

**Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada**



**CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DEL FLUJO DE MASA Y ENERGÍA EN
EL PROCESO DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS
EN UN SISTEMA CERRADO EN ACUICULTURA**

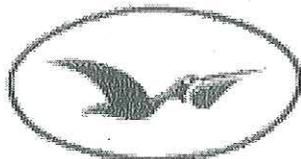
TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS

ADOLFO SÁNCHEZ ROMERO

Ensenada, Baja California, México, Noviembre de 2007

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



CICESE

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN ACUICULTURA**

**CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DEL FLUJO DE MASA Y ENERGÍA EN
EL PROCESO DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS
EN UN SISTEMA CERRADO EN ACUICULTURA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

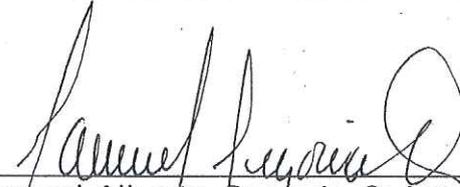
Presenta:

ADOLFO SÁNCHEZ ROMERO.

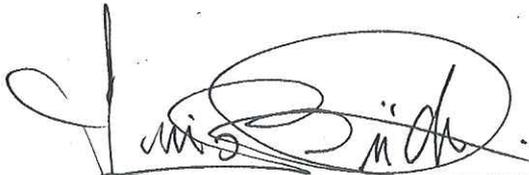
Ensenada, Baja California, México, Noviembre de 2007.

TESIS DEFENDIDA POR
Adolfo Sánchez Romero

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



Dr. Manuel Alberto Segovia Quintero
Director del Comité



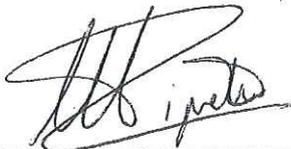
Dr. Luis Fernando Bückle Ramírez
Miembro del Comité



Dr. José Fernández Zepeda
Miembro del Comité



M.C. Julio César Tafur Sotelo
Miembro del Comité



Dra. Meritxell Riquelme Pérez
*Coordinador del Posgrado en
Ciencias con orientación en
Acuicultura*



Dr. David Covarrubias Rosales
*Encargado del Despacho de la
Dirección de Estudios de
Posgrado*

15 de Noviembre de 2007

RESUMEN de la tesis de **Adolfo Sánchez Romero**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRÍA EN CIENCIAS con Orientación en Acuicultura, Ensenada, Baja California. Noviembre de 2007.

CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DEL FLUJO DE MASA Y ENERGÍA EN EL PROCESO DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS EN UN SISTEMA CERRADO EN ACUICULTURA

Resumen aprobado por:


Dr. Manuel Alberto Segovia Quintero
Director de Tesis

El proceso de remoción de los sólidos en un sistema de recirculación en acuicultura, es una de las operaciones unitarias críticas más importantes.

Se realizó un cultivo experimental de tilapia *Oreochromis niloticus*, variedad *stirling*. Se probaron dos tiempos de residencia hidráulica (T_r) para remover los sólidos suspendidos totales (SST) y se obtuvo una regresión entre la pérdida de carga hidráulica y los sólidos retenidos en un bioclarificador de cuentas de plástico, con propela. Con base en los balances de masa y energía, fue formulado un modelo matemático, que describe el comportamiento dinámico de los SST con tamaño de partícula mayor a $1.2 \mu\text{m}$ y se obtuvo una ecuación para calcular la energía consumida por la circulación del agua en el sistema para el transporte y remoción de los SST.

La densidad del cultivo fue de 63.6 kg m^{-3} . Las concentraciones de los SST en el tanque de cultivo fueron de $7.87 \pm 2.43 \text{ mg l}^{-1}$ y de $4.99 \pm 1.75 \text{ mg l}^{-1}$ (media \pm DE) para los dos T_r y hay diferencias altamente significativas entre esos valores. La pérdida de carga hidráulica máxima fue de $7.1 \pm 0.59 \text{ m}$ y la regresión entre la pérdida de carga y los sólidos retenidos, fue lineal en el corto plazo (52 h). La potencia hidráulica inicial fue de 442 W y se incrementó en 17% por efecto de los sólidos retenidos en el bioclarificador en un período de 24 h. El coste de remoción de SST fue de 0.79 kW kg^{-1} y el consumo de energía hidráulica en relación con el alimento consumido fue de $0.32 \text{ kW kg}_{\text{alimento}}^{-1}$.

El bioclarificador utilizado es muy eficaz para controlar los niveles de SST en el tanque de cultivo, pero tiene altos consumos de energía (517 W) debidas a la circulación del agua y a la pérdida de carga hidráulica. La tasa de circulación fue de 5.1 veces el valor mínimo recomendado. El T_r tiene un efecto muy importante en la calidad del agua. El modelo es original y fundamentado en la ley de la conservación de la masa y la energía, fue validado y calibrado experimentalmente, predice la concentración de los SST en el tanque de cultivo, simula la respuesta dinámica del sistema y tiene potencial para dimensionar la unidad de remoción de los sólidos.

Palabras clave: *Oreochromis niloticus*, balances de masa y energía, sólidos suspendidos totales.

Abstract of the thesis submitted by **Adolfo Sanchez Romero**, in partial fulfillment of the requirement to obtain MASTER OF SCIENCE degree with Orientation to Aquaculture. Ensenada, Baja California. Noviembre 2007.

CARACTERIZATION AND MASS AND ENERGY FLUX MODEL IN THE SOLIDS REMOVAL PROCESS IN AN AQUACULTURE CLOSED SYSTEM

In a recirculating aquaculture system (RAS), solid removal is one of the most important operations that take place. As the use of RAS in Mexico is increasing, the understanding of the process involved in this operation and the cost implications are becoming a fundamental step toward its successful operation.

For this experiment, Nile tilapia *Oreochromis niloticus* was cultured in a RAS at a density of 63.6 kg m^{-3} . A total suspended solids (TSS) mass balance and an RAS energy balance was performed and a mathematical model was formulated to describe $d\text{TSS} dt^{-1}$. Three different experiments were performed to validate the mathematical model. The first experiment was designed to determine the amount of solids generated in the RAS. The second experiment, TSS concentrations were determined at two different hydraulic retention times (RT), 0.41 h^{-1} and 0.74 h^{-1} , and a third experiment was carried out to determine the TSS captured in a biofilter, the head loss and the amount of energy involved in the TSS removal process.

In the first experiment we found that the TSS generated in the RAS was $19.88 \pm 14.53 \text{ mg l}^{-1}$. For the second experiment, significant differences in TSS were detected between both RT's ($RT_{0.41 \text{ h}^{-1}} = 4.99 \pm 1.75 \text{ mg l}^{-1}$ and $RT_{0.74 \text{ h}^{-1}} = 7.87 \pm 2.43 \text{ mg l}^{-1}$). The TSS retained in the biofilter was between 3% and 37% per kg of fish feed. The TSS removal price was of 0.79 kW kg^{-1} and the hydraulic energy - kg of fish feed consumed ratio was 0.32.

The mathematical model that characterized the TSS mass and energy balance in the RAS was validated experimentally, and was able to simulate the TSS dynamics in the RAS. The biofilter used in this experiment has proven to be effective to remove TSS in RAS, but is also characterized by high energy consumption, a significant head loss and is affected by the RT. Before RAS can successfully begin operating in Mexico, the high energy consumption involved in this process has to be solved.

Key words: *Oreochromis niloticus*, mass and energy balances, total suspended solids.

DEDICATORIA

A Mary y Adolfo Jr.
por el tiempo que les escatimé
durante la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (CESUES) por el apoyo que me brindó durante la realización de mis estudios de posgrado y por el compromiso institucional con la mejora de la calidad académica de sus profesores investigadores, a través de la realización de estudios de posgrado.

Al Dr. Manuel Segovia Quintero por su atinada dirección en el trabajo de la tesis y por su compañerismo.

Al grupo de investigadores del programa de Posgrado en Acuicultura del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), por su apertura al aceptar como uno de sus alumnos a un Ingeniero Civil y por su alto nivel en la generación y aplicación del conocimiento.

A los Drs. Luis Fernando Bückle Ramírez y José Alberto Fernández Zepeda, y al M. C. Julio César Tafur Sotelo, miembros del comité de tesis, por sus acertadas sugerencias y comentarios para mejorar el presente trabajo.

A mis compañeros Verónica, Julio, Róger, Gustavo, Emilio y Marco por los gratos momentos que compartimos.

A Francisco Valenzuela Buriel por la elaboración de las figuras uno y dos de la tesis.

A Carlos y Francisco por su entusiasta colaboración durante el cultivo de la tilapia.

CONTENIDO

	Página
I INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Generalidades.....	1
I.2 Antecedentes.....	2
I.2.1 Tratamientos en un sistema cerrado.....	2
I.2.2 Balance de masa y de energía.....	6
I.2.3 Análisis dinámico.....	7
I.2.4 Modelos en acuicultura.....	7
I.3 Hipótesis.....	9
I.4 Objetivos.....	10
I.4.1 General.....	10
I.4.2 Específicos.....	10
II MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
II.1 Organismos experimentales.....	11
II.2 Sistemas de cultivo.....	12
II.2.1 Maternidad.....	12
II.2.2 Engorda.....	13
II.2.3 Alimentación.....	15
II.3 Calidad del agua.....	16
II.4 Diseño experimental.....	16
II.4.1 Biomasa y calidad del agua.....	16
II.4.2 Generación de sólidos en el tanque de cultivo.....	16
II.4.3 Concentración de sólidos en el tanque de cultivo para diferentes tiempos de residencia hidráulica.....	19
II.4.4 Sólidos retenidos en el bioclarificador.....	20
II.4.5 Tasa de flujo.....	21
II.4.6 Medición de la pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador.....	22
II.5 Análisis estadístico.....	22
II.6 Formulación del modelo.....	24
II.6.1 Esquema conceptual del sistema cerrado usado para la remoción de los sólidos.....	24
II.6.2 Balance de masa en el tanque de cultivo.....	26
II.6.3 Balance de masa en el bioclarificador.....	27
II.6.4 Regresión de los sólidos suspendidos a la salida del bioclarificador con respecto al tiempo.....	28
II.6.5 Solución del sistema de ecuaciones diferenciales.....	29
II.6.6 Pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador.....	29
II.6.7 Balance de energía en el bioclarificador.....	30
II.6.8 Potencia hidráulica.....	31

CONTENIDO (continuación)

	Página
II.6.9 Coste de remoción de los sólidos y coste por unidad de alimento proporcionado.....	32
II.7 Simulación.....	32
II.7.1 Tasa de residencia hidráulica variable.....	32
II.7.2 Volumen de medio filtrante variable.....	33
III RESULTADOS.....	34
III.1 Biomasa y calidad del agua.....	34
III.2 Generación de sólidos en el tanque de cultivo.....	35
III.3 Concentración de sólidos en el tanque de cultivo para diferentes tiempos de residencia hidráulica.....	37
III.4 Sólidos retenidos en el bioclarificador.....	39
III.5 Tasa de flujo.....	43
III.6 Regresión de los sólidos suspendidos totales a la salida del bioclarificador contra el tiempo.....	44
III.7 Solución del sistema de ecuaciones diferenciales.....	44
III.8 Pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador.....	47
III.9 Potencia hidráulica.....	49
III.10 Coste de remoción de los sólidos.....	52
III.11 Simulación.....	52
III.11.1 Tasa de residencia hidráulica variable.....	52
III.11.2 Volumen de medio filtrante variable.....	54
IV DISCUSIÓN.....	57
V CONCLUSIONES.....	67
VI RECOMENDACIONES.....	69
VII LITERATURA CITADA.....	70
APÉNDICE.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama del sistema de maternidad, de flujo continuo, con sus componentes principales.....	13
2	Diagrama del sistema cerrado utilizado para el cultivo de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> , variedad stirling.....	14
3	Diagrama de la circulación del agua en el sistema de cultivo durante el experimento uno.....	17
4	Diagrama conceptual del modelo de sistema cerrado usado para el balance de masa y energía, para la remoción de los sólidos suspendidos totales (SST), mostrando todas las variables involucradas.....	25
5	Generación de sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} (media \pm DE), durante un período de 24 horas sin bioclarificador, para los muestreos uno y dos del experimento uno. Las zonas claras en el eje de las abscisas indican las horas del día.....	37
6	Concentración de sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} (media \pm DE) en un período de 24 horas, para dos diferentes tiempos de residencia hidráulica.....	39
7	Concentración de sólidos suspendidos totales a la entrada y salida del bioclarificador para el muestreo uno, en mg l^{-1} (media \pm DE).....	41
8	Concentración de sólidos suspendidos totales a la entrada y salida del bioclarificador para el muestreo dos, en mg l^{-1} (media \pm DE).....	42
9	Regresión entre los sólidos suspendidos totales en mg l^{-1} , a la salida del bioclarificador y el tiempo en horas.....	44
10	Sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} , contra el tiempo en h, donde las líneas continuas son resultados obtenidos experimentalmente para dos tiempos de residencia hidráulica $T_r = 0.41$ y 0.74 h. Las líneas discontinuas representan el resultado proporcionado por el modelo para dos tasas de producción: $\emptyset = \text{constante}$ y $\emptyset = \text{variable}$	45

