,22	1,58
TIEMPO DE RETENCIÓN TOTAL DEL SISTEMA (días)	tr (en el sistema)	30,00	12,00	8,00	7,00
EFICIENCIA DEL SISTEMA (%)	Eficiencia en la remoción de coliformes	97,15	85,98	85,10	85,04
AREA TOTAL	A (Ha)	9,55	22,31	14,99	8,13

Tabla 5.1, Resumen de los resultados más relevantes obtenidos en el presente estudio

Del análisis de los resultados que se presentan en la tabla 5.1, se puede concluir que:

1. Los valores que se presentan, fueron obtenidos a partir del estudio realizado en cuatro sistemas, integrados por lagunas ubicadas en serie: anaerobias, facultativas y de maduración con tiempos de retención hidráulica (TRH) que varían entre los 7 a 30 días respectivamente.
2. Todos los sistemas estudiados se localizan en el departamento de Santa Cruz, donde la altitud alcanza el valor promedio de 400 (m.s.n.m), con una temperatura media en el mes más frío de  $15^{\circ}\text{C}$ ; representativa de un clima tropical.

3. Los valores de la constante cinética ( $K_{pa}$ ), obtenidos para las lagunas anaeróbicas oscilan entre los (3,45 - 3,75 día<sup>-1</sup>).
4. Los valores de la constante cinética ( $K$ ), obtenidos para las lagunas facultativas y de maduración (aerobias) oscilan entre los (0,24 - 0,54 día<sup>-1</sup>).
5. Los valores de la razón de decaimiento bacteriano ( $K_b$ ), obtenidos para los diferentes sistemas de lagunas estudiados, oscilan entre los (0,38 - 1,58 día<sup>-1</sup>).
6. La eficiencia lograda en las lagunas anaerobias, alcanzó un máximo del 64 (%).
7. La eficiencia lograda en las lagunas facultativas y de maduración (aerobias) alcanzó un máximo del 86 (%).
8. La eficiencia lograda en la remoción de coliformes fecales en los sistemas estudiados alcanzó un máximo del 97 (%).

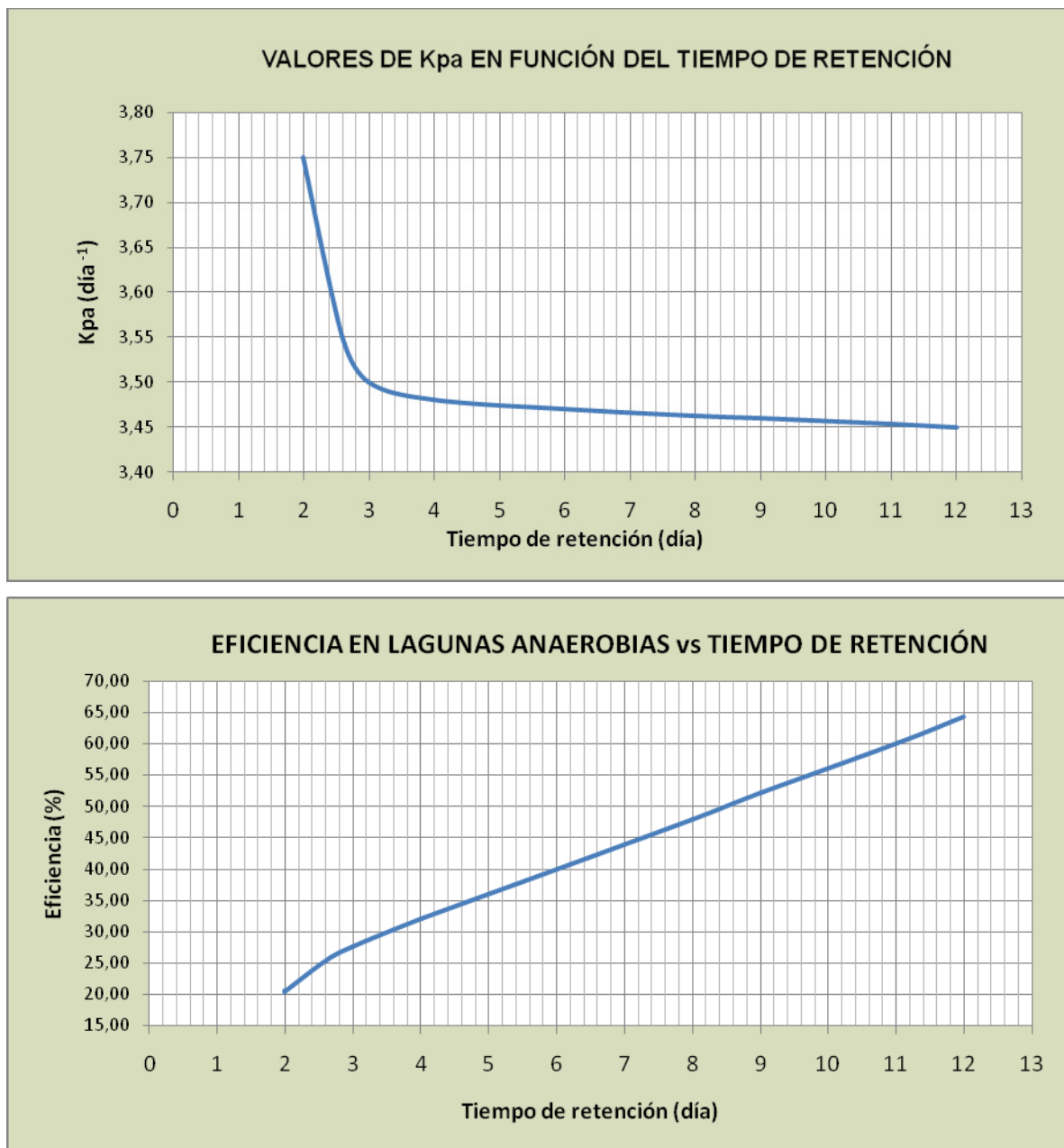
#### **5.4. Elaboración de los gráficos con los parámetros a emplearse en el diseño de las lagunas de estabilización para las condiciones de Santa Cruz de la Sierra o similares**

