



Programme
« Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain »

Action A10
Valorisation des eaux usées par lagunage
dans les pays en voie de développement

avec un financement de :



INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS

CENHICA

UTILIZACIÓN DE LAS MACROFITAS EN EL TRATAMIENTO POR
LAGUNAS: LA EXPERIENCIA CUBANA

Dr. José Francisco Santiago Fernández

Octubre de 2002

CONTENIDO

1	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
2	MATERIALES Y METODOS.....	3
3	LOS RECURSOS HÍDRICOS DE CUBA, EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y LA COLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUALES.....	5
	3.1 Los recursos hídricos de cuba	5
	3.2 Agua potable suministrada y residual colectada	6
	3.3 Tratamiento de las aguas residuales	7
	Tipo de Estaciones	7
	Número	7
	Plantas con tratamiento hasta secundario	7
4	LOS SISTEMAS DE LAGUNAS DE OXIDACIÓN EN CUBA.....	7
	4.1 Generalidades acerca de los sistemas de lagunas de oxidación	7
	4.2 Estudio de los factores que condicionan la eficiencia de los sistemas de lagunas en las condiciones de Cuba	8
5	USO DE PLANTAS ACUÁTICAS EN LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO MEDIANTE LAGUNAS: EL USO DE LAS LEMNACEAS	3
	5.1 Generalidades	3
	5.2 La familia de las lemnáceas	4
	5.3 Resultados	5
6	CONCLUSIONES	12
7	ANEXO 1: ESTUDIO DE CASO DEL TRATAMIENTO EN UNA INSTALACION TURISTICA 13	
	7.1 Descripción de las características del sistema de tratamiento de residuales de 13	
	7.2 Características de los residuales de la instalacion turistica	13
8	ANEXO 2: RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES MEDIANTE LEMNACEAS	14
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	15

1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Este estudio tiene como objetivo contribuir a la evaluación del potencial de reuso de las aguas residuales en Cuba, a la evaluación de la eficiencia de las lagunas de oxidación como tecnología tratamiento y a la descripción de los resultados obtenidos en el desarrollo de una tecnología de tratamiento mediante Lemnaceas.

2 MATERIALES Y METODOS

Se consultó la información más reciente acerca de los recursos hídricos de Cuba.

Se realizó un inventario de los sistemas de lagunas que hubieran sido investigados y se seleccionaron aquéllos que disponían de información con suficiente grado de detalle acerca de:

- Las dimensiones reales de las lagunas: largo, ancho y profundidad.
- El caudal medio de entrada.
- Las características de los residuales como Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅, Demanda Química de Oxígeno DQO, etc., tanto a la entrada como a la salida de los sistemas.

De estos se seleccionaron cinco sistemas a los cuales se les analizó su comportamiento calculando la Carga Superficial en kg de DBO₅ por hectárea por día, la Carga volumétrica en g de DBO₅ por metro cúbico, el por ciento de remoción que se obtiene en la salida con respecto a la entrada y el tiempo de retención.

Los muestreos se realizaron por métodos normalizados y los análisis de laboratorio se realizaron siguiendo las técnicas de laboratorio descritas en la 14 edición de Standard Methods, (APHA, AWWA, WPCF; 1980) (1).

Se aplicaron métodos estadísticos de procesamiento para la interpretación del comportamiento de los sistemas estudiados.

Se seleccionó otro conjunto de lagunas que disponía solamente de la información relativa a las características de los residuales.

Los ensayos para el cultivo de Lemnacea a escala de banco se realizaron en el CENHICA en 1991, en recipientes de fibrocemento de 0,14 m² de superficie tomando las muestras tres veces cada semana y ejecutando las técnicas de laboratorio descritas en la 14 edición de Standard Methods, (APHA, AWWA, WPCF; 1980), y utilizando una especie del género **Lemna** colectada en dos puntos : en los lechos de secado de la planta de tratamiento de aguas residuales albañales del río Quibú y en el río Almendares, a la altura del puente de Calabazar en la Calzada de Bejucal, e identificada posteriormente como **Lemna aequinoctialis**.

Para determinar el tipo de efluente a utilizar y comenzar la adaptación de la especie de lemnácea disponible se preparó el siguiente ensayo. Se utilizaron recipientes de fibrocemento de $0,14 \text{ m}^2$ de superficie llenándose a 33 l . Se cubrió ésta totalmente con una manta de lenteja de agua. Se determinó periódicamente en las aguas pH, conductividad eléctrica, amonio, fosfato (como P) y oxígeno disuelto. Se dosificaron los residuales para mantener la concentración de Amonio de manera que no superara los 50 mg/l . La prueba duró dos semanas. Se ensayó la adaptación sobre residual porcino crudo, efluente sedimentado, efluente de una primera laguna, de una segunda laguna y de una tercera laguna. En la planta piloto se utilizaron las especies ***Lemna aequinoctialis***, ***Spirodella polyrrhiza*** y ***Wolffia brassiliensis***. Las mediciones de caudal se realizaron en recipientes aforados para ello y los tiempos se midieron con un cronómetro de $0,25 \text{ s}$ de error. Las estimaciones de volúmenes se hicieron mediante el método de determinación de área total bajo una curva, con papel milimetrado marca Canson de 100 g/m^2 . Las determinaciones de rendimiento de lemnácea se ejecutaron pesando el contenido neto de lemnácea que podía contener un recipiente preparado y destinado exclusivamente para ello, de manera que sirviera de patrón secundario. El cultivo se inició en un área de 147 m^2 extendiéndose a 588 , 1000 y así hasta llegar a 3000 m^2 .

Las observaciones de temperaturas máxima y mínima del aire y las precipitaciones se registraron diariamente en una estación climática instalada en el área con ese objetivo y siguiendo los métodos establecidos por el INRH. La identificación de especies de la familia de las lemnácea se realizó según el método descrito por Landolt, 1986.

La determinación de los parámetros K capacidad de carga del sistema y r rapidez de crecimiento específica, se realizaron en recipientes de fibrocemento de $0,14 \text{ m}^2$ de superficie, manteniéndose en ellos la concentración de nutrientes adecuada siendo calculados mediante las expresiones recomendadas para ello (Romero Luna, 1989). A partir de ellos se calcularon h^* , el rendimiento máximo sostenible o cantidad máxima que se puede cosechar sin que la población desaparezca en un tiempo finito, y el tiempo de duplicación de la biomasa T. Las fórmulas aplicadas fueron :

$$K = \frac{2N_0N_1N_2 - N_1^2(N_0 + N_2)}{N_0N_2 - N_1^2}$$

$$r = \frac{1}{t_i} \ln \frac{N_1(K - N_0)}{N_0(K - N_1)}$$

donde N_0 , N_1 y N_2 , son densidades del cultivo, a tiempos diferentes y t_i el intervalo de tiempo entre dos densidades observadas.

$$h^* = \frac{ArK}{4}$$

$$T = \frac{1}{r} \ln 2$$

donde A es el área dedicada al cultivo

3 LOS RECURSOS HÍDRICOS DE CUBA, EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE Y LA COLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUALES

3.1 Los recursos hídricos de cuba

Cuba es una isla larga y estrecha y su hidrografía se caracteriza por un parte aguas central que corre de este a oeste dividiendo el territorio en dos vertientes: norte y sur.

La longitud de los ríos y el área de las cuencas, en el 85 % de los casos, es inferior a 45 km y a 200 km² respectivamente (1).

Los recursos hídricos potenciales totales se evalúan en 38,1 km³, de los cuales 31,7 km³ corresponden a aguas superficiales distribuidas en 632 cuencas hidrográficas y 6,4 km³ corresponden a aguas subterráneas distribuidas en 165 unidades hidrogeológicas (Tabla 1) (2).

Tabla 1 Recursos Hídricos Potenciales

Tipo de recurso hídrico	km ³ / año	%	Se encuentran en
Recursos Hídricos Potenciales Superficiales	31.7	83.2	632 cuencas hidrográficas
Recursos Hídricos Potenciales Subterráneos	6.4	16.8	165 unidades hidrogeológicas
Recursos Hídricos Potenciales Totales	38.1	100	

Del total de 38,1 km³ / año de Recursos Hídricos Potenciales Totales, se consideran aprovechables 24 km³ / año y de ellos disponibles actualmente, de acuerdo con la estructura hidráulica que se ha construido, 13,68 km³ / año (Tabla 2) (2).