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
11	Sólidos retenidos en el bioclarificador en $g\ l^{-1}$, contra el tiempo en h, en un período de 24 horas. Resultados proporcionados por el modelo para dos tasas de producción y por los datos obtenidos experimentalmente.....	46
12	Regresión de la pérdida de carga hidráulica en m, contra los sólidos retenidos en el bioclarificador en $g\ l^{-1}$, para los muestreos uno y dos.....	49
13	Incremento de la potencia hidráulica en vatios, requerida para la circulación del agua en el sistema de cultivo, en función del tiempo en horas.....	51
14	Incremento de la potencia hidráulica expresada como %, requerida para la circulación del agua en el sistema de cultivo, contra el tiempo en horas. Cálculo efectuado utilizando la potencia inicial de referencia igual a cero %.....	52
15	Sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en $mg\ l^{-1}$ contra el tiempo en h, proporcionados por el modelo para diferentes tiempos de residencia hidráulica.....	53
16	Sólidos retenidos en el bioclarificador en $g\ l^{-1}$, contra el tiempo en h, proporcionados por el modelo para diferentes volúmenes de medio filtrante.....	55
17	Potencia hidráulica en vatios, contra el tiempo en h, obtenida con el modelo para diferentes volúmenes del medio filtrante.....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Relación entre los mecanismos y los procesos utilizados en la remoción de los sólidos en un sistema de recirculación.....	4
II	Características físicas del medio filtrante, de los sólidos suspendidos totales (SST), del fluido de cultivo e hidráulicas de un sistema con filtro de cuentas de plástico.....	5
III	Características físicas del equipo utilizado en el sistema de cultivo de tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> , variedad stirling.....	15
IV	Programación de los muestreos para determinar la generación de sólidos en el tanque de cultivo. Se tomaron muestras de agua por triplicado cada dos horas.....	18
V	Programación de los muestreos para determinar la concentración de los SST en el tanque de cultivo utilizando dos tiempos de residencia hidráulica. Se tomaron muestras de agua por triplicado.....	20
VI	Programación de los muestreos para determinar la concentración de SST a la entrada y salida del bioclarificador. Se tomaron muestras de agua por triplicado.....	20
VII	Biomasa en kg (media \pm DE) y cantidad de alimento proporcionado en g, durante el período en el que se efectuaron los experimentos.....	34
VIII	Calidad del agua presente durante los tres experimentos. Las mediciones de nitrógeno amoniacal total (NAT) y de nitritos (NO_2^-), se hicieron al inicio y al final del experimento uno y solo al inicio en los experimentos dos y tres. Los superíndices con letras diferentes indican diferencias significativas.....	35
IX	Concentración de sólidos suspendidos totales generados en el tanque de cultivo en mg l^{-1} (media \pm DE), en ambos muestreos. Los superíndices con letras diferentes indican diferencias significativas.....	36
X	Relación de excreción de sólidos (Es), obtenida para los valores máximos de los sólidos generados.....	36

LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
XI	Sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} , para dos tasas de flujo diferentes. Los superíndices con letras diferentes indican diferencias significativas.....	38
XII	Sólidos suspendidos totales, a la entrada y salida del bioclarificador, para los muestreos uno y dos, en mg l^{-1} (media \pm DE). Los superíndices con letras diferentes (ab o xy) indican diferencias significativas.....	40
XIII	Sólidos suspendidos retenidos en el bioclarificador, para los muestreos uno y dos, en g.	43
XIV	Tasas de flujo en el bioclarificador, tanque de cultivo y tubería de retorno en l min^{-1} (media \pm DE) y tiempo de residencia hidráulica en h.....	43
XV	Cantidades utilizadas para calibrar el modelo. Las tasas de producción utilizadas fueron: $\varnothing(t) = \text{constante}$ (1/24 h) y $\varnothing(t) = \text{variable}$, igual a la curva normal con $\mu = 16$ h y desviación estándar $\sigma = 3.44$ h.....	47
XVI	Pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador expresada en libras sobre pulgada cuadrada (psi) y en metros de columna de agua (m), para dos diferentes tasas de flujo. Los superíndices con letras diferentes indican diferencias significativas.....	48
XVII	Potencia hidráulica requerida para la circulación del agua en el sistema en vatios, para diferentes cantidades de sólidos retenidos en el bioclarificador en g y coste de remoción de sólidos en kW kg^{-1}	50
XVIII	Potencia hidráulica máxima requerida para la circulación del agua en el sistema en vatios, para los diferentes tiempos de residencia hidráulica en horas, proporcionados por el modelo. La potencia del sistema de cultivo experimental fue de 542 vatios.....	54
XIX	Características de algunos modelos basados en la ley de la conservación de la masa y la energía.....	65

I INTRODUCCIÓN.

I.1 Generalidades

Los sistemas de cultivo en acuicultura pueden clasificarse por la densidad del cultivo como: extensivo, semi-intensivo, intensivo e hiperintensivo (Avault, 1996).

En un sistema extensivo, el cultivo se realiza en un cuerpo de agua existente con poca o ninguna intervención del hombre para controlar el ambiente. Este tipo de cultivo es de un bajo costo de inversión, se basa en la productividad natural del cuerpo de agua, hay poco control de depredadores y enfermedades y los rendimientos son del orden de 750 kg ha^{-1} (Avault, 1996; Wheaton, 1982; De Silva, 2003).

En los sistemas semi-intensivos hay una adición paralela y controlada de alevines y renovación de agua. La mayor ventaja, comparado con el sistema extensivo, reside en un mejor manejo del sistema, por medio del control de algunos factores tales como la temperatura, el volumen y la velocidad del agua. De forma paralela hay un manejo de la productividad del cuerpo de agua y se tiene cierto control sobre los depredadores y las enfermedades. En estos sistemas hay un incremento en los costes de producción y un mayor riesgo de enfermedades por el incremento de la densidad del cultivo, el uso de agua y suelo (Avault, 1996; Wheaton, 1982).

En los cultivos intensivos e hiper-intensivos hay un incremento considerable de la densidad de cultivo con rendimientos desde $7,000$ hasta $15,000 \text{ kg ha}^{-1}$. Este tipo de cultivos se puede llevar a cabo en estanques de tierra, concreto y fibra de vidrio. En estos cultivos, una de las alternativas es que los organismos acuáticos

se pueden mantener en sistemas cerrados, donde el ambiente es totalmente controlado. El alimento balanceado se suministra en forma constante y el agua es tratada por una serie de procesos físicos y bioquímicos. La temperatura, la salinidad, el pH, el oxígeno, la alcalinidad y los compuestos amoniacales se monitorean y controlan en forma constante (Huguenin y Colt, 1989; Timmons *et al.*, 2002). El agua circula a través de una serie de unidades de tratamiento u operaciones unitarias y el recambio de agua es menor del 10% del volumen total por día. Los sólidos se retienen y desechan con la ayuda de un clarificador; el nitrógeno amoniacal total (NAT) se convierte a nitrito y posteriormente a nitrato, este proceso se lleva a cabo en un biofiltro. El agua del cultivo posteriormente pasa por un degasificador para eliminar el exceso de dióxido de carbono y si se requiere, se añade oxígeno utilizando aire u oxígeno dependiendo de la densidad de cultivo (Huguenin y Colt, 1989; Timmons *et al.*, 2002). En los sistemas cerrados el área utilizada es significativamente menor que la usada por los estanques tradicionales de producción, lo que permite un mejor uso de área, un mayor control en los efluentes y son bioseguros (Timmons *et al.*, 2002, Losordo *et al.*, 1992).

1.2 Antecedentes.

1.2.1 Tratamientos en un sistema cerrado.

Las operaciones unitarias críticas que proporcionan los tratamientos para mantener la calidad del agua en un sistema cerrado son: la retención de sólidos, la biofiltración, la remoción de dióxido de carbono (CO₂), la aireación/oxigenación y la circulación (Malone y Beecher, 2000; Timmons *et al.*, 2002).

La primera operación unitaria que debe llevarse a cabo en un sistema cerrado es la remoción de los sólidos debido al impacto adverso que éstos tienen en todos los aspectos operativos del sistema, los cuales se enumeran a continuación: obstrucción mecánica de los biofiltros; mineralización de la materia orgánica que produce amoníaco e incremento de la demanda biológica de oxígeno por la descomposición de los sólidos y daños a las branquias de los peces (Chen *et al.*, 1994, Timmons *et al.*, 2002).

Las principales características físicas de los sólidos son la distribución por tamaño de las partículas y la densidad relativa (Timmons *et al.*, 2002). Se denominan sólidos suspendidos totales (SST) a aquellos que tienen un tamaño de partícula mayor a 1 μm ; éstos a su vez se clasifican en sedimentables si son mayores de 100 μm y no sedimentables si su tamaño se encuentra dentro de 1 y 100 μm . Se consideran como los sólidos disueltos y coloidales a aquellos que son menores de 1 μm .

En un sistema de recirculación, los principales mecanismos de remoción de los sólidos son: la separación por la gravedad, la filtración y la flotación (Cripps y Bergheim, 2000; Timmons *et al.*, 2002). La separación por gravedad funciona por medio del principio de sedimentación. El proceso de la filtración considera varios mecanismos diferentes tales como la sedimentación, la intercepción, la retención y la difusión. En el proceso de flotación, los sólidos se adhieren a las burbujas de aire y se separan del agua (Shulin *et al.*, 1994) (Tabla I). En función del tamaño de los sólidos se utilizan diferentes técnicas de remoción y las más utilizadas son la filtración y la sedimentación (Cripps y Bergheim, 2000; Timmons *et al.*, 2002).

Tabla I. Relación entre los mecanismos y los procesos utilizados en la remoción de los sólidos en un sistema de recirculación.

	Separación por gravedad	Filtración (filtro granular)	Flotación (Fraccionador)
Sedimentación	X	X	
Intercepción		X	X
Retención		X	
Difusión			X
Descomposición		X	

El proceso de remoción de los sólidos o clarificación puede llevarse a cabo usando un filtro de medio granular expandible. La operación de un filtro de medio granular expandible (filtro de cuentas de plástico) es compleja e intervienen gran cantidad de variables, algunas de ellas relacionadas con las características físicas del medio filtrante y otras con las características de los sólidos retenidos (Chen *et al.*, 1993; Sastry *et al.*, 1999; Timmons *et al.*, 2002). Por otra parte, la circulación del agua de cultivo a través del medio filtrante añade las variables referentes a las propiedades físicas del fluido y las de naturaleza hidráulica (Wimberly, 1990; Streeter *et al.*, 2000; Malone y Beecher, 2000; Timmons *et al.*, 2002) (Tabla II).

Tabla II. Características físicas del medio filtrante, de los sólidos suspendidos totales (SST), del fluido de cultivo e hidráulicas de un sistema con filtro de cuentas de plástico.

	Cantidad	Unidad	Referencia
MEDIO FILTRANTE			
Área transversal	X	m ²	
Espesor	X	m	
Porosidad	0.35	adimensional	Sastry <i>et al.</i> , 1999
Densidad específica	0.91	adimensional	Sastry <i>et al.</i> , 1999
Tamaño de partícula	3.5	mm	
Forma de partícula	Esférica		
Distribución por tamaños	uniforme		
Superficie específica	1150	m ² m ⁻³	Sastry <i>et al.</i> , 1999
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES			
Concentración de sólidos	< 80	Mg l ⁻¹	Timmons <i>et al.</i> , 2002
Densidad relativa	1.05 – 1.19		Chen <i>et al.</i> , 1993, Timmons <i>et al.</i> , 2002
Tamaño de partícula	> 20	mm	Chen <i>et al.</i> , 1993
Distribución por tamaños			
FLUIDO			
Densidad	1000	Kg m ⁻³	Streeter <i>et al.</i> , 2000
Viscosidad cinemática	0.8 x10 ⁻⁶	m ² s ⁻¹	Streeter <i>et al.</i> , 2000
Temperatura	28 – 32	°C	Timmons <i>et al.</i> , 2002
HIDRÁULICAS			
Presión	1 – 100	kPa	
Pérdida de carga hidráulica	0.8 – 6	m	Wimberly, 1990
Tasa de flujo específica	1935	m ³ dia ⁻¹ m ⁻²	Wimberly, 1990
Tasa de circulación	≥ 50	l min ⁻¹ kg al ⁻¹ dia	Malone y Beecher 2000

En general en el diseño de un sistema de recirculación la remoción de los sólidos debe llevarse a cabo antes de que el agua de cultivo pase por la bomba (Losordo *et al.*, 2000). Este proceso debe efectuarse de esta forma debido a que la acción de la bomba reduce el tamaño de los sólidos suspendidos (McMillan *et al.*, 2003).

1.2.2 Balances de masa y de energía.

La ley de la conservación de la masa, expresada como el balance de masa para un cierto volumen, ha sido utilizada como herramienta de análisis y diseño de sistemas cerrados de producción acuícola (Weatherley, 1982; Weatherley *et al.*, 1993; Losordo y Westers, 1994; Timmons *et al.*, 2002). Weatherley (1982) fue pionero en el uso de esa herramienta aplicada a la acuicultura y demostró el potencial del balance de masa para predecir el comportamiento dinámico de la concentración del nitrógeno amoniacal en un sistema cerrado. Weatherley *et al.* (1993) formularon un modelo dinámico, consistente de ecuaciones diferenciales no lineales, dependientes del tiempo que fueron aplicadas en el transporte y remoción del nitrógeno amoniacal total en un sistema de recirculación. Losordo y Westers (1994) y Timmons *et al.* (2002) utilizaron el balance de masa para el cálculo de la tasa de flujo necesaria para operar un sistema de recirculación.

De la misma manera, a partir del principio de conservación de la energía, se hace el balance de energía aplicado a un volumen de control, estableciendo que la energía es constante, es decir que no se crea ni se destruye solo se transforma (Streeter *et al.*, 2000). El balance de energía se utiliza para cuantificar las pérdidas de carga hidráulica en una determinada región de flujo y para calcular la potencia hidráulica requerida para la circulación del agua en el sistema de cultivo

(Streeter *et al.*, 2000). El balance de energía en condiciones dinámicas se ha utilizado para modelar y predecir la respuesta de la temperatura del agua de la unidad de cultivo de un sistema cerrado, permitiendo cuantificar las pérdidas y realizar cálculos del consumo de energía, lo que indudablemente incide en la viabilidad económica del cultivo en un sistema cerrado (Glouannec y Noël, 1999).