Tomándose en cuenta los resultados alcanzados en el presente estudio, se procedió a la elaboración de los gráficos que se muestran en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 respectivamente, las mismas que podrán ser empleadas para el diseño de las lagunas de estabilización en el departamento de Santa Cruz y en lugares con condiciones similares a las estudiadas.

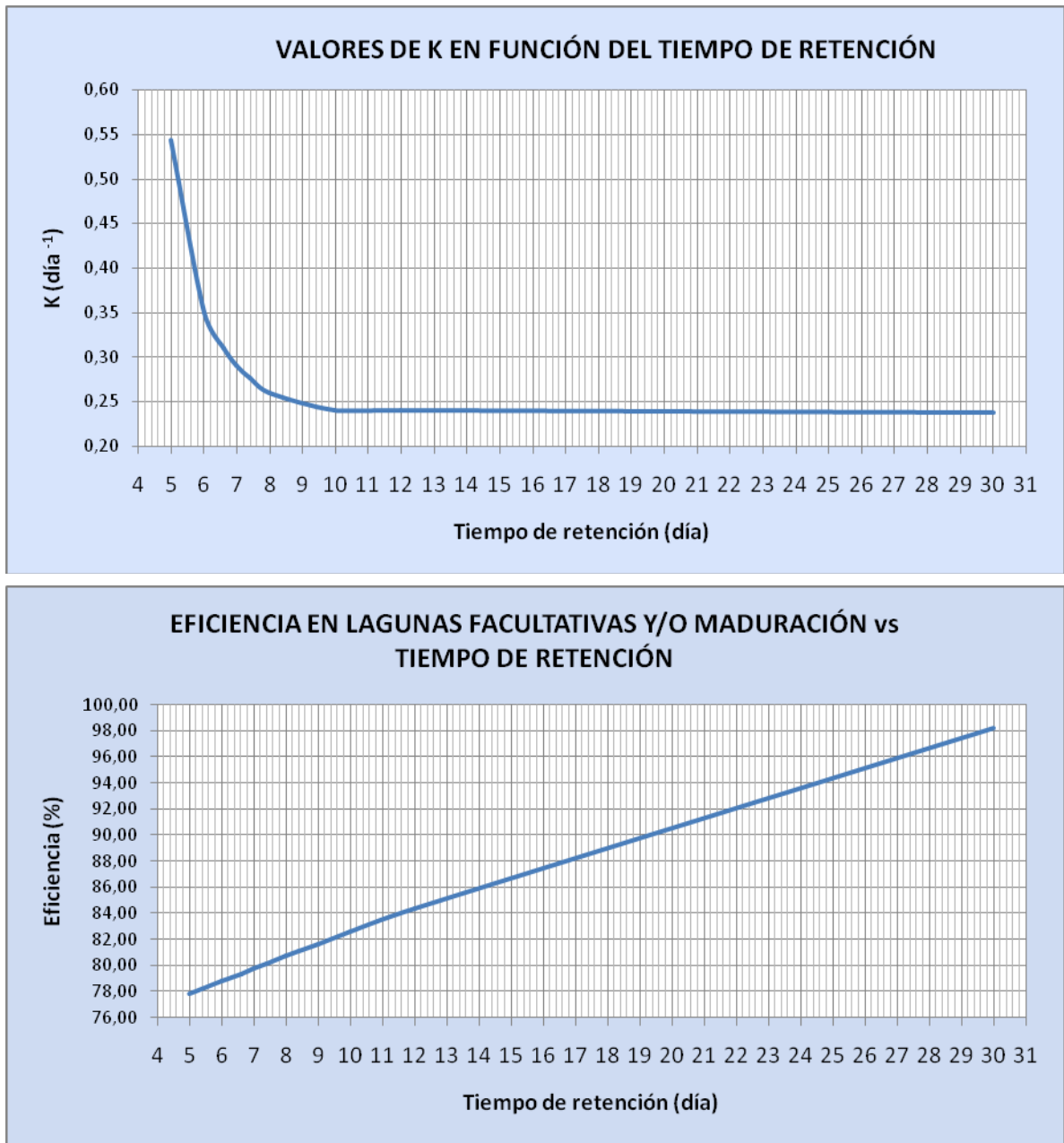
Los gráficos que se muestran en las figuras 5.1 y 5.2, permiten obtener los valores de las constantes cinéticas, ( $K_{pa}$ ) para las lagunas anaerobias y ( $K$ ) para las lagunas facultativas y de maduración y la eficiencia en la remoción de la  $DBO_5$ , a partir de ingresar en el gráfico respectivo, con el tiempo de retención adoptado para el tipo de laguna que se diseñe.