Tabla 2 Volumen de Recursos Hídricos por su tipo

Tipo de recurso hídrico	Superficial			Subterráneo	
	km ³ / año	km ³ / año	%	km ³ / año	%
Potenciales	38.1	31.7	83.2	6.4	16.8
Aprovechables	24	18	75.0	6	25
Disponibles	13.68				

La infraestructura hidráulica actual consta de 241 embalses que administra el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, los cuales almacenan más de 9000 millones de m³ de agua y son capaces de entregar más de 7000 millones de m³ al año (2).

Tabla 3 Recursos Hídricos por habitante

Tipo de recurso hídrico	km 3 / año	% del total	m 3 por habitante al año
Recursos Hídricos Aprovechables	24	100	2130
Recursos Hídricos Disponibles	13.68	57	1220

Esto hace que por habitante, el país disponga como Recurso Hídrico Aprovechable, de 2130 m³ al año y como Recurso Hídrico Disponible, de 1220 m³ al año (Tabla 3) (2) y es una muestra de lo que se ha logrado edificar en la nación gracias a la política de inversiones en este sector la cual ha hecho posible poner a disposición del país el 57 % de los Recursos Hídricos Aprovechables.

Sin embargo, aunque los recursos hídricos no son escasos, se encuentran desigualmente distribuidos. Así mientras que en la provincia de Ciego de Ávila los Recursos Hídricos Disponibles alcanzan el 86 % de los Recursos Hídricos Aprovechables, en la provincia de Guantánamo, la más al sur y al este del país, los Recursos Hídricos Disponibles alcanzan solamente el 10 % de los Recursos Hídricos Aprovechables (2), lo que hará necesario para estas áreas elaborar una política de reutilización de las aguas y disponer de las tecnologías para ello.

3.2 Agua potable suministrada y residual colectada

Los diferentes sistemas de acueductos en el país suministran 1 7047 millones de m³ de agua al año de las cuales se tratan 1586,3 millones de m³ lo que representa el 97,4 % del total de agua suministrada (Tabla 4) (3).

Actualmente existen el país 2724 lugares habitados con acueducto, de los cuales 875 son aglomeraciones urbanas y el resto, 1849, lugares rurales. En estos existen 1694 instalaciones para la desinfección del agua mediante cloración (3).

El servicio de alcantarillado se brinda en 559 lugares habitados del país beneficiando a una población de 5 millones 58 mil personas, colectándose 592,2 millones de m³ de aguas residuales (Tabla 4) (3).

Tabla 4 Volúmenes anuales de agua potable suministrada y residual colectada

Tipo de agua	millones de m ³ / año	Número de habitantes
Agua suministrada	1704.7	
Agua tratada (potable)	1586.3	8 412 000
Agua residual colectada	592.2	5 058 000
Agua residual colectada tratada	206.9	
Agua residual colectada no tratada	385.3	
Potencial de agua a colectar (a partir de la suministrada)	1112.5	
Potencial de agua a colectar (a partir de la potable)	994.1	

3.3 Tratamiento de las aguas residuales

De las aguas residuales municipales que se colectan, se tratan 206,9 millones de m³ (Tabla 4) (3), lo que hace que puedan ser tratados aún 385,3 millones de m³ de aguas residuales coleccionadas, estando comprendido el potencial entre 994,1 y 1112,5 millones de m³ de aguas residuales (Tabla 4).

Los residuales municipales coleccionados que reciben depuración se tratan mediante 10 estaciones de depuración y 376 lagunas de oxidación que atiende el servicio nacional de Acueducto y Alcantarillado (Tabla 5) (3).

Tabla 5 Estaciones de depuración de residuales que atiende el servicio nacional de Acueducto y Alcantarillado

Tipo de Estaciones	Número
Plantas con tratamiento hasta secundario	10
Lagunas de oxidación	376

4 LOS SISTEMAS DE LAGUNAS DE OXIDACIÓN EN CUBA

4.1 Generalidades acerca de los sistemas de lagunas de oxidación

Las lagunas de estabilización o lagunas de oxidación, son órganos de tratamiento de residuales que consisten en un reactor biológico horizontal, generalmente de forma rectangular aunque en ocasiones se han construido cuadradas, donde el residual es degradado biológicamente, lo que trae como resultado su depuración. Estos sistemas se construyen preferentemente con arcillas y tienen una profundidad entre 1,0 y 3,0 metro, aunque en ocasiones pueden ser más profundas. La relación largo - ancho se encuentra alrededor de 2 : 1.

Las lagunas de estabilización comenzaron a ser utilizadas como sistema de tratamiento de residuales en América Latina y el Caribe, a finales de la década de los años 50, incrementándose su uso aceleradamente hasta nuestros días. Diferentes encuestas de carácter regional y nacional indican que su número ya puede contarse en miles en esta región. Cuba se considera entre los primeros países en relación con el número de lagunas en operación. Un estimado grueso sitúa en unas 1800 las lagunas funcionando a lo largo de todo el territorio. Gran parte de estas lagunas son facultativas y trabajan como lagunas primarias.

Este éxito de las lagunas de estabilización como sistema de tratamiento, se ha debido fundamentalmente a los factores siguientes:

- bajo costo relativo de la inversión inicial cuando hay disponibilidad de tierra.
- tecnología de construcción relativamente sencilla pues básicamente las operaciones se reducen a movimiento de tierra y compactación, cuando el terreno así lo permite o hay préstamos cercanos.
- sencillez relativa en la confección del proyecto,
- el más bajo costo en la operación y el mantenimiento.
- la más alta eficiencia en la remoción de patógenos cuando los tiempos de retención son los apropiados.
- Largo tiempo de funcionamiento con alta eficiencia, sin que sean necesarias reparaciones o mantenimientos complejos.

4.2 Estudio de los factores que condicionan la eficiencia de los sistemas de lagunas en las condiciones de Cuba

En la tabla 6 se ofrece, de manera condensada, la información que aparece en el anexo acerca de las dimensiones, datos de proyecto y las características de los residuales de cinco sistemas de lagunas:

1. Hotel Les Breezes, Jibacoa, La Habana.
2. Playa Guardalavaca, Holguín.
3. Playa Estero Ciego (laguna vieja), Holguín.
4. Playa Estero Ciego (laguna nueva), Holguín.
5. Los Taínos II, Varadero.

La tabla 7 ofrece un resumen del cálculo de una serie magnitudes intensivas (entendiendo por tales aquéllas que no reflejan extensiones) cuyo objetivo es interpretar el comportamiento de estos sistemas.

Tabla No. 7. Características intensivas de las lagunas estudiadas y DBO 5 de entrada y salida de los sistemas estudiados

Laguna	Característica					
	Remoción	DBO entrada	DBO salida	t retención	Carga superfic.	Carga volumét.
	%	mg/l	mg/l	días	kg DBO5/ha* día	g DBO5 /m ³ *día
Les Breezees	74	473	125	21.5	507	22
Guardalavaca	84	155	25	31.1	109.7	5
Esteros Ciegos (vieja)	66	157	54	10.2	288.7	15
Esteros Ciegos (nueva)	64	235	85	14.6	155	16
Los Taínos II	84	206	32	24.6	159.2	8

Carga superfic.: Carga superficial expresada en kg DBO5/ha*día.