1.2.3 Análisis dinámico.

Los balances de masa y de energía, se puede realizar en estado permanente, lo que significa que la masa o la energía no cambian respecto al tiempo y su incremento en el volumen de control es cero, simplificando los cálculos notablemente; a diferencia del balance no permanente (llamado también análisis dinámico) en el cual la masa o la energía cambian respecto al tiempo (Losordo y Westers, 1994; Streeter *et al.*, 2000).

1.2.4. Modelos en acuicultura.

Bojórquez Castro (1998), definió tres clases de modelos matemáticos aplicables a la acuicultura, para fines cognoscitivos o para la toma de decisiones: I Valores índice, II Descriptores globales y III Valores de optimización. La clase uno está compuesta por fórmulas simples; un ejemplo de ésta son los indicadores morfométricos como el índice de condición (Bojórquez Castro, 1998). Los modelos del segundo tipo describen matemáticamente un determinado proceso a través de la relación entre dos o más variables, por ejemplo Weatherley (1982) y Weatherley *et al.* (1993) describieron el proceso dinámico de transferencia y remoción del nitrógeno amoniacal total y el modelo de Glouannec y Noel (1999) describe la transferencia de calor en la unidad de cultivo. Los modelos de la clase

tres formulan matemáticamente un proceso con el fin de optimizar el valor de una o más variables; como ejemplo, Golz *et al.* (1999) describieron la dinámica de la relación entre la nitrificación y el tiempo de residencia de los sólidos en el biofiltro. Ellos obtuvieron un valor óptimo de la tasa de nitrificación para un intervalo de retrolavado crítico en un biofiltro de cuentas de plástico. Sin embargo, la técnica del análisis dinámico no ha sido usada para describir el proceso de generación, transferencia y remoción de los sólidos suspendidos totales (SST) en un sistema de recirculación, ni se ha incluido el costo de energía de este proceso. En este estudio se va a determinar la respuesta dinámica del balance de masa de los SST en un sistema de recirculación y el consumo de energía requerido en el proceso de remoción de los SST, por medio de la formulación y validación experimental de un modelo matemático.

I.3 Hipótesis.

La respuesta dinámica de los sólidos suspendidos totales en una unidad de bioclarificación de un sistema de recirculación, específicamente la remoción de los sólidos, incide en el coste de la energía requerida para la producción de biomasa.

I.4 Objetivos.

I.4.1 General

Modelar y validar matemáticamente la respuesta dinámica de los sólidos suspendidos totales (SST) y el coste de energía asociado. Este proceso se realizará a través de la aplicación de la ley de la conservación de la masa y la energía en un cultivo de tilapia nilótica, *Oreochromis niloticus*, variedad stirling, en un sistema cerrado.

1.4.2 Específicos

- a) Establecer un modelo matemático para calcular el consumo de energía y la respuesta dinámica en la remoción de sólidos (kW kg^{-1}) con un tamaño de partículas mayores que $1.2 \mu\text{m}$.
- b) Validar el modelo para las condiciones experimentales de un cultivo con tilapia.
- c) Simular la respuesta dinámica del sistema para diferentes tiempos de residencia hidráulica y diferentes volúmenes de medio filtrante.

II MATERIALES Y MÉTODOS.

Con el fin de caracterizar y modelar el flujo de masa y el coste de energía del proceso de remoción de los sólidos en un sistema cerrado, se desarrolló un modelo matemático donde se describen y desarrollan las ecuaciones necesarias, basándose en el balance de masa y de energía. Para validar el modelo se desarrollaron tres experimentos. El primero fue para conocer la dinámica de la generación de los sólidos en el tanque de cultivo. El segundo consistió en estudiar la generación y concentración de los sólidos en el tanque de cultivo para dos diferentes tiempos de residencia hidráulica. El tercero fue para calcular la cantidad de los sólidos retenidos y la pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador y el coste de energía causado por la circulación del agua para la remoción de los sólidos.

II.1 Organismos experimentales.

Para llevar a cabo este experimento se utilizaron 1,000 alevines de tilapia nilótica *Oreochromis niloticus*, variedad stirling, con un peso inicial promedio de 1.3 ± 1.1 g, producidos por la empresa SANAGRO S.A. de C.V., ubicada en Bahía Quino, Sonora. Los organismos fueron transportados por vía aérea hacia la Ciudad de Tijuana y posteriormente trasladados por vía terrestre al área del cultivo del laboratorio de Acuicultura del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en una bolsa de plástico dosificada con oxígeno puro, protegida por una hielera de poliuretano.

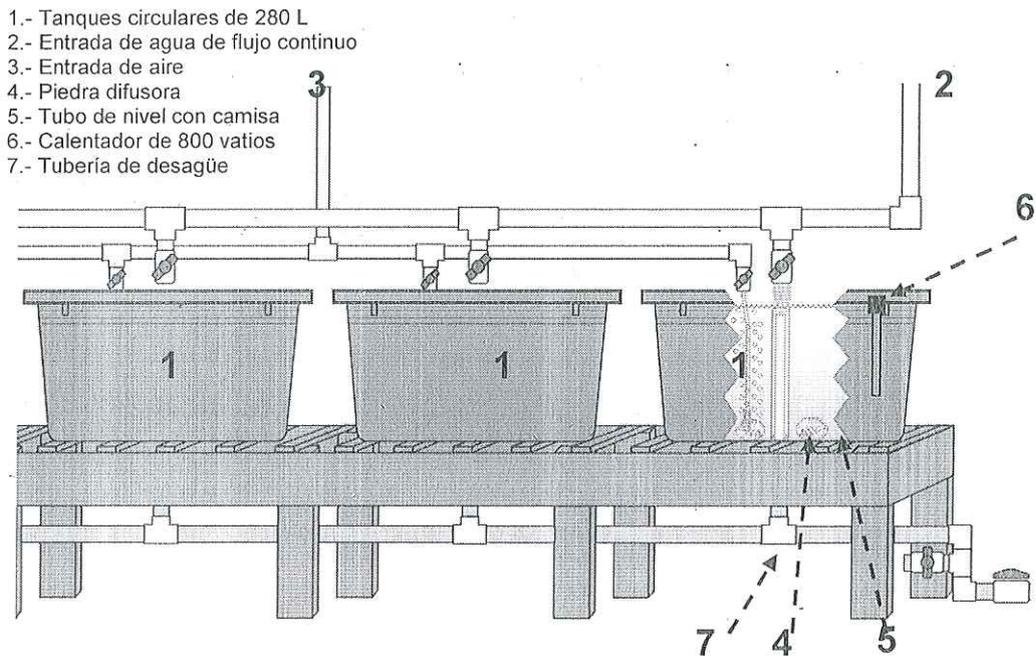
Los organismos se aclimataron por un periodo de dos horas en la unidad de maternidad (Figura 1). Durante las primeras tres semanas del periodo de cultivo,

los organismos fueron alimentados con alimento comercial balanceado tamaños uno y dos con un contenido de 45% de proteína cruda (Purina PetCare Company, Sonora) hasta alcanzar un peso de 12 g.

II.2 Sistemas de cultivo

II.2.1 Maternidad

Este sistema consistió de tres tanques de plástico con fondo plano, color negro, con un diámetro de 0.77 m y altura de 0.46 m y con una capacidad máxima de 280 l. El sistema operó con flujo continuo de agua dulce abastecido por la red de distribución general del Departamento de Acuicultura del CICESE. El flujo de agua de entrada al sistema se mantuvo en 0.5 l min^{-1} , lo que proporcionó una tasa de recambio máxima de 289% por día. La limpieza diaria de los tanques se hizo con un sifón y en caso necesario se cambió la totalidad del agua. El agua se mantuvo a una temperatura constante de $30 \pm 1.33 \text{ }^{\circ}\text{C}$, por medio de un calentador de 800 vatios por tanque, marca Finnex, (Apopka, FL, EUA) (Figura 1). Los organismos permanecieron 56 días en la maternidad, se utilizó un volumen de agua de 40.3 m^3 , con un costo de \$ 324.00 (Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada, CESPE).



Dibujo: Tec. Francisco Valenzuela Buriel

Figura 1. Diagrama del sistema de maternidad, de flujo continuo, con sus componentes principales.

II.2.2 Engorda

El sistema de engorda (Figura 2), consistió de un tanque de fibra de vidrio de fondo plano color azul claro, con 2.62 m de diámetro y 1.1 m de altura, con una capacidad máxima de 3.75 m³; un tanque rectangular de compensación de plástico color azul con 0.65, 0.87 y 1.25 m (alto, ancho y largo, respectivamente) con una capacidad de 0.81 m³, accionado por una bomba centrífuga que suministró un flujo de 432 l min⁻¹ (STA-RITE DYNA-MAX modelo MPEA6F-148L, STA-RITE INDUSTRIES INC., Develan, WI, EUA) de 1.1 kW (1 ½ hp) de potencia

y un biofiltro de cuentas plásticas de 0.028 m^3 con retrolavado mecánico por propela (Aquaculture Systems Technology, Nuevo Orleans, LA, EUA).

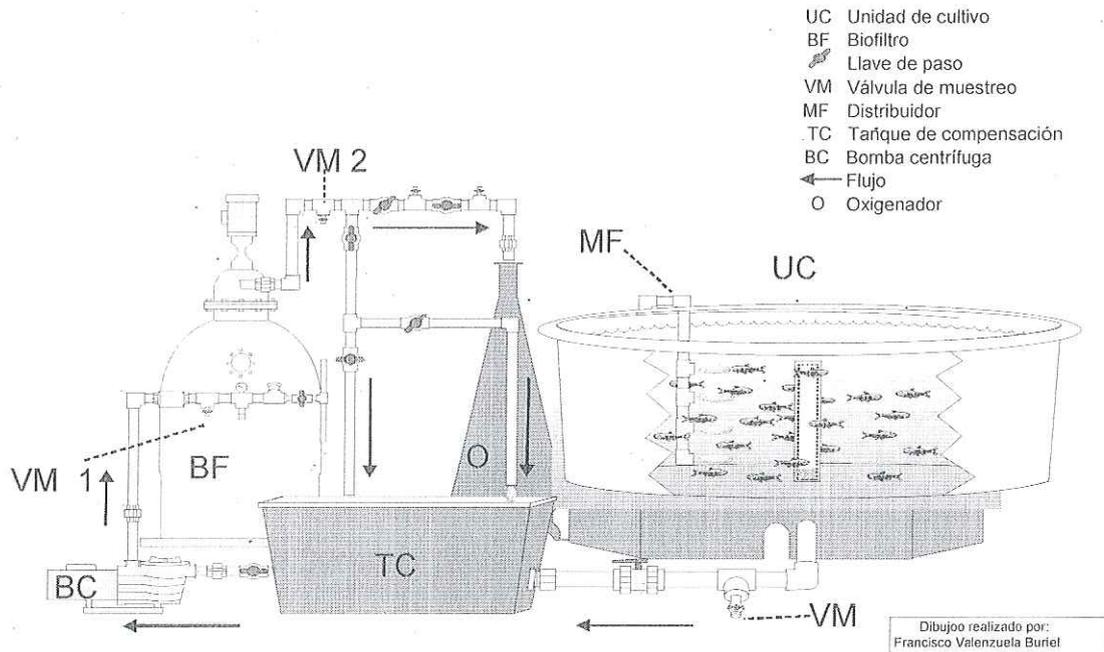


Figura 2. Diagrama del sistema cerrado utilizado para el cultivo de tilapia *Oreochromis niloticus*, variedad stirling.

A fin de mantener la temperatura a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, se utilizó un calentador de inmersión de Titanio de 5000 vatios de potencia (TA5239-PT-I, Process Technology, Mentor, OH, EUA) (Tabla III). El agua fue distribuida en el tanque por medio de una tubería distribuidora con tres salidas de PVC de 2" a diferentes alturas (0.1, 0.4 y 0.8 m).

Tabla III. Características físicas del equipo utilizado en el sistema de cultivo de tilapia *Oreochromis niloticus*, variedad stirling.

Equipo	Tipo	Características	
Tanque de cultivo	Fibra de vidrio	Diámetro medio	2.28 m
		Altura agua	0.85 m
		Volumen de agua	3443 l
		Volumen total	3756 l
Biofiltro	Cuentas de plástico retrolavado con propela	Volumen de medio	0.283 m ³ (10 pie ³)
		Volumen de agua	250 l
		Relación Vm/Vagua	1.13
Tanque de compensación	Plástico azul	Largo medio	1.25 m
		Ancho medio	0.87 m
		Altura de agua	0.33 m
		Volumen de agua	354 l
Bomba	Centrífuga	Potencia	1.1 kW (1 ½ hp)
		Tasa de flujo	432 l min ⁻¹
Calentador	Inmersión de titanio	Potencia	5 kW

II.2.3 Alimentación

El alimento proporcionado a los peces durante la toma de muestras fue del 1% de la biomasa del cultivo. El alimento fue suministrado tres veces por día, a la 8 am, 12 pm y 4 pm, distribuido en tres porciones iguales. A lo largo de la fase experimental se alimentó a las tilapias con una dieta comercial con un contenido de 32% de proteína cruda (El Pedregal Silver Cup, Toluca, México).

II.3 Calidad del agua

La temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la salinidad y el oxígeno disuelto O_2 (mg l^{-1}) del agua fueron monitoreados a diario usando un equipo multiparámetro (YSI modelo 556MPS, Yellow Springs, OH, EUA). El pH fue medido diariamente, con un potenciómetro manual (HANNA Instruments, modelo HI 98127, R I, EUA).