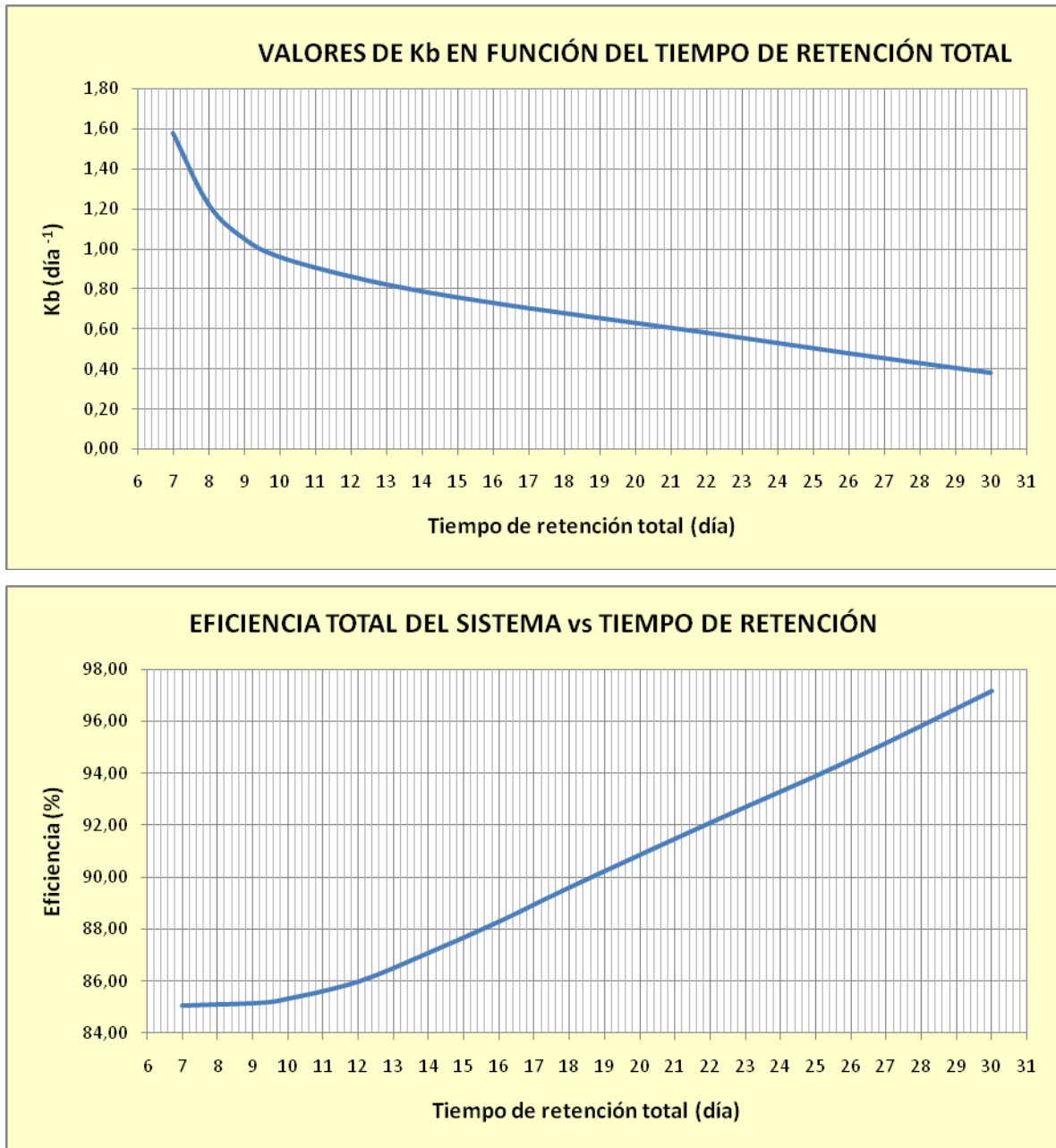
En el caso específico del gráfico que se presenta en la figura 5.3, correspondiente a la razón de decaimiento bacteriano ( $K_b$ ) y la eficiencia en la remoción de los coliformes fecales en el sistema, es importante resaltar que a diferencia de los gráficos anteriormente mencionados donde se ingresa con el tiempo de retención de la laguna, allí se deberá ingresar con el tiempo de retención total del sistema (la suma de todos los tiempos de cada laguna que conforman el sistema).



**Figura 5.1. Parámetros para el diseño de las lagunas anaerobias**



**Figura 5.2. Parámetros para el diseño de las lagunas facultativas y de maduración**



**Figura 5.3. Gráfico para la obtención de la razón de decaimiento bacteriano y la eficiencia respectiva**

Del análisis de la figura 5.1, donde se presentan los parámetros para el diseño de las lagunas anaerobias, se puede concluir que:

1. Los mayores valores de la constante cinética ( $K_{pa}$ ), se obtienen para tiempos de retención muy bajos, pero sin embargo en contraposición a lo anterior, es en esta zona donde precisamente se obtiene la menor eficiencia de remoción de  $DBO_5$ .
2. A diferencia de lo que plantea la bibliografía especializada en relación con la recomendación de que el tiempo de retención que se deberá asumir para el diseño de las lagunas anaerobias deberá ser adoptado entre los 4 a 12 días, se recomienda que en el caso de Santa Cruz, este valor se asuma entre los 6 a 12 días, ya que para tiempos de retención menores a los 6 días, la eficiencia en la remoción de la  $DBO_5$ , resulta inferior al 40 (%), recomendado como valor mínimo para este tipo de laguna.
3. A la hora de emplear estos gráficos en el diseño de las lagunas anaerobias, se debe fijar inicialmente el tiempo de retención entre los valores recomendados de 6 a 12 días, y con el valor adoptado, se obtenga de la curva correspondiente el valor de la eficiencia en la remoción de la  $DBO_5$  y la constante cinética ( $K_{pa}$ ) a emplear en el diseño.