Carga volumét.: Carga volumétrica expresada en g DBO5/m³*día

Tabla 6. Dimensiones y datos de proyecto de las lagunas estudiadas

Dimensiones y datos de proyecto laguna de oxidación del Hotel Les Breezes. Habana.										
Datos de proyecto										
largo (m)	ancho (m)	h (m)	área (m2)	área (ha)	V (m3)	Q (l/seg)	Vm3/día	retención		
56	18	2.3	1008	0.1008	2318	3.1	265	12		
Carga superfic	Carga volumétrica		DBO entrada	DBO salida	Remoción					
kg DBO5/ha* día	g DBO5 /m3		mg/l	mg/l	%					
327	14		200	30	85					
Datos reales										
largo (m)	ancho (m)	h (m)	área (m2)	área (ha)	V (m3)	Q (l/seg)	Vm3/día	retención		
56	18	2.3	1008	0.1008	2318	1.25	108	21.5		Relación
Carga superfic	Carga volumétrica		DBO entrada	DBO salida	Remoción	Relación entre las cargas Real/Proyecto			DBO Real/Proyecto	
kg DBO5/ha* día	g DBO5 /m3		mg/l	mg/l	%	Carga superfic		Carga volumétrica		Proyecto
507	22		473	125	74	1.6		1.5		2.4

Dimensiones y datos de la laguna de oxidación de Playa Guardalavaca. Holguín.							
Población servida (habit)	h (m)	área (m2)	área (ha)	V (m3)	Q (l/seg)	Vm3/día	t retención (proyecto)
3066	2.2	21600	2.16	47520	17.7	1529.28	25.0
Carga superficial	Carga volumétrica	DBO entrada	DBO salida	Remoción			t retención (real)
kg DBO5/ha* día	g DBO5 /m3	mg/l	mg/l	%			
109.7	5	155	25	84			31.1

Dimensiones y datos la laguna de oxidación (vieja) de Playa Estero Ciego. Holguín.							
Población servida (habit)	h (m)	área (m2)	área (ha)	V (m3)	Q (l/seg)	Vm3/día	t retención (proyecto)
361	2.5	2100	0.21	3937.5	4.47	386.208	18.75
Carga superficial	Carga volumétrica	DBO entrada	DBO salida	Remoción			t retención (real)
kg DBO5/ha* día	g DBO5 /m3	mg/l	mg/l	%			
288.7	15	157	54	66			10.2

Dimensiones y datos de la laguna de oxidación (nueva) de Playa Estero Ciego. Holguín.								
Población servida (habit)	h (m)	área (m2)	área (ha)	V (m3)	Q (l/seg)	Vm3/día	t retención (proyecto)	
420	1.65	3400	0.34	3273	2.6	224.64	15.0	
Carga superficial	Carga volumétrica	DBO entrada	DBO salida	Remoción			t retención (real)	
kg DBO5/ha* día	g DBO5 /m3	mg/l	mg/l	%			14.6	
155.3	16	235	85	64				

Dimensiones y datos de laguna de oxidación Los Taínos II Varadero								
largo (m)	ancho (m)	h (m)	área (m2)	área (ha)	V (m3)	Q (l/seg)	Vm3/día	t retención (real)
392	171	1.9	67032	6.7032	127361	60.00	5184	24.57
Carga superficial	Carga volumétrica	DBO entrada	DBO salida	Remoción				
kg DBO5/ha* día	g DBO5 /m3	mg/l	mg/l	%				
159.2	8.4	206	32	84				

La tabla 8 muestra un estudio de asociación entre algunas variables características de los cinco casos de lagunas estudiadas, mediante el cálculo de los coeficientes de correlación entre ellas.

Tabla No. 8. Estudio de asociación entre algunas variables características de las lagunas estudiadas. Cálculo de los coeficientes de correlación.

N=5 (Cinco casos estudiados)

	CARGA SUPERF.	CARGA VOLUM.	DBO 5 ENTRAD	DBO 5 SALIDA	% DE T REMOCI	T RETENC
CARGA SUPERFICIAL	1.00	0.85	0.85	0.81	-0.27	-0.27
CARGA VOLUMETRICA	0.85	1.00	0.78	0.95	-0.68	-0.60
DBO 5 ENTRADA	0.85	0.78	1.00	0.89	-0.10	0.02
DBO 5 SALIDA	0.81	0.95	0.89	1.00	-0.53	-0.37
% REMOCION	-0.27	-0.68	-0.10	-0.53	1.00	0.92
TIEMPO DE RETENCION	-0.27	-0.60	0.02	-0.37	0.92	1.00

Los gráficos siguientes muestran las relaciones entre las variables seleccionadas y la eficiencia como % de remoción.