Las mediciones de nitrógeno amoniacal total (NAT), nitritos (NO_2) y alcalinidad se realizaron con un equipo de calidad de agua HACH FF3 (Loveland, CO, EUA), una vez por semana.

II.4 Diseño experimental.

II.4.1 Biomasa y calidad del agua.

Al inicio de cada experimento se efectuó una biometría para calcular la biomasa, tomando al azar una muestra de 20 organismos y midiendo su peso con aproximación de 1 g y la longitud total con aproximación de 0.1 cm. Para calcular el incremento de los compuestos amoniacales durante los muestreos para medir la generación de sólidos, se midió el NAT y los nitritos al inicio y al final del período de muestreo. Las mediciones se hicieron en condiciones isotérmicas (30°C).

II.4.2 Generación de sólidos en el tanque de cultivo.

A fin de conocer la dinámica de la generación de sólidos en el tanque de cultivo, se realizó un experimento con dos muestreos de una duración de 24 horas cada uno. En ambos experimentos, el circuito de la circulación del agua fue tanque de cultivo-bomba-tanque de cultivo (se excluyó el bioclarificador) a una tasa de flujo constante de 60 l min^{-1} (Figura 3).

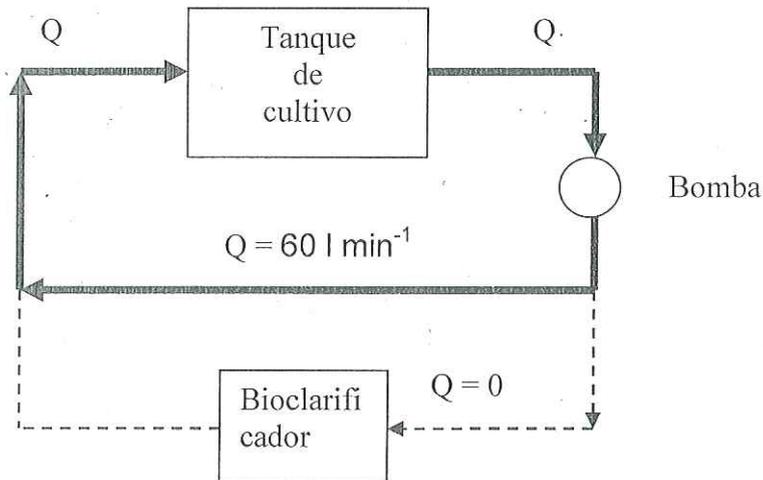


Figura 3. Diagrama de la circulación del agua en el sistema de cultivo durante el experimento uno.

El muestreo consistió en tomar cada dos horas una muestra de agua por triplicado, con un volumen de 800 ml, cada una, iniciando a las 8 am y terminando a las 8 am del día siguiente (Tabla IV). Una vez que las muestras se obtuvieron, se trasladaron al laboratorio para proceder a medir los sólidos suspendidos totales.

Tabla IV. Programación de los muestreos para determinar la generación de sólidos en el tanque de cultivo. Se tomaron muestras de agua por triplicado cada dos horas.

Muestreo	Fecha	Tiempo (Hora)	Número total de muestras
1	1 y 2 / dic/ 06	8 ,10,12,14,16,18,20,22,24,2,4,6,8	39
2	7 y 8 / dic/ 06	8 ,10,12,14,16,18,20,22,24,2,4,6,8	39

Los sólidos suspendidos totales (SST) se cuantificaron en laboratorio según la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, Diario Oficial de la Federación, 1 de agosto de 2001). Brevemente, para la determinación de los SST se utilizó un matraz de filtración preparado con un filtro de microfibras de vidrio de 1.2 μm (Whatman, grado GF/C, Brentford, Inglaterra). Previamente se eliminó de los filtros toda traza de humedad y materia orgánica, colocándolos en un horno a una temperatura de 104 °C, durante 2 horas obteniendo el peso de los filtros secos. La muestra de agua se filtró y los sólidos retenidos se secaron a 104 °C durante 6 horas y se midió el peso del filtro seco más los sólidos. Los SST se obtuvieron por la diferencia entre el peso seco del filtro con los sólidos y el peso del filtro, dividido entre el volumen filtrado.

La relación de excreción de sólidos (Es) se calculó como el cociente del valor máximo de los sólidos generados (SST) en g, dividido entre el alimento proporcionado en g.

II.4.3 Concentración de sólidos en el tanque de cultivo para diferentes tiempos de residencia hidráulica.

La concentración de los SST fue determinada en el tanque de cultivo con el fin de comparar la respuesta experimental con la obtenida por el modelo con dos diferentes tiempos de residencia hidráulica. En la unidad de producción, el circuito de la circulación del agua fue tanque de cultivo – bomba – bioclarificador - tanque de cultivo (Figura 4). Para determinar los SST se efectuaron dos períodos de muestreos de 24 horas cada uno, utilizando los tiempos de residencia hidráulica $Tr = 0.74$ h y $Tr = 0.41$ h.

Las muestras de agua se obtuvieron de la superficie del agua del tanque de cultivo, por triplicado, durante el período experimental (Tabla V). Los SST se cuantificaron tal como se describió en el apartado anterior.

Tabla V. Programación de los muestreos para determinar la concentración de los SST en el tanque de cultivo, utilizando dos tiempos de residencia hidráulica. Se tomaron muestras de agua por triplicado.

Muestreo	Fecha	Tiempo (Hora)	Número total de muestras	Tr (h)
1	24-25 / ene/ 07	9 ,13,17,21,1,5,9	21	0.74
2	8 -9 / feb/ 07	8,12,12:15,14,16,20,24,8	24	0.41

II.4.4 Sólidos retenidos en el bioclarificador.

A fin de determinar la concentración de SST retenidos en el bioclarificador, se tomaron muestras de agua por triplicado a la entrada y a la salida del mismo, en dos diferentes períodos de muestreo. La duración de los muestreos uno y dos fueron de 52 y 72 h, respectivamente (Tabla VI).

Tabla VI. Programación de los muestreos para determinar la concentración de SST a la entrada y salida del bioclarificador. Se tomaron muestras de agua por triplicado.

Muestreo	Fecha	Hora	Número total de muestras
1	24-27 / ene/ 07	9,13,17,21,1,5,9,13,17,21,5,10	42
2	8 -11 / feb/ 07	8,12,12:24,14,16,20,24,8, 8	30

A fin de determinar la concentración de los sólidos retenidos en el bioclarificador (S_{ret}), se calculo la diferencia entre las concentraciones de SST a la entrada y a la salida del mismo y esa cantidad fue multiplicada por el volumen de agua que circula por el bioclarificador y por el tiempo, por medio de la fórmula.

$$S_{ret} = \Sigma \Delta C \cdot Q \cdot t \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde: S_{ret} son los sólidos retenidos en el bioclarificador, g; ΔC es la diferencia de concentración de los SST a la entrada y la salida del bioclarificador, $g\ l^{-1}$; Q es la tasa de flujo, $l\ min^{-1}$ y t es el tiempo transcurrido entre la toma de cada muestra, min. El símbolo Σ indica la suma de sólidos calculada para todas las muestras. La concentración de sólidos retenidos en $g\ l^{-1}$, fue obtenida al dividir los sólidos retenidos S_{ret} entre el volumen del filtro. Los SST se determinaron en el laboratorio tal como se describió anteriormente.

II.4.5 Tasa de flujo.

En forma simultánea a las determinaciones de los SST descrita en el inciso anterior, se midieron la velocidad del agua en el bioclarificador, en el tanque de cultivo y en el tubo de retorno. La tasa de flujo se calculó multiplicando la velocidad del agua ($m\ s^{-1}$) por el área de la tubería (m^2). El tiempo de residencia hidráulica se calculó con la expresión siguiente.

$$Tr = \frac{V}{Q} \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde: Tr es el tiempo de residencia hidráulica, h; V es el volumen del tanque de cultivo, l; Q es la tasa de flujo en el tanque de cultivo, $l\ h^{-1}$.

La velocidad del agua en la tubería se obtuvo utilizando un flujómetro ultrasónico, digital (Omega Engineering, Inc. Stamford, CT, EUA). La duración y periodicidad de las mediciones fueron las mismas que en el inciso anterior (Tabla VI).

II.4.6 Medición de la pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador.

Con el fin de obtener una relación entre los sólidos retenidos y la pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador, se midió la presión del agua a la entrada y

salida. Para tal efecto, se instalaron dos manómetros de carátula; a la entrada del bioclarificador se colocó un manómetro de 0.25 % de precisión con un intervalo de presiones de 0 a 15 psi (lb pulg⁻²) con división mínima de 0.05 psi (Ashcroft, Costa Mesa, CA, EUA). A la salida del bioclarificador se instaló un manómetro de una precisión de 1%, con un intervalo de presiones de 0 a 30 psi y división mínima de 0.5 psi, (Aquasystems, Carmignano di Brenta, PD, Italia). Las mediciones se efectuaron a los tiempos y periodicidad indicados en la Tabla VI. La pérdida de carga hidráulica se calculó obteniendo la diferencia entre ambas mediciones, utilizando para ello la siguiente expresión.

$$h = 0.7056 \left(\frac{P_s - P_e}{\gamma} \right) \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde: P_e y P_s son las presiones a la entrada y salida del bioclarificador, respectivamente, en lb pulg⁻², γ es el peso volumétrico del agua a 30 °C igual a 0.036 lb pulg⁻³ y el número 0.7056 es un factor de conversión para expresar la pérdida de carga hidráulica en metros (Streeter *et al.*, 2000).

II.5 Análisis estadístico.

Las temperaturas medias de los cuatro muestreos realizados en la unidad de cultivo de los experimentos uno y dos, fueron comparadas utilizando un análisis de varianza de una vía con un nivel de significancia de 0.05, utilizando el programa Statistica, Versión 6 (Tulsa, OK, EUA).

En el experimento uno, para medir la dinámica de la generación de los sólidos en el tanque de cultivo, se efectuaron las pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk a la variable SST y a la variable con las transformaciones

logaritmo natural y raíz cuadrada. Al detectarse que los datos no fueron normales se efectuó la comparación entre muestreos con la prueba no paramétrica Wilcoxon-Mann-Whitney (Zar, 1996) con un nivel de significancia de 0.05, se utilizó el programa Statistica, Versión 6, (Tulsa, OK, EUA).

En el experimento dos, para medir la concentración de sólidos en el tanque de cultivo para los dos diferentes tiempos de residencia hidráulica, la normalidad de la variable SST se verificó con las pruebas Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk. La comparación entre las medias de ambos muestreos se efectuó con la prueba "t de student", con una significancia de 0.05. Las medias de los SST en los diferentes tiempos de muestreo fueron comparadas con una prueba ANOVA de una vía, para cada tiempo de residencia hidráulica, con una significancia de 0.05. También se compararon las medias de los SST para los efectos combinados del T_r y el tiempo de muestreo en ambos períodos de muestreo, con una ANOVA de dos vías y una significancia de 0.05, se utilizó el programa Statistica, Versión 6 (Tulsa, OK, EUA).

En el experimento tres, se compararon las concentraciones de los SST a la entrada y salida a fin de determinar los SST retenidos en el bioclarificador, para las dos series de muestras obtenidas. Se llevaron a cabo pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk para los SST, al encontrarse que los datos no fueron normales, se utilizó la prueba no paramétrica Wilcoxon-Mann-Whitney, con un nivel de significancia de 0.05, utilizando el programa Statistica, Versión 6 (Tulsa, OK, EUA). Con los SST retenidos en el bioclarificador en $g\ l^{-1}$, como variable independiente y la pérdida de carga hidráulica, como variable

dependiente, en m, se obtuvo la regresión para cada uno de los dos muestreos realizados. A fin de determinar la función C_2 para el muestreo uno, utilizando el tiempo en horas como variable independiente y la concentración de SST en mg l^{-1} a la salida del bioclarificador como variable de respuesta, se llevó a cabo una regresión utilizando el programa Microsoft Office Excel, 2003, (Redmond, WA, EUA). Los valores medios obtenidos de los muestreos uno y dos de la variable pérdida de carga hidráulica fueron comparados utilizando la prueba "t de student" con un nivel de significancia de 0.05, se utilizó el programa Statistica, Versión 6 (Tulsa, OK, EUA).

Para la solución del sistema de ecuaciones diferenciales que constituyen el modelo, se utilizó el programa de cómputo Matlab, versión 7.0 (Natick, MA, EUA).

II.6 Formulación del modelo.

II.6.1 Esquema conceptual del sistema cerrado usado para la remoción de los sólidos.

El esquema del sistema de cultivo utilizado para la remoción de los sólidos, consistió de la unidad de cultivo, bioclarificador, bomba y tuberías que conectan a esos componentes formando dos circuitos. Un circuito conectaba el bioclarificador y la unidad de cultivo y el otro conectaba el bioclarificador y la bomba, permitiendo regular el flujo de agua hacia el tanque de cultivo; las variables indicadas en el esquema son algunas de las que intervienen en la formulación del modelo (Figura 4).