Del análisis de la figura 5.2, donde se presentan los parámetros para el diseño de las lagunas facultativas y de maduración (aerobias), se puede concluir que:

1. Los mayores valores de la constante cinética ( $K$ ), se obtienen para tiempos de retención muy bajos, pero sin embargo en contraposición a lo anterior, es en esta zona donde precisamente se obtiene la menor eficiencia de remoción de  $DBO_5$ .
2. El tiempo mínimo que deberá adoptarse para el caso de las lagunas facultativas y aerobias (denominadas de maduración), deberá ser de 7 (días), tal y como lo plantea la bibliografía especializada, ya que para valores inferiores a este la eficiencia que se alcanza es inferior al 80 (%).

3. Para valores de tiempos de retención superiores a los 12 (días), la constante cinética ( $K$ ) se mantiene prácticamente constante, mientras que la eficiencia en la remoción de  $DBO_5$  se incrementa, llegando a alcanzar un máximo del 98 (%) al cabo de los 30 (días). Este resultado justifica la recomendación de la bibliografía especializada de adoptar valores de tiempos de retención para estos tipos de lagunas hasta los 30 (días).
4. Para el diseño de las lagunas facultativas y aerobias, se deberán adoptar valores de tiempos de retención entre los 7 a 30 (días), ya que la eficiencia en la remoción de  $DBO_5$  que se alcanza en estos casos supera el 80 (%) y alcanza un máximo del 98 (%).
5. A la hora de emplear estos gráficos en el diseño de las lagunas facultativas y aerobias, se debe fijar inicialmente el tiempo de retención entre los valores recomendados de 7 a 30 días, y con el valor adoptado, se obtiene de la curva correspondiente el valor de la eficiencia en la remoción de la  $DBO_5$  y la constante cinética ( $K$ ) a emplear en el diseño.

Del análisis de la figura 5.3, donde se presentan las curvas para la obtención de la razón de decaimiento bacteriano y la eficiencia en la remoción de coliformes fecales, se puede concluir que:

1. La eficiencia en la remoción de coliformes fecales, aumenta de forma directa con el incremento del tiempo de retención del sistema.
2. El valor de la razón de decaimiento ( $K_b$ ), disminuye en la medida en que aumenta el tiempo de retención, lo que implica que este parámetro no sólo depende de la temperatura promedio del agua tal y como se refleja en la bibliografía especializada, sino que también influye en su valor el tiempo de retención que se adopte en el sistema diseñado.

3. A la hora de emplear estos gráficos en el diseño de las lagunas de estabilización, se debe fijar inicialmente el tiempo de retención total del sistema a diseñar, y con el valor adoptado, se obtiene de la curva correspondiente el valor de la eficiencia en la remoción de coliformes fecales y el valor de la razón de decaimiento ( $K_b$ ) a utilizar en el diseño.

## **CAPITULO VI. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. Conclusiones generales**

1. Los resultados que se presentan en el trabajo, fueron obtenidos a partir del estudio realizado en cuatro sistemas de lagunas, integrados por lagunas ubicadas en serie: anaerobias, facultativas y de maduración (aerobias) con tiempos de retención hidráulica (TRH) que varían entre los 7 a 30 días respectivamente.
2. Los sistemas estudiados se localizan en el departamento de Santa Cruz, donde la altitud alcanza el valor promedio de 400 (m.s.n.m), con una temperatura media en el mes más frío de 15°C; representativa de un clima tropical.
3. Los valores de la constante cinética ( $K_{pa}$ ), obtenidos para las lagunas anaeróbicas oscilan entre los (3,45 - 3,75 día<sup>-1</sup>).
4. Los valores de la constante cinética ( $K$ ), obtenidos para las lagunas facultativas y de maduración (aerobias) oscilan entre los (0,20 - 0,54 día<sup>-1</sup>).
5. Los valores de la razón de decaimiento bacteriano ( $K_b$ ), obtenidos para los diferentes sistemas de lagunas estudiados, oscilan entre los (0,38 - 1,58 día<sup>-1</sup>).