Gráfico No. 1: Tiempo de Retención vs. % de Remoción

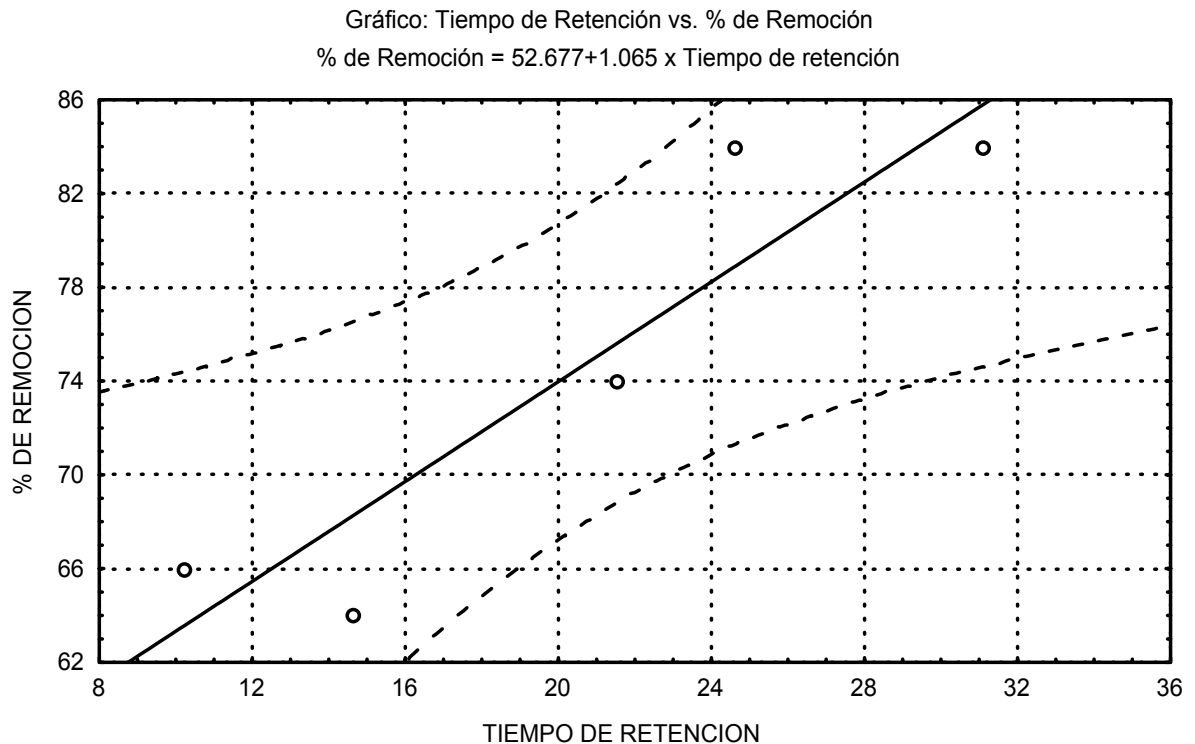


Gráfico No. 2: Carga Superficial vs. % de Remoción

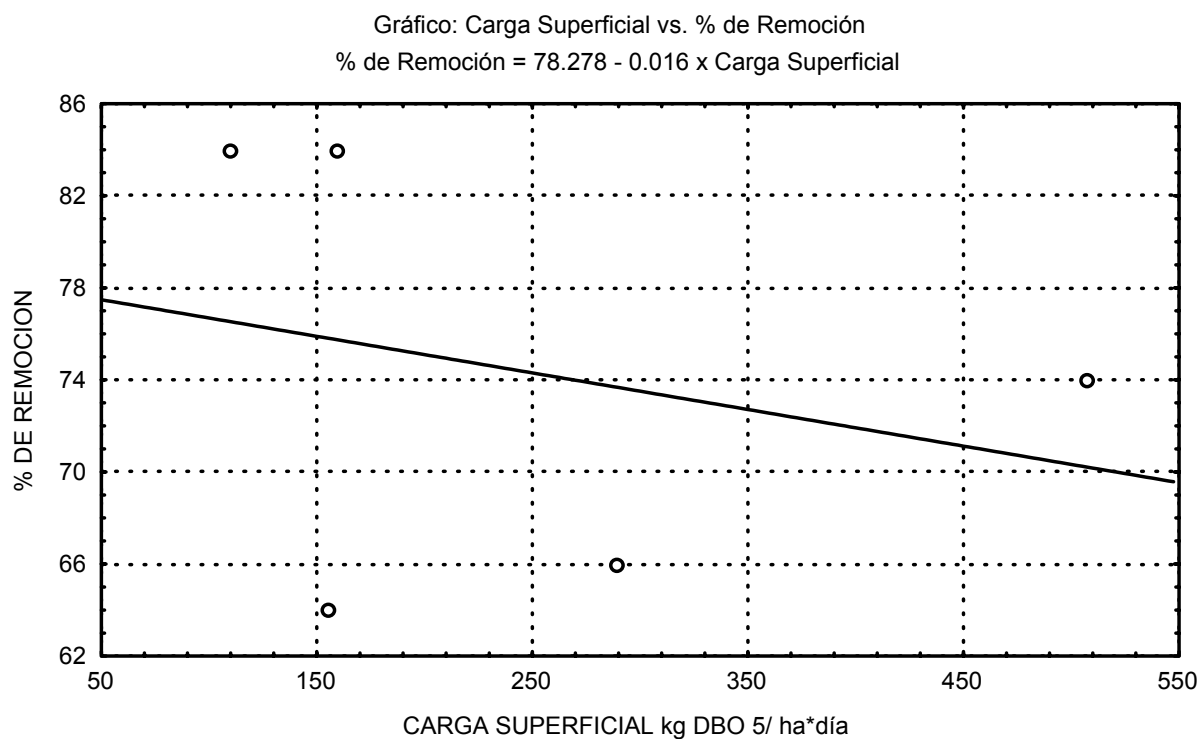


Gráfico No. 3: Carga Volumétrica vs. % de Remoción

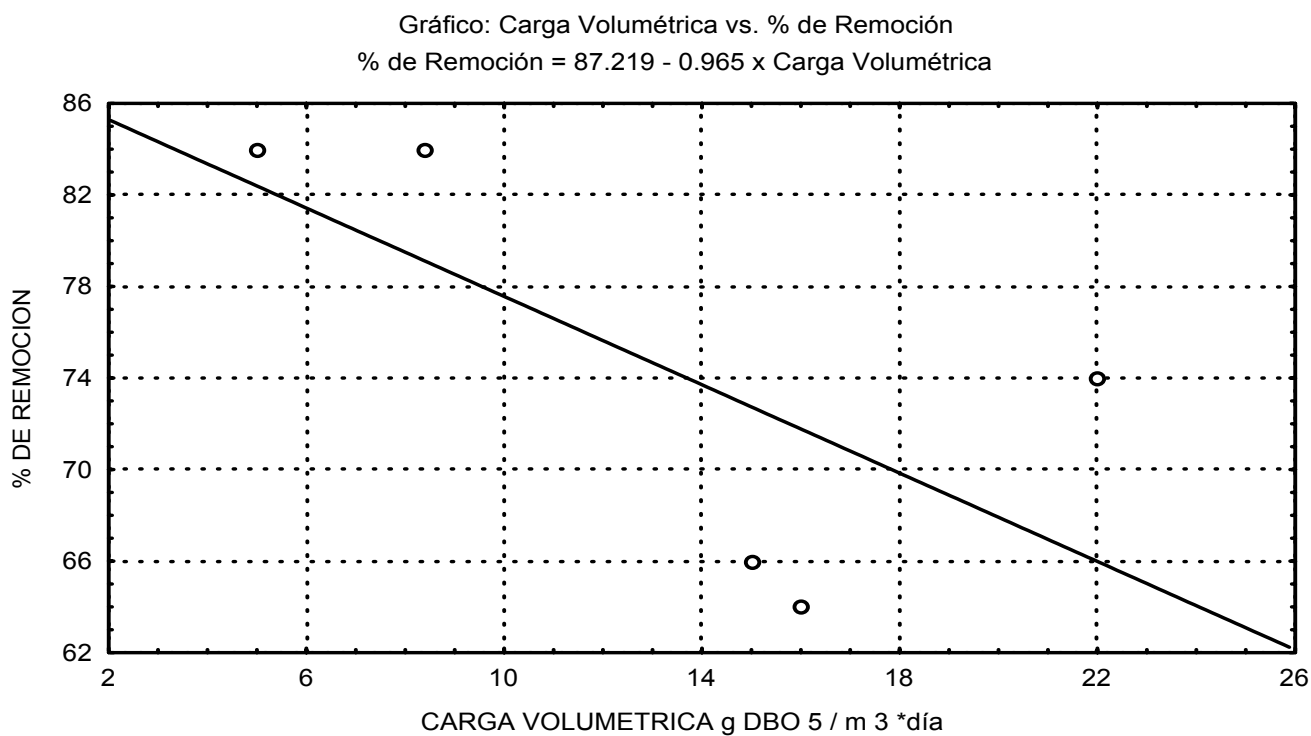
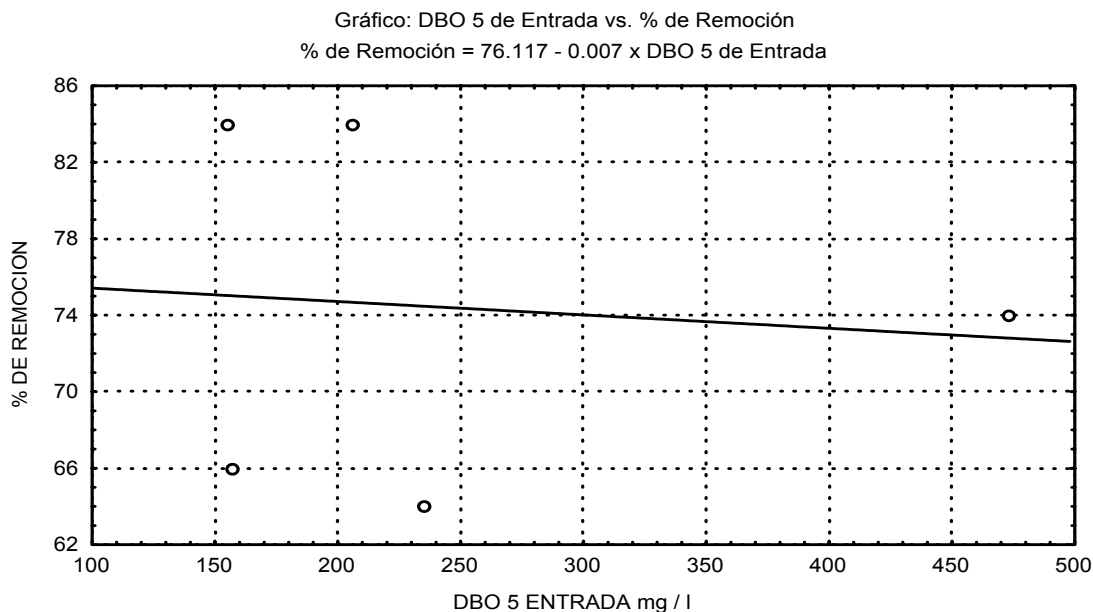


Gráfico No. 4: DBO 5 de Entrada vs. % de Remoción



Análisis de los resultados

Del análisis de la tabla No. 8 se desprende que la eficiencia del tratamiento, expresada como por ciento de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los Cinco Días DBO 5, dependerá fundamentalmente del tiempo de retención (0.92 de coeficiente de correlación entre estos parámetros). Según el gráfico No. 1 y la ecuación de regresión correspondiente, para alcanzar eficiencias mayores del 80 % es necesario un tiempo de retención superior a 25 días.

Puede observarse que el % de remoción no depende de la carga superficial (- 0.27 de coeficiente de correlación entre estos parámetros). El gráfico No. 2 nos muestra que ésta no debe ser superior a 100 kg / ha * día.

La tabla 8 nos muestra que, el % de remoción es menor en la medida en que es mayor la carga volumétrica (- 0.68 de coeficiente de correlación), lo que significa que a pesar de que se pretende que las lagunas trabajen en flujo a pistón, la mezcla completa ocurre aunque sea parcialmente, de ahí la importancia de ese parámetro. El gráfico No. 3 y la ecuación correspondiente muestran que por encima de 7 g de DBO 5 por m³ por día, la eficiencia disminuye a menos de 80 %.