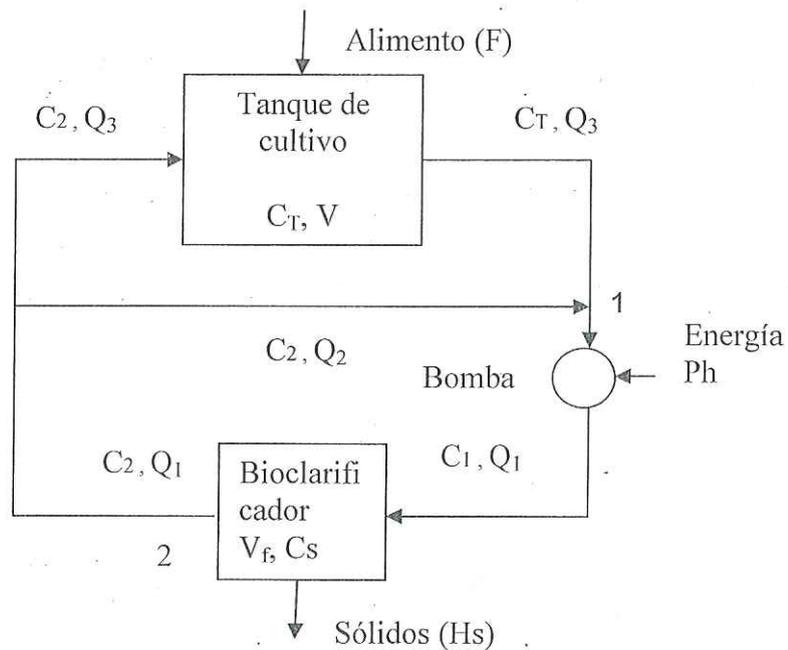


Figura 4. Diagrama conceptual del modelo de sistema cerrado usado para el balance de masa y energía para la remoción de los sólidos suspendidos totales (SST), mostrando todas las variables involucradas.

Donde: C_s es la concentración de sólidos en el bioclarificador, mg l^{-1} ; C_T es la concentración de sólidos en el tanque de cultivo, mg l^{-1} ; C_1 y C_2 son las concentraciones de SST a la entrada y salida del bioclarificador, respectivamente, en mg l^{-1} ; F es el alimento proporcionado, g; Ph es la potencia hidráulica, Vatio; Q_1 es la tasa de flujo en el bioclarificador, l min^{-1} ; Q_2 es la tasa de flujo en el tubo de retorno, l min^{-1} ; Q_3 es la tasa de flujo en el tanque de cultivo, l min^{-1} ; V es el volumen de agua del tanque de cultivo, l; V_f es el volumen de agua del bioclarificador, l y 1 es la unión uno.

II.6.2 Balance de masa en el tanque de cultivo.

La ecuación fundamental para el balance de masa, se basa en la primera ley de la termodinámica la cual se refiere a la conservación de la masa, aplicada a un volumen de control y se expresa de la forma siguiente.

$$\Delta m = E - S + G - R \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde, Δm es el incremento de masa, E es la entrada de masa, S es la salida de masa, G la generación de masa y R la remoción de masa, todos los términos tienen unidades de masa, mg.

Si se considera al tanque como volumen de control (Figura 4), se establece el balance de masa, el cual queda expresado con la siguiente ecuación.

$$V dC_T = Q_3 C_2 dt - Q_3 C_T dt + F Es \phi(t) dt \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde: Es, es la relación de excreción de sólidos, adimensional; $\phi(t)$ es la tasa de producción h^{-1} ; y t es el tiempo h. Despejando la ecuación cinco, se obtiene la ecuación diferencial para la concentración de sólidos en el tanque de cultivo.

$$\frac{dC_T}{dt} = \left(\frac{Q_3}{V}\right)(C_2 - C_T) + \left(\frac{F Es}{V}\right)\phi(t) \quad (\text{ecuación 6})$$

La relación de excreción Es toma los siguientes valores: 0.18 a 0.69 $mg_{\text{sólidos}} / mg_{\text{alimento}}^{-1}$ (Golz *et al.*, 1999). Se utilizaron dos funciones para la tasa de producción de los sólidos, una que es constante $\phi(t) = 0.0417 h$ (1/24 h) y otra que es variable (Riche *et al.*, 2004) que describe la dinámica de la producción de los sólidos en un período de 24 horas, considerando que la tasa de producción de los sólidos sigue el comportamiento de una curva con distribución normal (Zar, 1996).

$$\phi(t) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) e^{-(t-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde, μ es la media con un valor de 16 h y σ es la desviación estándar con un valor de 3.44 h, lo cual significa que el 99% de la excreción se produce en un período de 24 h y que el máximo se encuentra a las 16 h.

II.6.3 Balance de masa en el bioclarificador.

En el bioclarificador se retienen los sólidos suspendidos generados en el tanque de cultivo. Si se considera el bioclarificador como volumen de control, se establece el balance de masa y se obtiene la ecuación siguiente.

$$V_f dC_s = Q_1 C_1 dt - Q_2 C_2 dt - k_s S_v V_f C_s dt \quad (\text{ecuación 8})$$

Donde: k_s es la tasa específica de descomposición de sólidos, h^{-1} , S_v es la relación entre los sólidos suspendidos volátiles y sólidos suspendidos totales $S_{SV} S_{ST}^{-1}$.

El término $k_s S_v C_s$ representa la tasa de descomposición de los sólidos. La tasa de descomposición utilizada fue de 0.07 (intervalo de la variable: 0.07 a 0.12 día⁻¹) y en la relación sólidos volátiles a sólidos suspendidos tomó el valor constante de 0.88 (Golz *et al.*, 1999). Despejando de la ecuación 8, la ecuación 9 determina los SST retenidos en el bioclarificador.

$$\frac{dC_s}{dt} = \left(\frac{Q_1}{V_f} \right) (C_1 - C_2) - k_s S_v C_s \quad (\text{ecuación 9})$$

En la unión uno (Figura 4) se establece el balance de masa y se obtiene la siguiente ecuación, en la cual del lado izquierdo es igual a cero debido a que el incremento de masa en ese punto es cero.

$$0 = Q_2 C_2 dt + Q_3 C_T dt - Q_1 C_1 dt \quad (\text{ecuación 10})$$

De la ecuación 10 se despeja C_1 y se obtiene

$$C_1 = \frac{Q_2 C_2 + Q_3 C_T}{Q_1} \quad (\text{ecuación 11})$$

Se sustituye la ecuación (10) en la ecuación (8) y simplificando se obtiene

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{Q_3}{Vf} \left[C_T - \left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_3} \right) C_2 \right] - k_s S_v C_s \quad (\text{ecuación 12})$$

Las ecuaciones 6 y 12 son las ecuaciones diferenciales específicas para definir el balance de masa en el tanque de cultivo y el bioclarificador, respectivamente, las cuales forman un sistema de dos ecuaciones con tres incógnitas: C_s , C_T y C_2 .

II.6.4. Regresión entre los sólidos suspendidos a la salida del bioclarificador con respecto al tiempo.

A fin de obtener la función C_2 , se efectuó una regresión entre el tiempo, en h, como abscisa y los sólidos a la salida del bioclarificador en mg l^{-1} , en las ordenadas; se obtuvo la siguiente ecuación:

$$C_2 = 2 \times 10^{-5} t^4 - 0.0029 t^3 + 0.1213 t^2 - 1.8689 t + 13.002 \quad (\text{ecuación 13})$$

II.6.5 Solución del sistema de ecuaciones diferenciales.

La ecuación 13 se sustituyó en la 12 y el sistema formado por las ecuaciones diferenciales 6 y 14, se resolvió con el programa de cómputo Matlab, versión 7.0 (Natick, MA, EUA) (ver anexo).

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{Q_3}{Vf} \left[C_T - \left(\frac{Q_1 - Q_2}{Q_3} \right) \left(2 \times 10^{-5} t^4 - 0.0029 t^3 + 0.1213 t^2 - 1.8689 t + 13.002 \right) \right] - k_s S_v C_s$$

(ecuación 14)

El modelo se resolvió para dos tasas de producción de sólidos: una que es constante $\varnothing(t) = 1/24$ h y otra variable con un comportamiento normal (ecuación 7). El modelo se calibró con la relación de excreción de sólidos E_s y la tasa de descomposición de sólidos k_s y la relación de sólidos volátiles a sólidos suspendidos se mantuvieron constantes.

II.6.6 Pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador.

La pérdida de carga hidráulica es una pérdida de energía producida por el efecto de la fricción en las tuberías, válvulas y biofiltros. En un bioclarificador, debido a que hay retención de sólidos y obstrucción por acumulación en el tiempo, la pérdida de carga tiene un componente inicial y otro que depende del tiempo (Metcalf & Eddy, 1996; Golz *et al.*, 1999).

$$\Sigma h = h_o + h(t) \quad (\text{ecuación 15})$$

Donde: Σh es la suma de pérdidas de carga expresada en metros, h_o es la pérdida de carga inicial para agua limpia, m y $h(t)$ es la pérdida de carga para el instante t , m.

Para calcular h_o se midieron las presiones del agua en libras sobre pulgada cuadrada (psi) a la entrada y a la salida del bioclarificador. De la misma manera, para calcular $h(t)$, se obtuvieron las presiones del agua a la entrada y salida del bioclarificador durante dos diferentes períodos de tiempo, uno de 52 h y el otro de 72 h. La pérdida de carga producida por el biofiltro se calculó con la expresión siguiente:

$$\Sigma h = a + bCs \quad (\text{ecuación 16})$$

Donde: Cs son los sólidos retenidos en el bioclarificador, $g\ l^{-1}$ y a y b son constantes que dependen del medio filtrante y que fueron obtenidas experimentalmente.

II.6.7 Balance de energía en el bioclarificador.

A partir de la ecuación del balance de energía aplicada entre los puntos uno y dos, uno a la entrada de la bomba y el otro a la salida del bioclarificador, respectivamente (Figura 4) es una expresión para calcular la carga dinámica de la bomba.

$$H = z_2 - z_1 + \Sigma h \quad (\text{ecuación 17})$$

Donde: H es la carga dinámica de la bomba expresada en metros, $z_2 - z_1$ es la carga estática, la cual se calcula como la diferencia de alturas entre los puntos uno= z_1 y dos= z_2 y Σh es la suma de pérdida de carga entre ambos puntos en m, que representa la pérdida de carga en el bioclarificador (ecuación 16).

II.6.8 Potencia hidráulica

La potencia hidráulica se calculó con la siguiente expresión (Streeter *et al.*, 2000).

$$Ph = \gamma QH \quad (\text{ecuación 18})$$

Donde: Ph es la potencia hidráulica en Vatio = $J\ s^{-1}$, γ es el peso volumétrico del agua de cultivo, $N\ m^{-3}$; Q es la tasa de flujo en el biofiltro, $m^3\ s^{-1}$ y H es la carga dinámica, m.

Al sustituir las ecuaciones 16 y 17 en la 18, se obtuvo la ecuación con la cual se calculó la potencia hidráulica en función de la tasa de flujo y de los sólidos retenidos en el bioclarificador.

$$Ph = \gamma Q(z_2 - z_1 + a + bCs) \quad (\text{ecuación 19})$$

la cual se calculó para $\gamma = 9767 \text{ N m}^{-3}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (Streeter *et al.*, 2000); $Q = 0.00726 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $z_2 - z_1 = 0.60 \text{ m}$ y los valores de las constantes a y b se determinaron a partir del experimento tres.

La potencia hidráulica en función del tiempo se calculó a partir de la relación existente entre los sólidos retenidos en el bioclarificador y el tiempo. Por otra parte se calculó el incremento de la potencia en (%) con el tiempo, tomando como referencia a la potencia inicial igual a cero %. El cálculo del consumo de energía en relación con el alimento proporcionado se realizó como el cociente entre la potencia hidráulica y el alimento proporcionado a los organismos en un período de 24 h.

II.6.9 Coste de remoción de los sólidos y coste por unidad de alimento proporcionado.

El coste de remoción de sólidos se calculó como el cociente entre la potencia hidráulica y los sólidos retenidos en el filtro.

$$E_r = \frac{Ph}{S_{ret}} \quad (\text{ecuación 20})$$

Donde: E_r es el coste de remoción de sólidos, kW kg^{-1} .

El consumo de energía en relación con el alimento proporcionado se calculó como el cociente entre la potencia hidráulica y el alimento proporcionado.

$$E_f = \frac{Ph}{F} \quad (\text{ecuación 21})$$

Donde: E_f , es la energía en relación al alimento proporcionado, kW kg^{-1} ; F es el alimento proporcionado, kg .

II.7 Simulación.

II.7.1 Tasa de residencia hidráulica variable.

La predicción de la concentración de sólidos suspendidos en el tanque de cultivo, se efectuó utilizando las ecuaciones 6 y 14; la ecuación 6 se expresó en términos del tiempo de residencia hidráulica.

$$\frac{dC_T}{dt} = \left(\frac{1}{Tr}\right)(C_2 - C_T) + \left(\frac{F Es}{V}\right)\phi(t) \quad (\text{ecuación 22})$$

La tasa de flujo en la tubería de retorno fue igual a cero ($Q_2 = 0$) y la tasa de flujo en el filtro fue igual a la del tanque ($Q_1 = Q_3$), además, la relación volumen de medio entre volumen del filtro es: $V_m = 1.13 V_f$ (Tabla III) y sustituyendo esos valores en la ecuación 14 se re-ordena y se expresa como.

$$\frac{dC_s}{dt} = 1.13 \left(\frac{V}{V_m}\right) \left(\frac{1}{Tr}\right) \left[C_T - (2 \times 10^{-5} t^4 - 0.0029 t^3 + 0.1213 t^2 - 1.8689 t + 13.002) \right] - k_s S_v C_s \quad (\text{ecuación 23})$$

A fin de conocer la concentración de SST retenidos en el biofiltro, el sistema de ecuaciones 22 y 23, fue resuelto para cada uno de los siguientes valores del tiempo de residencia hidráulica: 0.25, 0.5, 1.2 y 2 h. Los volúmenes del tanque, $V = 3443 \text{ l}$ y del medio filtrante, $V_m = 10 \text{ pie}^3$, permanecieron constantes. Se calculó la potencia hidráulica máxima que se requiere para la circulación del agua en el

sistema para los diferentes Tr , utilizando la ecuación 19. Se utilizó el programa de cómputo Matlab, versión 7.0 (Natick, MA, EUA).

II.7.2 Volumen de medio filtrante variable.