### **6.2. Recomendaciones**

1. Se recomienda el empleo de de la figura 5.1 para obtener el valor de la constante cinética ( $K_{pa}$ ) y la eficiencia en la remoción de la  $DBO_5$ , a utilizar en el diseño de las lagunas anaerobias, debiéndose ingresar para ello, con el valor del tiempo de retención adoptado para la laguna objeto de cálculo.

2. Se recomienda para las condiciones específicas de Santa Cruz, se adopte para el diseño de las lagunas anaerobias, tiempos de retención entre los 6 a 12 días, ya que para valores inferiores, la eficiencia en la remoción de la  $DBO_5$  resulta inferior al 40 (%), recomendado como valor mínimo para este tipo de laguna.
3. Se recomienda el uso de la figura 5.2 para obtener el valor de la constante cinética (K) y la eficiencia en la remoción de la  $DBO_5$ , a utilizar en el diseño de las lagunas facultativas y de maduración, debiéndose ingresar para ello, con el valor del tiempo de retención adoptado para la laguna objeto de cálculo.
4. Se recomienda el uso de la figura 5.3 para obtener el valor de la razón de decaimiento bacteriano ( $K_b$ ) y la eficiencia en la remoción de los coliformes fecales en el sistema, debiéndose ingresar para ello, con el valor del tiempo de retención total adoptado para el sistema de lagunas.
5. Se recomienda el empleo de los resultados que se presentan en el trabajo, para el diseño de las lagunas de estabilización que se localizan en el departamento de Santa Cruz o lugares con condiciones similares, donde la altitud alcanza el valor promedio de 400 (m.s.n.m), con una temperatura media en el mes más frío de 15°C; representativa de un clima tropical.
6. Se recomienda para el diseño de las lagunas facultativas y aerobias, se adopten valores de tiempos de retención entre los 7 a 30 (días), ya que la eficiencia en la remoción de  $DBO_5$  que se alcanza en estos casos supera el 80 (%) y alcanza un máximo del 98 (%).



## **BIBLIOGRAFÍA**

Allende, I. V: Tratamiento de aguas residuales. Conferencias.

Babbitt & Baumann: Alcantarillado y tratamiento de aguas negras, Editorial Continental S.A. México, 1958.

Barnes, G: Tratamiento de aguas negras y desechos industriales, Manuales UTEHA, México, 1967.

Cardona, F: Tecnología del agua, 1989.

Cejudo, T. F: Tratamientos de aguas residuales por mecanismos biológicos, México, 1996.

Degremont, G: Manual técnico del agua, 1973.

Fair, Geyer, Okun: Ingeniería Sanitaria y de aguas residuales, Vol N° 2.

Gloyne, E: Estanques de estabilización de aguas residuales, OMS, Ginebra, 1973.

Hardenbergh: Ingeniería Sanitaria, Ed. Revolucionaria, La Habana, Cuba, 1964.

Ildeu, D. F: Diseño de lagunas de estabilización. Revista Ingeniería Hidráulica, Serie N° 10, La Habana, Cuba, 1972.

López, G. E: Plantas de tratamiento, México, 1996.

Martínez, J: Contribución al estudio de lagunas de oxidación, Buenos Aires, 1964.

Martínez, C: Funcionamiento de lagunas de estabilización en Cuba, XIV Congreso Interamericano de Ingeniería, México, Agosto, 1974.

Marais, G: New factors in the design, operation and performance of waste stabilization ponds, bulletin of who, 34, 1966.

Metcalf & Eddy: Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización, Volumen I, Ed. Mc Graw Hill, Madrid, España, 1995

Rivas, M. G: Tratamiento de aguas residuales, Segunda Edición, Editorial Vega, 1978.

Saenz Forero, R: Hoja de divulgación técnica del CEPIS.

Saenz Forero, R: Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de las aguas residuales.

Saenz, R: Diseño de lagunas de estabilización, Bogotá, Colombia, 1975.

Talboys, R: Lagunas de estabilización en América Latina, Publicación del CEPIS/OPS, 1971.

Thirimurthi, D: Design principles of waste stabilization ponds, Jour of the Sanitary Engineering Division, Proc. A.S.C.E. 95, 1969.

Yanes, F: Lagunas de estabilización, CEPIS, Lima Perú.