A pesar de que la eficiencia en la remoción prácticamente no depende de la DBO 5 de entrada (- 0.10 de coeficiente de correlación entre estos parámetros y gráfico No. 4), la DBO 5 de salida estará en función de la DBO de entrada (0.89 de coeficiente de correlación). Esto significa que dentro de los límites de una determinada

eficiencia hay una relación entre la entrada y la salida pero para que esa eficiencia sea mayor se dependerá del tiempo de retención.

Del análisis de estos resultados puede concluirse que, considerando que se pretende diseñar laguna facultativas, para el caso de Cuba, una isla con prácticamente la misma temperatura en todo su territorio, cuando los residuales a tratar sean superiores a 150 mg / l, el parámetro fundamental de diseño será el tiempo de retención el cual no debe ser menor de 25 días.

Siempre que se pretenda diseñar lagunas facultativas la carga superficial no debe ser superior a 100 kg / ha * día y la volumétrica no superior a 7 g de DBO 5 por m³ por día, pues la eficiencia disminuye a menos de 80 %.

El estudio mostró que la eficiencia, en el rango de concentraciones estudiadas no dependió de la concentración de DBO 5 de la entrada.

5 USO DE PLANTAS ACUÁTICAS EN LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO MEDIANTE LAGUNAS: EL USO DE LAS LEMNACEAS

5.1 Generalidades

Una línea que ha ido cobrando importancia en el tratamiento de las aguas residuales es el cultivo de especies vegetales acuáticas con el objetivo de obtener proteínas. Dentro de esta práctica se han obtenido resultados en los cultivos de algas, de jacinto de agua y de lemnácea.

A pesar de la alta productividad de los cultivos de algas la separación de éstas es muy costosa. Según Boon Yang (1986) el alto consumo energético, los altos costos de mantenimiento y la constante atención calificada hacen antieconómicos el uso de la centrifugación como método de separación a concentraciones menores de 10 g/l (base seca). Por su parte, Buena et. al. 1990, consideran que la floculación presenta también inconvenientes económicos.

En lo que respecta al cultivo del jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), Hauser, 1984, considera que está limitado por el alto costo de la cosecha y del proceso para convertirlo en producto útil.

Sin embargo, las lemnáceas no presentan estos inconvenientes : se cosechan y separan del agua fácilmente, además, poseen tres propiedades que las hacen muy atractivas para explotarlas en el tratamiento de residuales, éstas son: 1) capacidad de extraer los nutrientes contenidos en las aguas residuales disminuyendo con ello la carga contaminante de esas aguas, 2) alto valor nutritivo al poseer contenidos de proteína superiores al 20% y hasta el 37% de materia seca, con alta proporción en lisina y metionina y altas concentraciones en carotenos y xantofila y 3) extraordinaria velocidad de reproducción.

Estas razones determinaron que se escogiera para el desarrollo de una tecnología de tratamiento de residuales y recuperación de nutrientes y agua a la familia de las lemnáceas.

5.2 La familia de las lemnáceas

La familia de las lemnáceas (hierba de pato, lenteja de agua) consiste en plantas diminutas de libre flotación en el agua, que se propagan vegetativamente con mayor frecuencia (Landolt, 1980). Se encuentran alrededor de todo el mundo, excepto en las regiones del extremo norte y del extremo sur (Landolt 1986). La familia está constituida por cuatro géneros, de ellos tres: (***Spirodella*, *Lemna* y *Wolffia***) están distribuidas por todo el mundo. ***Wolffiella*** está restringida a América y África. ***Spirodella*** tiene su centro de distribución en América del Sur. El género ***Lemna*** muestra su mayor diversidad en América del Norte y en el Sudeste de Asia. La principal distribución de ***Wolffiella*** tiene lugar en las zonas subtropicales de América y África. ***Wolffia*** ocurre principalmente en América, el Sudeste de Asia y Australia (Landolt 1986). Hasta el momento han sido identificadas y descritas 34 especies de esta familia (Landolt,1986).

Una vez estabilizado un cultivo de lemnácea en aguas residuales se manifiesta su alta capacidad en la remoción de materia orgánica y nutrientes. La efectividad de este proceso fue descrita por Journey et al (1991) en Bangla Desh. Remociones similares, en experiencias llevadas a cabo a escala de banco, encontraron Oron, Porath y Jansen (1987); Oron, Porath y Wildschut, (1986).

Los aspectos que influyen y determinan la eficiencia en la operación de estos sistemas han sido descritos por Skillicorn 1993 y fueron estudiados por Santiago y col., 1993. La tabla No. 9 compara los rendimientos estimados y el contenido de proteína (%) reportado por Hillman y Culley (1978), entre las lemnáceas y otros alimentos de uso común. Como se puede apreciar, las lemnáceas compiten favorablemente con los cultivos terrestres tradicionales superando, inclusive a la soya dado su alto rendimiento.

El mantenimiento sostenido de todo cultivo con lleva una estrategia. Según Romero Luna (1989): "todo control y aprovechamiento racional requiere el conocimiento de las relaciones funcionales entre los diversos elementos de los sistemas; éstas serán el fundamento de las tácticas y estrategias de operación." Este investigador propone un modelo logístico de crecimiento, desarrollado por Verhulst, para modelar el comportamiento de ***Eichornia crassipes***.

A pesar de las simplificaciones necesarias de efectuar, este modelo permite caracterizar un sistema de plantas acuáticas a través de los parámetros "r", rapidez de crecimiento específica (en $kg/kg * día$) y "K", capacidad de carga del sistema o densidad máxima posible (en kg/m^2).

Con estos parámetros es posible calcular h^* , el rendimiento máximo sostenible o cantidad máxima que se puede cosechar sin que la población desaparezca en un tiempo finito, y el tiempo de duplicación de la biomasa T .

En relación con su uso como alimento puede decirse que : 1) las lemnáceas pueden sustituir ventajosamente a la soya y a la harina de pescado y otros alimentos tradicionales para aves, cuando se mezclan en concentraciones superiores al 25 % (PRISM 1991), 2) las aves alimentadas con lemnácea producen más huevos de la misma o más alta calidad que aquéllas que se encuentran en dietas de control según prescripciones estándares. (PRISM 1991), 3) en policultivos de especies acuícolas forrajeras las expectativas de producción alcanzan valores entre 10-15 t/ha (Journey et. al., 1991), 4) aproximadamente entre 8 - 10 kg de lemnácea fresca pueden convertirse en 1 kg de pescado (Journey et. al., 1991).

Tabla No. 9 Rendimiento de lemnácea en comparación con otros cultivos (Hillman y Culley, 1978). Valores en peso seco.

Cultivo	t/ha * año	Contenido de proteína %
Lemnácea seca	17,60	37
Soya (frijol seco)	1,59	41,7
Semilla de algodón (seca)	0,76	24,9
Maní con cáscara y vaina	1,57 - 3,12	23,6
Heno de alfalfa	4,37 - 15,69	15,9 17,09

5.3 Resultados

Se desarrolló el cultivo a escala de banco y se obtuvo un rendimiento promedio de 2,07 t de lemnácea fresca por hectárea por día, (Santiago et.al., 1992), tabla 10. Sobre la base de esta experiencia se consideró la posibilidad de obtener, en una escala mayor, rendimientos entre 0,5 y 1,0 t de lemnácea fresca por hectárea por día. Dado el contenido de nitrógeno y fósforo de los residuales porcinos se recomendaba considerar la posibilidad de utilizarlos como fuente de esos nutrientes para el cultivo de lemnácea. Según un análisis de mercado (Journey et.al. 1991 y PRISM 1991), una planta que produce 0,5 t de lemnácea fresca por día, deja ganancias comercializando la harina entre \$300,00 y \$400.00 USD la tonelada.

A partir de estos resultados se elaboró un proyecto de planta piloto para una estación experimental consistente en una planta piloto para el tratamiento de los residuales porcinos, un laboratorio para el análisis de aguas y una estación hidrometeorológica.