Las ecuaciones 22 y 23 se utilizaron para predecir la concentración de los SST, mg l^{-1} , que se retuvieron en el biofiltro, tomando como variable el volumen del medio filtrante, los valores utilizados fueron: $V_m = 1, 2, 6$ y 10 pie^3 . Para la simulación, la tasa de residencia fue constante ($Tr = 0.5 \text{ h}$). La tasa de flujo en la unidad de cultivo y en el bioclarificador fueron iguales ($Q_1 = Q_3$) y la tasa de flujo en la tubería de retorno fue igual a cero ($Q_2 = 0$). La potencia hidráulica que se requiere para circular el agua del sistema, para los diferentes tamaños del bioclarificador, se calculó utilizando la ecuación 19.

III RESULTADOS.

III.1 Biomasa y calidad del agua.

La biomasa total fue de 170 ± 35.71 y de 174 ± 27.92 kg (media \pm DE) y la tasa de alimentación fue del 1% de la biomasa para el experimento uno, mientras que la biomasa fue de 215 ± 28.29 y de 219 ± 44.25 kg y la tasa de alimentación fue del 0.8% de la biomasa para los experimentos dos y tres, (Tabla VII). La densidad máxima del cultivo fue de 63.6 kg m^{-3} considerando el volumen de agua del tanque de cultivo.

Tabla VII. Biomasa en kg (media \pm DE) y cantidad de alimento proporcionado en g, durante el período en el que se efectuaron los experimentos.

Experimento	Muestreo	Duración (h)	Biomasa (kg)	Alimento (g)
1	1	24	170 ± 35.71	1700
	2	25	174 ± 27.92	1728
2 y 3	1	52	215 ± 28.29	3199
	2	72	219 ± 44.25	5650

Los experimentos se realizaron manteniendo la temperatura con un valor de 30.57 ± 1.33 °C (media \pm DE). No se encontraron diferencias significativas entre

las temperaturas medias durante la realización de los tres experimentos ($p > 0.05$).

Tabla VIII. Calidad del agua presente durante los tres experimentos. Las mediciones de nitrógeno amoniacal total (NAT) y de nitritos (NO_2^-) se hicieron al inicio y al final del experimento uno y solo al inicio en los experimentos dos y tres. Los superíndices con letras diferentes indican diferencias significativas.

Experimento	Muestreo	NAT		NO_2^-		T	O_2
		(mg l ⁻¹)		(mg l ⁻¹)		(°C)	(mg l ⁻¹)
		Inicial	Final	Inicial	Final		
1	1	0.9	12	5.28	3.3	30.86 ± 1.35 ^a	4.26 ± 0.66 ^a
	2	1.8	10	0.83	5.28	31.56 ± 1.35 ^a	4.29 ± 1.19 ^a
2 y 3	1	0.8	---	0.33	---	30.20 ± 1.10 ^a	1.90 ± 0.03 ^b
	2	0.8	---	0.13	---	30.23 ± 1.36 ^a	3.57 ± 0.89 ^a

III.2 Generación de sólidos en el tanque de cultivo.

La concentración de los SST generados en el tanque de cultivo fueron 14.66 ± 9.01 y 19.88 ± 14.53 mg l⁻¹ (media ± DE) para los muestreos uno y dos, respectivamente (Tabla IX).

La concentración de SST alcanzó valores máximos de 31.3 y 51.06 mg l⁻¹ entre las 16 y 18 h, con una notable disminución después de esas horas (Figura 5). No se encontraron diferencias significativas en la concentración de los SST generados en ambos muestreos, en un período de 24 h ($p > 0.05$). La relación de

excreción de sólidos, Es, fue de 0.057 y de 0.094 para los muestreos uno y dos, respectivamente (Tabla X).

Tabla IX. Concentración de sólidos suspendidos totales generados en la tanque de cultivo en mg l^{-1} (media \pm DE), en ambos muestreos. Los superíndices con letras diferentes indican diferencias significativas.

Experimento	Muestreo	Localización	Número total de muestras	SST (mg l^{-1})
1	1	Tanque de cultivo	39	14.66 ± 9.01^a
	2	Tanque de cultivo	39	19.88 ± 14.53^a

Tabla X. Relación de excreción de sólidos (Es), obtenida para los valores máximos de los sólidos generados.

Muestreo	Alimento (g)	C_{inicial} (mg l^{-1})	$C_{\text{máxima}}$ (mg l^{-1})	ΔC (mg l^{-1})	SST (g)	Es
1	1700	3.10	31.30	28.20	97.09	0.057
2	1728	3.67	51.06	47.39	163.16	0.094

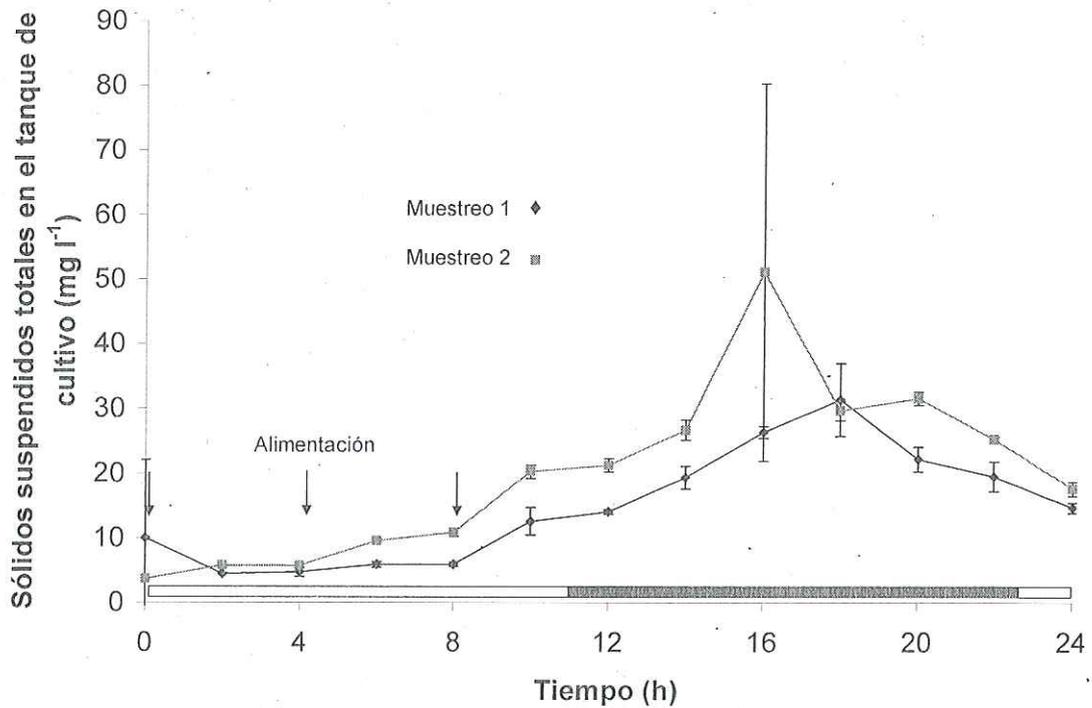


Figura 5. Generación de sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} (media \pm DE), durante un período de 24 horas sin bioclarificador, para los muestreos uno y dos del experimento uno. Las zonas claras en el eje de las abscisas indican las horas del día.

III.3 Concentración de sólidos en el tanque de cultivo para diferentes tiempos de residencia hidráulica.

La concentración de SST en la unidad de cultivo que se obtuvo fue de 7.87 ± 2.43 y de $4.99 \pm 1.78 \text{ mg l}^{-1}$ (media \pm DE) para los muestreos uno y dos, respectivamente, (Tabla XI) y (Figura 6).

Tabla XI. Sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} , para dos tasas de flujo diferentes. Los superíndices con letras diferentes indican diferencias significativas.

Experimento	Muestreo	Número total de muestras	Q (l min^{-1})	Tr (h)	SST (mg l^{-1})
2	1	21	78	0.74	7.87 ± 2.43^a
	2	24	139	0.41	4.99 ± 1.75^b

Se detectaron diferencias significativas entre las medias de las concentraciones de los SST en ambos períodos de muestreo ($p < 0.001$). También se obtuvieron diferencias significativas entre los SST para los diferentes tiempos de muestreo de ambos tiempos de residencia hidráulica ($p < 0.01$) y se encontraron diferencias significativas de los SST para los efectos combinados del Tr y del tiempo de muestreo entre ambos períodos de muestreo ($p < 0.001$).

Los valores máximos de SST se detectaron a las 0 y 4 h después de iniciado el muestreo (Figura 6, letra R) se explican por la hora a la cual se realizó el retrolavado del biofiltro y los máximos que se observaron a las 16 horas se explican por las evacuaciones de los organismos de cultivo (Figura 6, letra H).

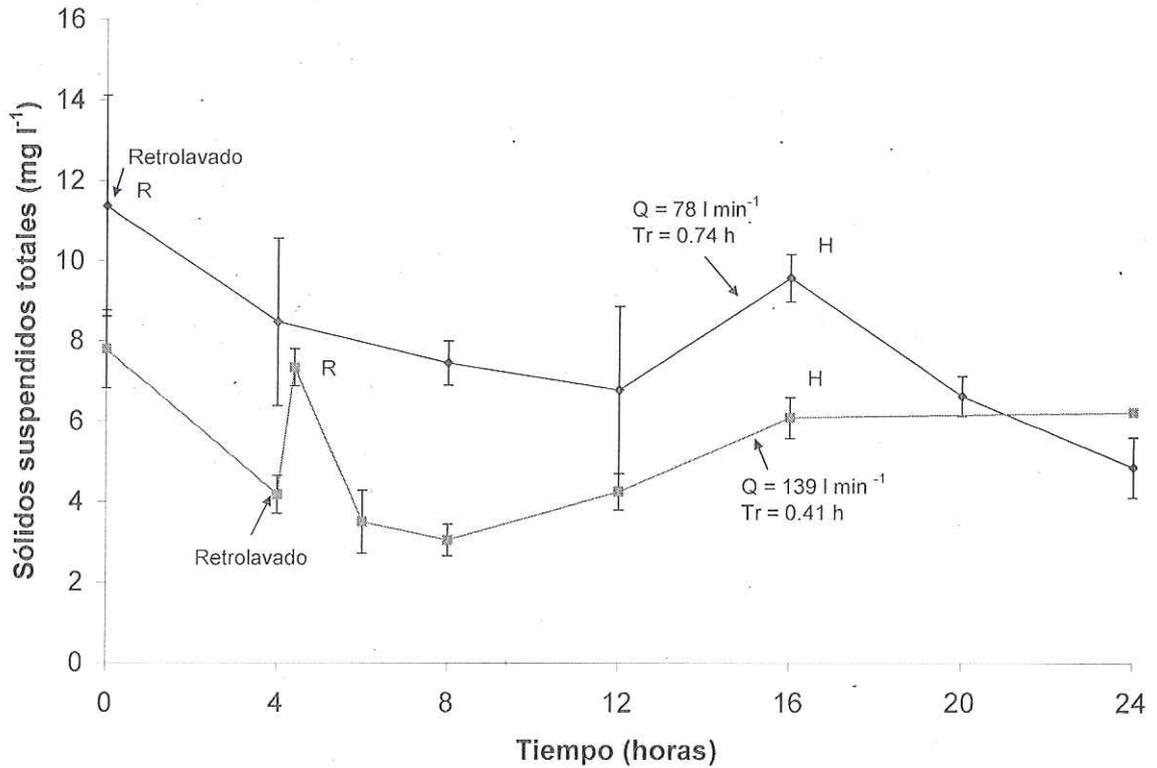


Figura 6. Concentración de sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} (media \pm DE) en un período de 24 horas, para dos diferentes tiempos de residencia hidráulica.

III.4 Sólidos retenidos en el bioclarificador.

Los SST promedio a la entrada del bioclarificador fueron de 6.35 ± 2.50 y de $7.46 \pm 7.48 \text{ mg l}^{-1}$, media \pm DE, para los muestreos uno y dos; mientras que a la salida del bioclarificador fueron de 5.54 ± 2.67 y de $6.37 \pm 7.44 \text{ mg l}^{-1}$, respectivamente (Tabla XII) y (Figuras 7 y 8). Se detectaron diferencias significativas en la concentración de los SST a la entrada y salida del biofiltro, tanto para el muestreo uno como para el dos ($p < 0.01$). Los valores máximos que se observaron a las

ceros y a las cuatro horas se deben al efecto de los retrolavados del bioclarificador (Figuras 7 y 8).

Tabla XII. Sólidos suspendidos totales, a la entrada y salida del bioclarificador, para los muestreos uno y dos, en mg l^{-1} (media \pm DE). Los superíndices con letras diferentes (ab o xy) indican diferencias significativas.