Tabla No. 10 Resultados preliminares de policultivo de lemnácea en condiciones de banco

	Unidad	Resultado
Rendimiento promedio	<i>t/ ha/ día</i>	2,07
Rendimiento mínimo	"	1,70
Rendimiento máximo	"	3,9
Materia seca	%	4
Proteína cruda	"	22,5
Grasa	"	5,6
Fibra	"	9,5
Cenizas	"	20,7

Se ensayó la adaptación sobre residual porcino crudo, efluente sedimentado, efluente de una primera laguna, de una segunda laguna y de una tercera laguna. La lemnácea que se cultivó sobre efluente de una 3ra. laguna no se adaptó. De las ocho especies de lemnácea (tabla No. 11) reportadas en Cuba, (Landolt, 1986), se seleccionaron y adaptaron tres para la operación de la planta piloto (tabla 12).

Tabla No.11. Especies de lemnácea reportadas en Cuba según Landolt (1986).

Género <i>Lemna</i>	Género <i>Spirodella</i>	Género <i>Wolffia</i>	Género <i>Wolffiella</i>
<i>Lemna aequinoctialis</i>	<i>Spirodella polyrrhiza</i>	<i>Wolffia brasiliensis</i>	<i>Wolffiella welwitschi</i>
<i>Lemna valdiviana</i>			<i>Wolffiella lingulata</i>
			<i>Wolffiella oblonga</i>

Tabla No. 12 Resultados de la identificación de las especies colectadas y adaptadas a las condiciones de cultivo en la estación experimental " La Guayaba ".

Familia	Género	Especie	Referencia
Lemnaceae	<i>Spirodella</i>	<i>polyrrhiza</i>	(L) Schleid
Lemnaceae	<i>Lemna</i>	<i>aequinoctialis</i>	Welwitsch
Lemnaceae	<i>Wolffia</i>	<i>brasiliensis</i>	weddell

Para aplicar una estrategia de cosecha que permitiera mantener el cultivo, se realizaron ensayos para determinar aquellas características de las especies que definen las condiciones de cultivo y cosecha, a saber : la capacidad de carga del sistema K, o densidad máxima posible del cultivo; la rapidez de crecimiento específica r; el tiempo de duplicación T, y el rendimiento máximo sostenible h* o cantidad máxima que se puede cosechar sin que la población desaparezca en un tiempo finito. Los resultados de las series de ensayos se encuentran en la tabla

No. 13 , y los resultados de los cálculos de las constantes que determinan el sistema, en la tabla No.14 . Puede observarse que la densidad máxima posible de un policultivo o su capacidad de carga, es de 15,18 *t/ha*, mientras que su rendimiento máximo sostenible h^* , es de 1,518 *t/día*, luego una estrategia para mantener un cultivo sano y con su máxima rapidez de crecimiento específico y mínimo tiempo de duplicación será mantener la densidad del cultivo por debajo de K y la cosecha diaria a un por ciento de h^* .

Tabla No. 13 Resultados de los ensayos para la determinación de los parámetros que determinan las condiciones y la estrategia del cultivo.

Tiempo (día)	Densidad g/m^2			
	<i>Spirodella polyrrhiza</i>	<i>Lemna aequinoctialis</i>	<i>Wolffia brasiliensis</i>	Policultivo
0	174	294	235	371
1	248	461	350	465
2	353	543	529	635
3	512	638	588	823
4	536			934
6		705	641	

Tabla No. 14 Valores de los parámetros que determinan las condiciones y la estrategia de cultivo.

Parámetro	Unidad	<i>Spirodella polyrrhiza</i>	<i>Lemna aequinoctialis</i>	<i>Wolffia brasiliensis</i>	Policultivo
K	g/m^2	722	793	664	1 518
K	<i>t/ha</i>	7,22	7,93	6,64	15,18
r	$día^{-1}$	0,55	0,65	0,98	0,40
T	<i>día</i>	1,26	1,06	0,71	1,73
h^*	<i>t/ha *día</i>	0,993	1,289	1,627	1,518

Los resultados que se exponen a continuación son el producto de la operación con éxito de la planta, durante un trimestre, mediante la tecnología desarrollada en la primera etapa de las investigaciones. En la tabla 15 puede observarse que el pH no sufre cambios mientras que se reducen el contenido de sales (lo que se aprecia en el valor de conductividad), la alcalinidad y el potasio K; éstos últimos como resultado del consumo de los aniones de ácidos orgánicos y del consumo de potasio por parte del cultivo. Los nutrientes son removidos con eficiencia (sobre todo el ion amonio, compuesto de nitrógeno que las lemnácea consumen de preferencia). Los sólidos no presentan altas remociones siendo la mayor la de los sólidos fijos dado que las lemnácea son consumidoras de sales. La remoción de materia sedimentable es semejante a la que ocurre en las lagunas de oxidación y de manera igual ocurre con

la DQO y la DBO a 5 días. Los coliformes totales y fecales son removidos en un grado similar a las lagunas de oxidación aunque inferior a las lagunas de pulimento. La evaluación de la eficiencia obtenida cuantificando la carga que se vierte por el sistema puede observarse en la tabla 16. Cada hectárea de lemnácea, operada mediante esta tecnología, puede tratar con la eficiencia reportada, los residuales de entre 2500 y 5000 cerdos, ello en dependencia del peso por animal y su alimentación. El sistema de limpieza podrá influir en la operación.

Tabla No. 15 Características de los residuales de entrada al sistema de cultivo de lemnácea, del efluente de éste, expresadas como valores medios (media geométrica para los coliformes) y % de remoción.

Parámetro	Unidad	Entrada	Efluente	% de remoción
pH	<i>u</i>	7,4	7,4	
Conduct. eléctric.	<i>μSiemen/cm</i>	2957	998	66
Alcalinidad	<i>mg/l</i>	1716	465	73
Potasio K	"	187	52	72
N-NH ₄	"	143	9	94
N-NO ₂	"	0,05	0,02	60
N-NO ₃	"	< 1	< 1	
N Total	"	470	23,5	95
P-PO ₄	"	56	9	84
P Total	"	116	26	77
Sólidos totales	"	1420	740	48
Sólidos fijos	"	1348	458	66
Sólidos volátiles	"	522	283	46
Materia sedimentable	<i>ml/l</i>	6,0	< 0,5	92
DQO	<i>mg/l</i>	1098	94	91
DBO ₅	"	378	30	92
Coliforme Total	<i>NMP/100 ml</i>	$2,5 \times 10^5$	$6,5 \times 10^3$	97
Coliforme Fecal	"	$2,9 \times 10^4$	$4,6 \times 10^3$	84

Tabla 16 Evaluación de la carga contaminante vertida en el efluente (valores extrapolados a carga/ha de cultivo*día)

Parámetro	Unidad	Salida		
		Mínimo	Media	Máximo
DQO	<i>kg/ha*día</i>	0,0	1,73	21,1
DBO	"	0,0	0,55	10,7

Como resultado de 31 observaciones continuas se determinó que el rendimiento promedio es de 0,59 t de lemnácea fresca por hectárea por día, con rendimientos máximos de 1,29 t / ha * día y mínimos de 0,32 (cuando se opera) y de 0 t/ha * día, (cuando no se opera el sistema). Si no se toman en cuenta los días en que no se opera, el rendimiento se eleva entonces a 0,68 t/ha*día, (tabla 17). La tabla 18 muestra los valores mínimos y máximos de cuatro análisis realizados por laboratorios diferentes a un lote de **Lemna aequinoctialis** y en la tabla 11 se encuentran los contenidos de proteína hallados en otro cultivado en la estación La Guayaba. Los análisis fueron realizados en el CENHICA y corresponden a la misma especie.

Durante varios meses de 1992 y durante el trimestre enero-marzo de 1993 se estuvo suministrando lemnácea fresca a una nave de 900 pollos. Con este suministro la mortalidad disminuyó de un promedio de 50 aves diarias a una media de 6 aves diarias, siendo en los últimos días de una o ninguna ave muerta. Esta forma de alimentación (combinando la Lemnácea fresca con otro alimentos), continuó en 1993 y durante los tres primeros trimestres de 1994. En el último trimestre de 1994 se comenzó a suministrar a 6000 pollos de engorde, una mezcla en forma fresca de **Spirodella polyrrhiza** y **Wolffia brasiliensis** con resultados satisfactorios. Es de destacar en la **Spirodella** su mayor contenido en proteína que **Lemna aequinoctialis**. Leng, y col. 1994, reportan, para una especie de **Spirodella** en Australia un contenido mínimo de proteína de 43 %.