Experimento	Muestreo	Localización	Número total de muestras	SST (mg l^{-1})
3	1	Entrada del filtro	42	6.35 ± 2.50^a
		Salida del filtro	42	5.54 ± 2.67^b
	2	Entrada del filtro	30	7.46 ± 7.48^x
		Salida del filtro	30	6.37 ± 7.44^y

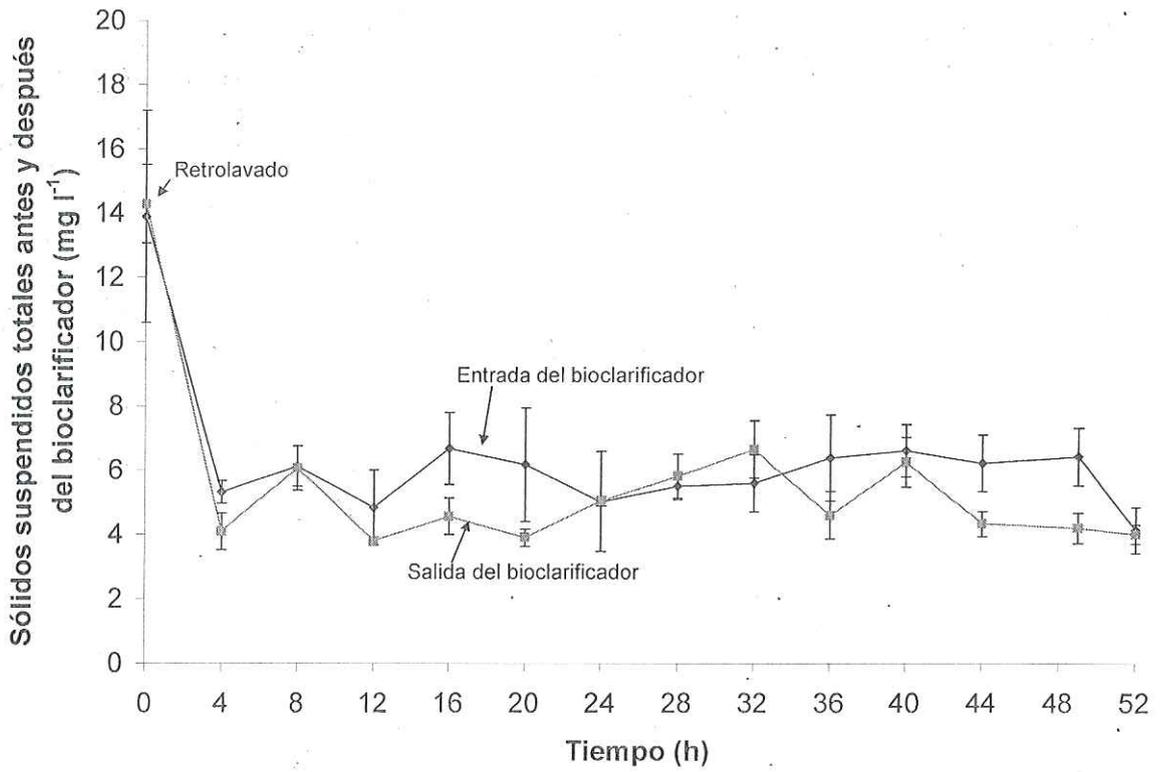


Figura 7. Concentración de sólidos suspendidos totales a la entrada y salida del bioclarificador para el muestreo uno en mg l^{-1} (media \pm DE).

En el muestreo dos (Figura 8) el retrolavado del bioclarificador se efectuó a las cuatro horas de iniciado el muestreo el incremento de los sólidos es notable (24 mg l^{-1}), pero dos horas después la concentración de los sólidos regresó a los niveles iniciales de alrededor de 4.5 mg l^{-1} .

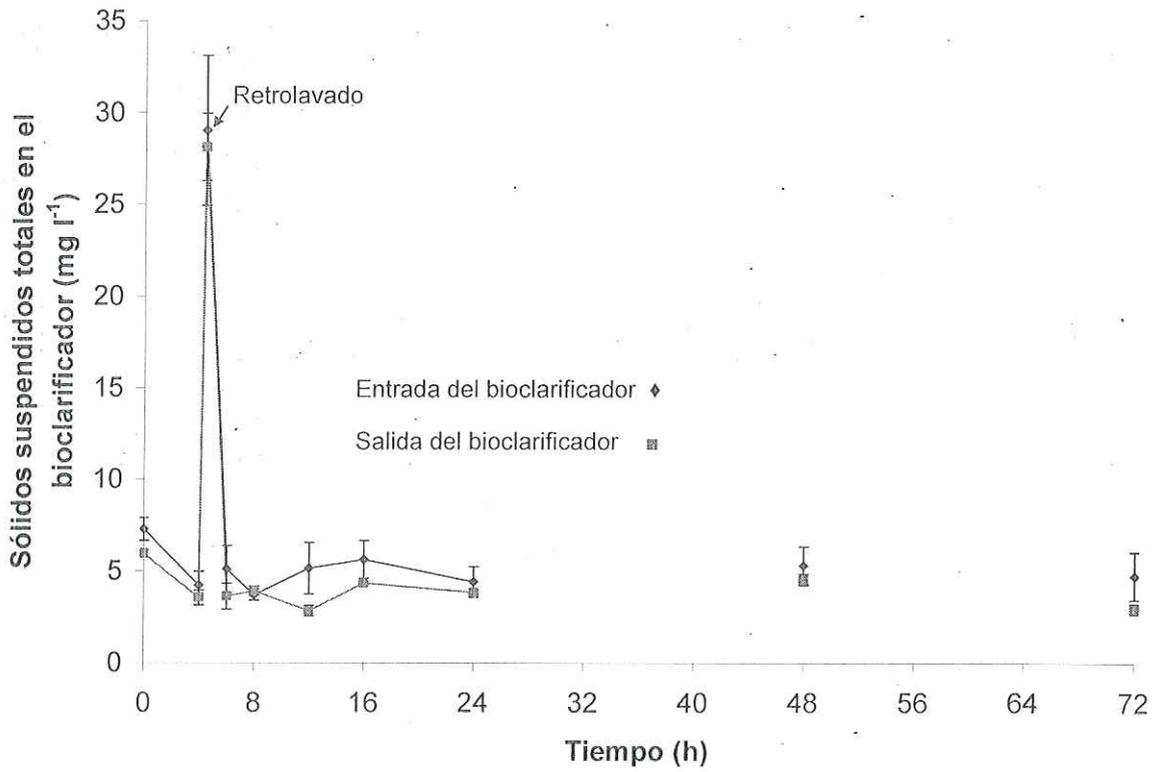


Figura 8. Concentración de sólidos suspendidos totales a la entrada y salida del bioclarificador para el muestreo dos en mg l^{-1} (media \pm DE).

El acumulado de los SST retenidos en el bioclarificador fueron 1211 y 1752 g, para los muestreos uno y dos y los valores máximos de la concentración de sólidos retenidos en el filtro fueron de 24.84 y de 7.01 g l^{-1} (Tabla XIII).

Tabla XIII. Sólidos suspendidos retenidos en el bioclarificador, para los muestreos uno y dos, en g.

Experimento	Muestreo	Duración (h)	Alimento (g)	S ret (g)	Cs (g l ⁻¹)
3	1	52	3199	1211	4.84
	2	72	5650	1752	7.01

III.5 Tasa de flujo.

Las tasas de flujo en el bioclarificador en el experimento tres fueron de 435 ± 18.75 y de 428 ± 14.46 l min⁻¹ mientras que en el tanque de cultivo fueron de 78 ± 20.64 y de 139 ± 8.86 l min⁻¹; donde los tiempos de residencia hidráulica fueron de 0.74 h y de 0.41 h para los muestreos uno y dos, respectivamente (Tabla XIV).

Tabla XIV. Tasas de flujo en el bioclarificador, tanque de cultivo y tubería de retorno, en l min⁻¹ (media \pm DE) y tiempo de residencia hidráulica en h.

Muestreo	Tasa de flujo (l min ⁻¹)			Tr (h)
	Q filtro	Q tanque	Q retorno	
1	435.47 ± 18.75	78.03 ± 20.64	343.39 ± 11.38	0.74
2	428.60 ± 14.46	139.07 ± 8.86	308.93 ± 7.13	0.41

III.6 Regresión de los sólidos suspendidos totales a la salida del bioclarificador contra el tiempo.

La regresión de los SST a la salida del bioclarificador contra el tiempo, para obtener la función C_2 , proporcionó un polinomio de cuarto grado con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.768$ (Figura 9).

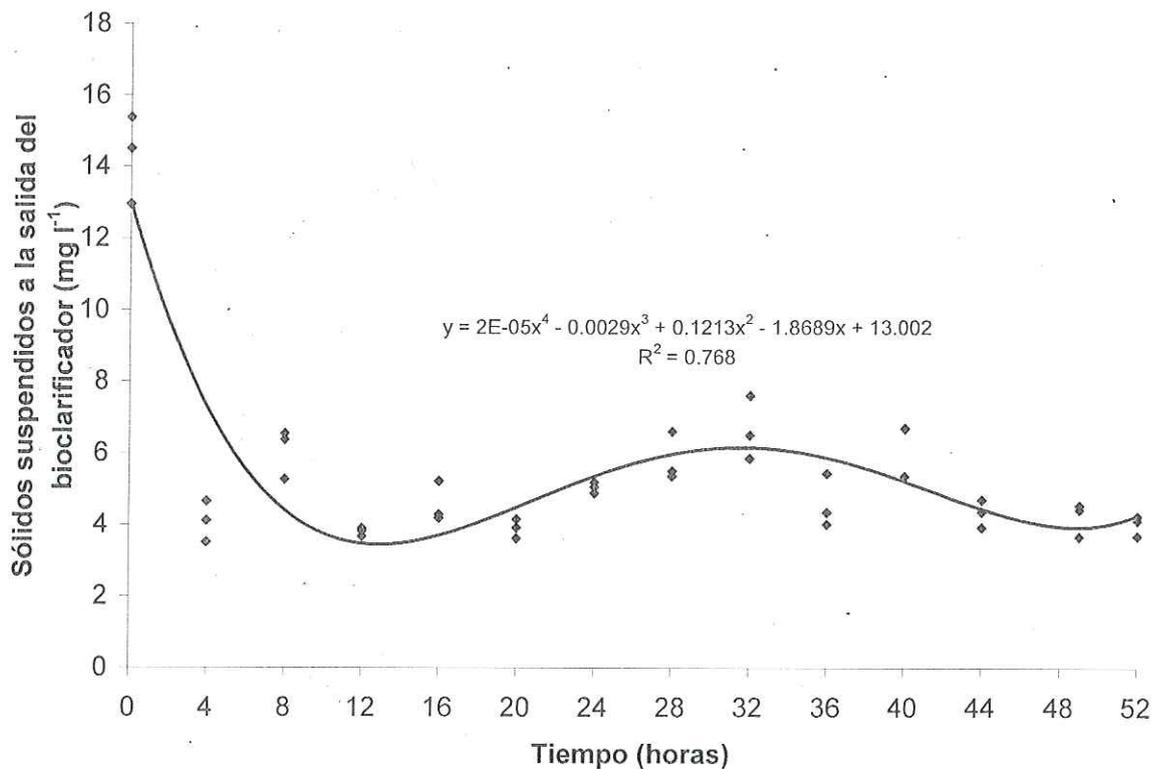


Figura 9. Regresión entre los sólidos suspendidos totales en mg l^{-1} , a la salida del bioclarificador y el tiempo en horas.

III.7 Solución del sistema de ecuaciones diferenciales.

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales proporcionó como resultado la predicción de la concentración de sólidos suspendidos en el tanque de cultivo y

los sólidos retenidos en el bioclarificador contra el tiempo (ver anexo). Los resultados del modelo se obtuvieron para dos tasas de producción: $\phi = \text{constante}$ y $\phi = \text{variable}$, igual a la curva normal; el modelo sobreestima los valores de la concentración de SST en la unidad de cultivo (Figura 10) y subestima los valores de los sólidos retenidos en el bioclarificador comparados con los resultados experimentales (Figura 11).

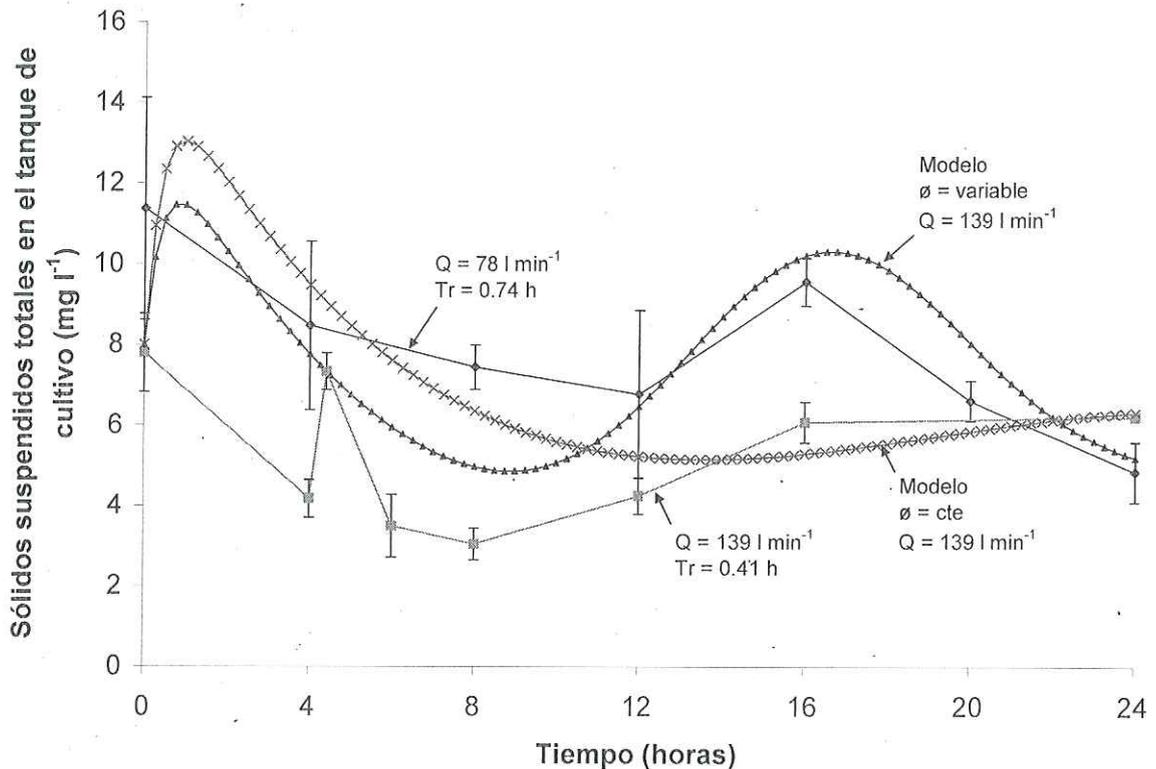


Figura 10. Sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} , contra el tiempo en h, donde las líneas continuas son resultados obtenidos experimentalmente para dos tiempos de residencia hidráulica $Tr = 0.41$ y 0.74 h. Las líneas discontinuas representan el resultado proporcionado por el modelo para dos tasas de producción: $\phi = \text{constante}$ y $\phi = \text{variable}$.