Tabla 17 Rendimiento de lemnácea fresca en la planta de la estación La Guayaba

Rendimiento	t lemnácea fresca / ha * día
Promedio de todos los días	0,59
Promedio sin días que no se opera	0,68
Máximo	1,29
Mínimo cuando se opera	0,32
Mínimo cuando no se opera	0,0

Tabla No.18 Características nutricionales de la lemnácea cultivada.

Característica	Valores en %	
	Mínimo	Máximo
Materia seca	4	8
Proteína	22,5	28,7
Grasa	3,9	5,6
Fibra	9,5	20,1
Cenizas	13,1	22,36

Tabla No. 11 Porciento de proteína en lemnácea de la estación La Guayaba

Muestreo	Fecha	Media del % de proteína	Rango del % de proteína
I	03/02/93	25	24-27
II	10/02/93	27	25-28
III	25/02/93	27	25-28

Con la experiencia acumulada se pasó a un ensayo de alimentación iniciado desde las primeras semanas de vida. En los primeros días los pollitos ingirieron el alimento a voluntad, estimándose que lo hicieron en una cantidad alrededor de los 5 g por animal. A partir de las tres semanas el suministro se realizó a razón de 20 g de lemnácea fresca por ave, lo que representa alrededor del 20 % del consumo total diario de cada una. Con ello se logró evitar la alta mortalidad que se manifiesta cuando la temperatura ambiente desciende (la estación cercana reportó mínimas de 15°C, 12°C y 10°C) y continuaron su crecimiento y engorde de manera satisfactoria.

Los resultados de los ensayos de alimentación de aves con lemnácea fresca es posible resumirlos como sigue : : la lemnácea puede suministrarse fresca a las aves, en el caso de lo pollos de engorde; la lemnácea fresca demostró no sólo ser una fuente importante de proteína sino también un complemento vitamínico capaz de evitar una serie de afecciones, disminuyendo con ello, de manera sensible, la mortalidad, al no manifestarse la avitaminosis; este efecto se manifestó tanto en las primeras semanas de vida de las aves como en las etapas superiores; no se han manifestado síntomas de enfermedades transmitidas a la aves mediante la ingestión de la lemnácea. Situaciones como el "picaje" y el canibalismo, que eran típicas en ciclos alimentados sin suministro alguno de lemnácea o sin un suministro estable de ella, no se han manifestado desde que se estabilizó el suministro diario.

Cuando los pollos ingieren lemnácea diariamente disminuye el consumo total de pienso diario pero mantienen normal su desarrollo y engorde, lo que representa un ahorro importante. Si se les garantiza la lemnácea diariamente, las aves ingieren mayor cantidad de otros alimentos que de otra manera no consumirían, pues no los apetecen tanto, (Ibarra, 1995). Se tiene además como experiencia que, para el caso de la tilapia, a pesar de no ser éste un pez herbívoro, la lemnácea fresca puede ser utilizada como sustituto de una parte del pienso en la dieta diaria, conclusión que se alcanzó al terminar varios ensayos realizados.

Como resultado de todo lo discutido se concluye que el esquema tecnológico que puede ser propuesto para su aplicación inmediata es el siguiente :

Residual ⇒ órganos de pre-tratamiento ⇒ lagunas de Lemnácea.

Los ensayos realizados hasta el momento, como parte de la segunda etapa de las investigaciones y a partir del esquema tecnológico propuesto para su aplicación,

permiten formular las alternativas siguientes de tecnologías perfeccionadas para alcanzar esos objetivos : alta remoción mediante la incorporación de un órgano de pulimento final y rendimiento menor por área del sistema, sin gastos adicionales en aditivos para el tratamiento, alta remoción y rendimiento equivalente, mediante la incorporación de otros cultivos, sin gastos adicionales en aditivos para el tratamiento : a) combinación con azolla, helecho acuático cuyo contenido de proteína se encuentra alrededor del 25 % (Becerra y col., 1991), b) combinación con cultivo de arroz, alta remoción y alto rendimiento con gastos adicionales en aditivos para el tratamiento, calculados en alrededor de 700 USD al año por hectárea de cultivo pero compensados con el incremento de la cosecha. Todos estos esquemas producirán un efluente con las características que, de manera preliminar, se relacionan en la tabla 20.

Dado el grado de dominio que actualmente se tiene de la tecnología desarrollada es factible su aplicación a los residuales domésticos pues se obtiene un efluente que puede ser vertido sin grandes restricciones en cuanto a lugares posibles, y un alimento cuyo contenido en proteínas y vitaminas permitirá financiar los gastos en que se incurra. Esta aplicación traerá un beneficio adicional : la obtención de un volumen de efluente cuya magnitud, en muchos casos, lo hará susceptible de ser reutilizado ya que su calidad permitirá su uso, incluso en el riego de vegetales. El agua además podrá ser utilizada para el cultivo intensivo de peces como la tilapia y las carpas, dado su bajo contenido en materia orgánica y su concentración de oxígeno disuelto. Teniendo en cuenta las características de los residuales domésticos, con una hectárea de lemnácea se pueden tratar diariamente los residuales de entre 10 000 y 15 000 personas. La tecnología discutida permitirá que el aprovechamiento de los residuales pueda ser realizado creando agrosistemas de tratamiento organizados como empresas lucrativas.

Tabla 20 Características del efluente que produciría aquella tecnología, que se encontrare aplicable como resultado del desarrollo de la segunda etapa de investigaciones.

Característica	Unidad	Resultado preliminar
pH	<i>u</i>	7,5
Turbiedad	<i>TU</i>	15
Color	<i>escala Pt - Co</i>	20
N-NH ₄	<i>mg/l</i>	0,5
N-NO ₃	<i>"</i>	5
Materia sedimentable	<i>ml/l</i>	0,3
DBO ₅	<i>mg/l</i>	5
Coliforme Total	<i>NMP/100ml</i>	10 ²
Huevos de helmintos	<i>Huevo viable/l</i>	<1(pronóstico)

6 CONCLUSIONES

1. Para el caso de Cuba, una isla con prácticamente la misma temperatura en todo su territorio, cuando los residuales a tratar sean superiores a 150 mg / l, el parámetro fundamental de diseño será el tiempo de retención el cual no debe ser menor de 25 días.
2. Siempre que se pretenda diseñar lagunas facultativas la carga superficial no debe ser superior a 100 kg / ha * día y la volumétrica no superior a 7 g de DBO 5 por m³ por día, pues la eficiencia disminuye a menos de 80 %.
3. El estudio mostró que la eficiencia, en el rango de concentraciones estudiadas no dependió de la concentración de DBO 5 de la entrada.
4. El tratamiento de residuales porcinos mediante el cultivo de lemnácea, arrojó remociones de más del 90 % en los indicadores de contaminación y un rendimiento promedio comprendido entre 0,59 y 0,68 t de lemnácea fresca / ha*día y cuyo efluente puede ser vertido sin grandes restricciones en cuanto a su localización. Los altos rendimientos logrados en el cultivo de la lemnácea y los resultados satisfactorios alcanzados en la alimentación de pollos de engorde, permitirán que en estos sistemas pueda financiarse la operación con la producción de alimento para animales, y otras producciones, creando agrosistemas de tratamiento organizados como empresas lucrativas.
5. El rendimiento máximo sostenible h*, del policultivo resultó de 1,518 t/día, luego una estrategia para mantener un cultivo sano y con su máxima rapidez de crecimiento específico y mínimo tiempo de duplicación será mantener la cosecha diaria a un por ciento de h*, tal y como se realizó en la planta operada.
6. El perfeccionamiento de la tecnología y su aplicación a los residuales domésticos redundará en un beneficio adicional : la obtención de un volumen de efluente cuya magnitud, en muchos casos, lo hará susceptible de ser reutilizado ya que su calidad permitirá su uso, incluso en el riego de vegetales o en la cría intensiva de peces. Mediante esta tecnología es posible tratar diariamente, con una hectárea de lemnácea, los residuales de entre 10 000 y 15 000 personas

7 ANEXO 1: ESTUDIO DE CASO DEL TRATAMIENTO EN UNA INSTALACION TURISTICA

7.1 Descripción de las características del sistema de tratamiento de residuales de

La laguna del Hotel Les Breezes se proyectó como solución de tratamiento a las aguas residuales del hotel, con capacidad para 500 turistas y 250 empleados, por lo que debe esperarse recibir en ella aproximadamente $265 \text{ m}^3/\text{d}$ de aguas residuales; con un tiempo de retención de 12 días. Esto hace que la carga superficial que se le impone a la laguna sea de aproximadamente 327 kg/ha/d , parámetros estos que están de acuerdo con las Normas de Diseño en uso en el país. La DBO_5 en el afluente será de acuerdo con lo informado por el INTUR del orden de $180\text{-}200 \text{ mg/l}$ y la DBO_5 en el efluente estará entre $20\text{-}30 \text{ mg/l}$, lo cual está dentro de los límites admisibles (categoría C) según NC 27 1999 (Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado vigente hasta el 2001). Siempre y cuando se opere correctamente, tenga un mantenimiento adecuado y no cambie sustancialmente la carga orgánica, el sistema estará funcionando dentro de los rangos normados. Además se le adicionaron dos filtros biológicos de flujo horizontal y dos pozos de infiltración del efluente. Las dimensiones de la laguna aparecen en la tabla.

7.2 Características de los residuales de la instalacion turistica

Como se puede observar en la tabla X, la laguna del Hotel Les Breezes fue proyectada como laguna facultativa asumiendo una concentración de DBO_5 a la entrada de 200 mg/l y un caudal diario de 3.1 l/seg. para un volumen diario de entrada de 265 m^3 , lo que, al tener en cuenta las dimensiones de la laguna haría un tiempo de retención de 12 días con una carga por superficie que sería de $327 \text{ kg. DBO}_5/\text{ha}^*\text{día}$ y una carga volumétrica de $14 \text{ g DBO}_5/\text{m}^3$.

Estas condiciones harían posible un % de remoción de la DBO_5 de 85 %.

Sin embargo, como se realizaron estimaciones inadecuadas, los datos reales fueron los siguientes: la concentración promedio de la DBO_5 a la entrada es de 473 mg/l y el caudal diario de 1.25 l/seg. Esto hace que la DBO_5 real de entrada sea 2.4 veces la de diseño y el caudal diario real 2.5 veces menor que el diseño, lo que implica un residual mucho más concentrado.

Al ser el caudal diario de 1.25 l/seg. , el volumen total de entrada real es de 108 m^3 y el tiempo de retención real de 21.5 días, que representa 1.8 veces el de diseño.

De aquí que las cargas superficial y volumétrica reales (carga por superficie de $507 \text{ kg. DBO}_5/\text{ha}^*\text{día}$ y carga volumétrica de $22 \text{ g DBO}_5/\text{m}^3$.) sean 1.6 veces mayores que las de diseño. Dadas las condiciones de carga referidas, la eficiencia en la remoción alcanzó solamente 74 %.

8 ANEXO 2: RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES MEDIANTE LEMNACEAS

DISEÑO DEL AGROSISTEMA

- Area dedicada al cultivo: no mayor de 2 hectáreas
- Largo de las lagunas: entre 100 y 130 m
- Ancho de las lagunas: no mayor de 10 m
- Profundidad de las lagunas: 40 cm
- Sistema único para la descarga de residuales y agua.
- Cortina rompe-vientos en el perímetro exterior del sistema.
- Bermas interiores que además de los taludes permitan el acceso de personal y medios para la cosecha, sirvan para sostener cultivos como el plátano y, posibilitan la protección contra el aumento de la temperatura en el colchón de Lemnácea.
- Parrillas flotantes para la contención del cultivo.
- Carga mínima de diseño: DQO: 155,5 kg/ha*día.
 - DBO₅: 53,5 kg/ha*día.
- Capacidad de tratamiento: 2500-5000 cerdos/ha de cultivo.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- APHA, AWWA, WPCF. 1980. Standard Methods for the Examination of Water and Wastes.
- Aguirre Hernández, Aymee. 2002. Los recursos hidráulicos en cifras. Voluntad hidráulica. Edición especial. Año XL. 2002. p 15 – 19.
- Fontanills Seisedos, Luis A. 2002. Dos compromisos con el pueblo: agua potable y saneamiento ambiental. Voluntad hidráulica. Edición especial. Año XL. 2002. p 34 – 37.
- Becerra, M. 1991. " Azolla - Anabaena. Un recurso valioso para la producción agropecuaria en el trópico ". CIPAV . Colombia.
- Boon Yang, L. 1986 "Piggery Waste Treatment. Phase I. Reclamation of Nutrients, Water and Energy from Waste". IDRC-MR124e.
- Buelna,G.; K.K. Bhatharai; J. de la NoÛe; E.P. Taiganides. "Evaluation of Various Flocculants for the Recovery of Algal Biomass Grown on Pig Waste". Biological Wastes No31. 1990
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaría General de Obras. 1992. "Memorias, Programa de Uso Eficiente del Agua". México DF.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaría General de Obras. 1994. "Planta de Tratamiento Cerro La Estrella". México DF.
- Hauser, J.R. 1984 "Use of Water Hyacinth Aquatic Treatment Systems for Ammonia Control and Effluent Polishing". Journal WPCF Vol 59.
- Heaton, R.D. 1981 " Worldwide Aspects of Municipal Wastewater Reclamation and Reuse. Municipal Wastewater in Agriculture". Academic Press. New York.
- Hillman, W.S.; D.D. Culley, 1978. "The Uses of Duckweed". American Scientist Vol 66.
- Ibarra, R. 1995. "Comunicación personal"
- Journey. W.K.; P. Skillicorn; W. Spira, 1991 " Duckweed Aquaculture. A New Acuatic Farming System for Developing Countries". The World Bank. Emena Technical Department.
- Landolt, E. 1980 "Byosistematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae)" Volume 1 Geobotanical Institute. ETH. Zurich. 247 pag.
- ; 1986. " The family of Lemnaceae. A monographic study". Volume 1. ETH Zurich.
- Leng, R.A. 1994. Director of the Centre for Duckweed Research and Development. University of New England. Armidale. Australia. " Comunicación personal ".
- Leng, R.A.; J. H. Stambolie; R. Bell. 1994. " Duckweed - a potencial high-protein feed resource for domestic animals and fish ". Centre for Duckweed Research and Development. Univer sity of New England. Armidale. Australia.
- Oron, G.; D.Porath; H.Jansen. 1987. "Performance of the Duckweed Species Lemna Gibba on Municipal Wastewater for Effluent Renovation and Protein Production". Biotechnology and Bioengineering. Vol. XXIX.pp. 258-268.
- Oron, G.; D.Porath; L. Wildschut. 1986 "Wastewater Treatment and Renovation by Different Duckweed Species" Journal of Environmental Engineering. Vol. 112 No. 2 April.
- PRISM. 1991. " Zona de agrosaneamiento para Ferreñafe". Perú.

Santiago, J.F.; A. Cano; J. Cernuda. 1992. "Acerca de las posibilidades de tratamiento final para residuales porcinos mediante el cultivo de lemnácea". 1er. Encuentro Nacional. Integración entre economía y ecología. Academia de Ciencias, 1987.

Santiago, J.F.; M. del C. Novoa; A. Cano; A. Cervantes. 1993"Tratamiento de residuales líquidos con vistas a su reutilización. Cultivo de Lemna (lemnácea)". Informe de etapas cumplimentadas durante las investigaciones desarrolladas. CENHICA . INRH. 45 pag..

Santiago, José Francisco; Beato O.; Plaza I. 1999. Solución para la disposición del efluente de la laguna de oxidación de los residuales del hotel Les Breezes Jibacoa. Informe Final. INRH. La Habana. Cuba