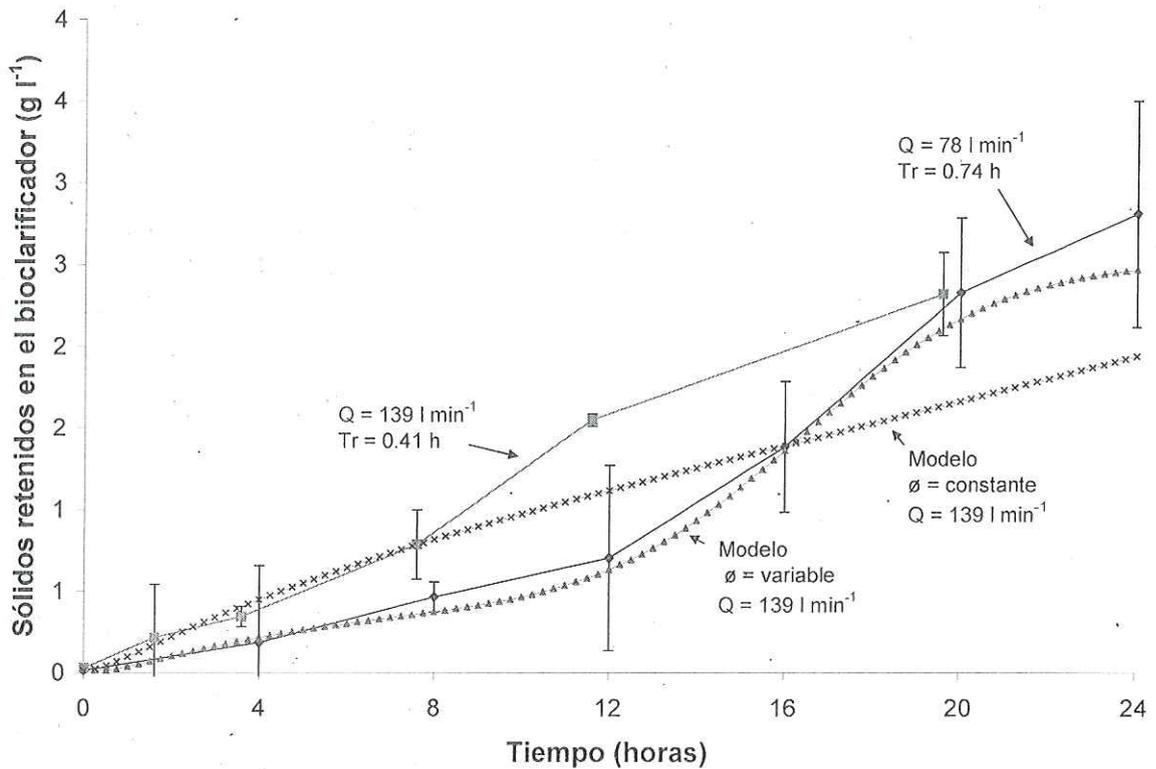


Figura 11. Sólidos retenidos en el bioclarificador en g l^{-1} , contra el tiempo en h, en un período de 24 horas. Resultados proporcionados por el modelo para dos tasas de producción y por los datos obtenidos experimentalmente.

Los valores de la tasa de producción de sólidos utilizados en la solución del modelo y los valores de la relación de excreción de sólidos E_s usados para calibrar el modelo, así como las constantes utilizadas se indican en la Tabla XV.

Tabla XV. Cantidades utilizadas para calibrar el modelo. Las tasas de producción utilizadas fueron: $\emptyset(t) = 1/24$ h y $\emptyset(t) =$ variable, igual a la curva normal con $\mu = 16$ h y desviación estándar $\sigma = 3.44$ h.

Concepto	Símbolo	Unidad	Valor de calibración	Valores de literatura
Relación de excreción de sólidos	Es	-----	0.20 ($\emptyset =$ cte)	0.18-0.69
			0.28 ($\emptyset =$ variable)	
Tasa de descomposición	Ks	h^{-1}	0.003	0.003-0.005
Relación sólidos volátiles y disueltos	Sv	-----	0.88	0.88
Tasa de producción	$\emptyset(t)$	h^{-1}	Cte = 1/24 variable	Constante

III.8 Pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador.

La pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador fue de 7.1 ± 0.59 y de 5.6 ± 1.00 m, (metros de columna de agua) para las muestras uno y dos, respectivamente, (Tabla XVI). Se detectaron diferencias significativas para la pérdida de carga hidráulica entre los muestreo uno y dos $p < 0.05$.

Tabla XVI. Pérdida de carga hidráulica en el bioclarificador expresada en libras sobre pulgada cuadrada (psi) y en metros de columna de agua (m), para dos diferentes tasas de flujo. Los superíndices con letras diferentes indican diferencia significativa.

Experimento	Muestra	Presiones (psi)			Pérdida carga (m)
		Entrada bioclarificador	Salida bioclarificador	Perdida carga	
3	1	12 ± 0.79	2 ± 0.17	10 ± 0.84 ^a	7.1 ± 0.59
	2	11 ± 1.13	3 ± 0.47	8 ± 1.42 ^b	5.6 ± 1.00

La regresión entre los sólidos retenidos y la carga hidráulica se describió por medio de una recta para la muestra uno, con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.9467$ y por un polinomio de segundo grado para la muestra dos, con $r^2 = 0.9817$ (Figura 12).

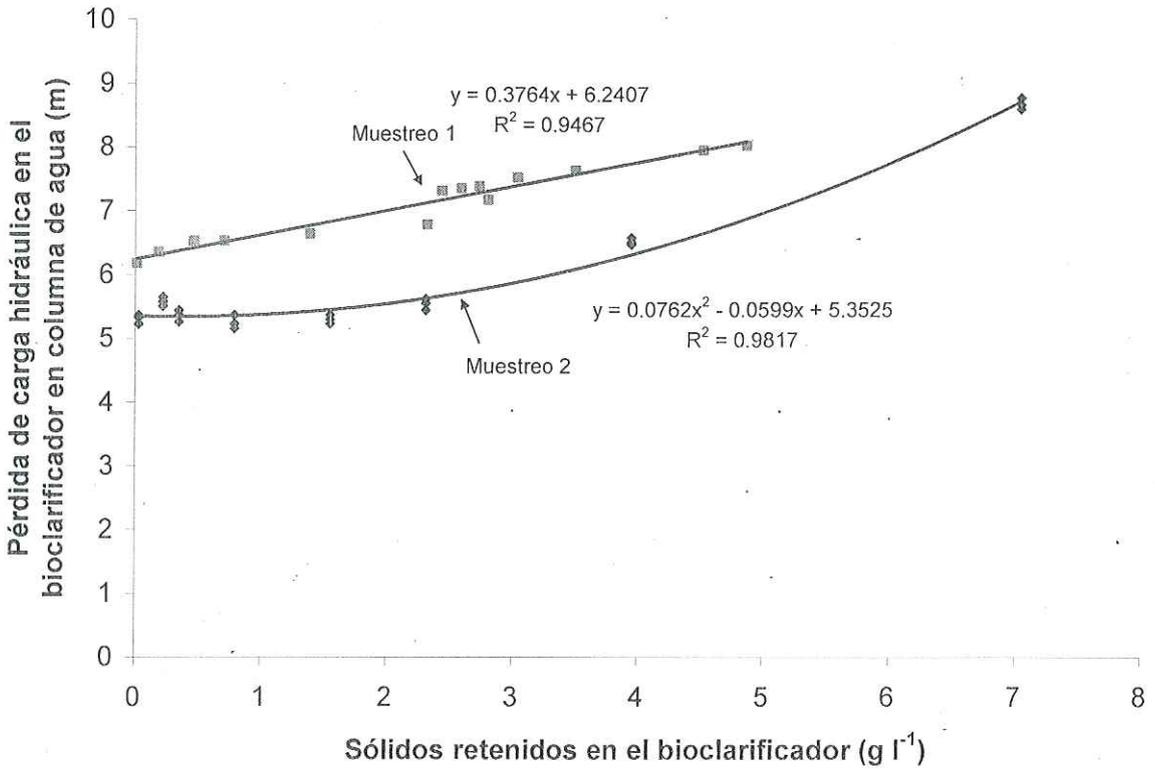


Figura 12. Regresión de la pérdida de carga hidráulica en m, contra los sólidos retenidos en el bioclarificador en $g\ l^{-1}$, para los muestreos uno y dos.

III.9 Potencia hidráulica.

La potencia hidráulica requerida para la circulación del agua en el sistema de cultivo en función de los sólidos retenidos, se calculó con la ecuación 18, en la cual se sustituyeron los valores de las constantes $a = 6.24$ y $b = 0.37$ tomadas de la regresión lineal (Figura 12), proporcionando la siguiente relación.

$$P_h = 442.35 + 26.68 C_s \quad (\text{ecuación 24})$$

En condiciones iniciales, para un valor de cero SST retenidos, la potencia de operación fue de 442 vatios (0.59 hp) y a medida que incrementa la concentración

de SST retenidos en el bioclarificador la potencia hidráulica también aumenta. En un período de operación de 24 horas la potencia hidráulica aumentó a 517 vatios (0.69 hp), lo que significa un incremento de 17 % a causa de los SST retenidos en el bioclarificador. Los se realizaron con la ecuación 24 (Tabla XVII). El consumo de energía en relación con el alimento proporcionado fue de $0.32 \text{ kW kg}_{\text{alimento}}^{-1}$.

Tabla XVII. Potencia hidráulica requerida para la circulación del agua en el sistema de cultivo en vatios, para diferentes cantidades de sólidos retenidos en el bioclarificador en g y coste de remoción de sólidos en kW kg^{-1} .

Tiempo	Sólidos retenidos	Potencia	Incremento	Coste de remoción
(h)	(g)	(Vatio= J s^{-1})	(%)	(kW kg^{-1})
0	0	442	0	
12	172	461	4	2.68
24	697	517	17	0.74
36	644	511	16	0.79
48	1125	562	27	0.50

La potencia hidráulica de operación aumenta con el tiempo a medida que el bioclarificador lo obstruyen los SST retenidos (Figura 13) y el incremento de la

potencia en función del tiempo se expresó como porcentaje respecto a las condiciones iniciales (Figura 14).

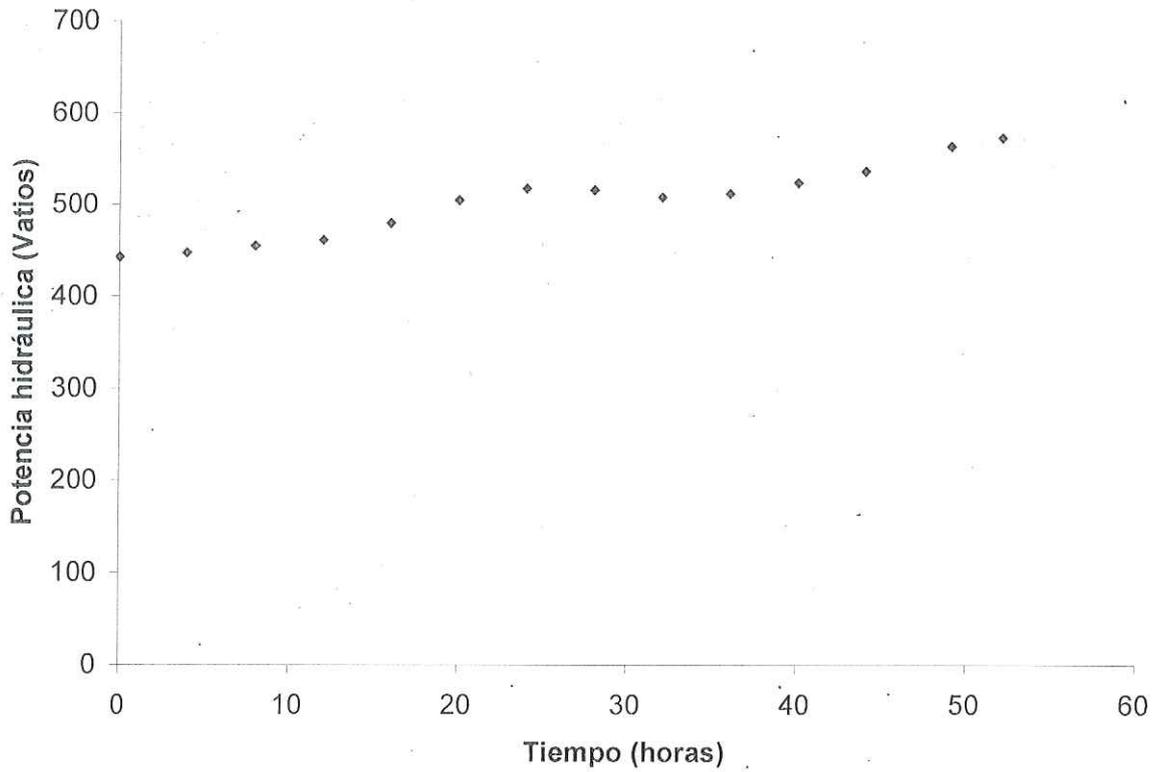


Figura 13. Incremento de la potencia hidráulica en vatios, requerida para la circulación del agua en el sistema de cultivo, en función del tiempo en horas.

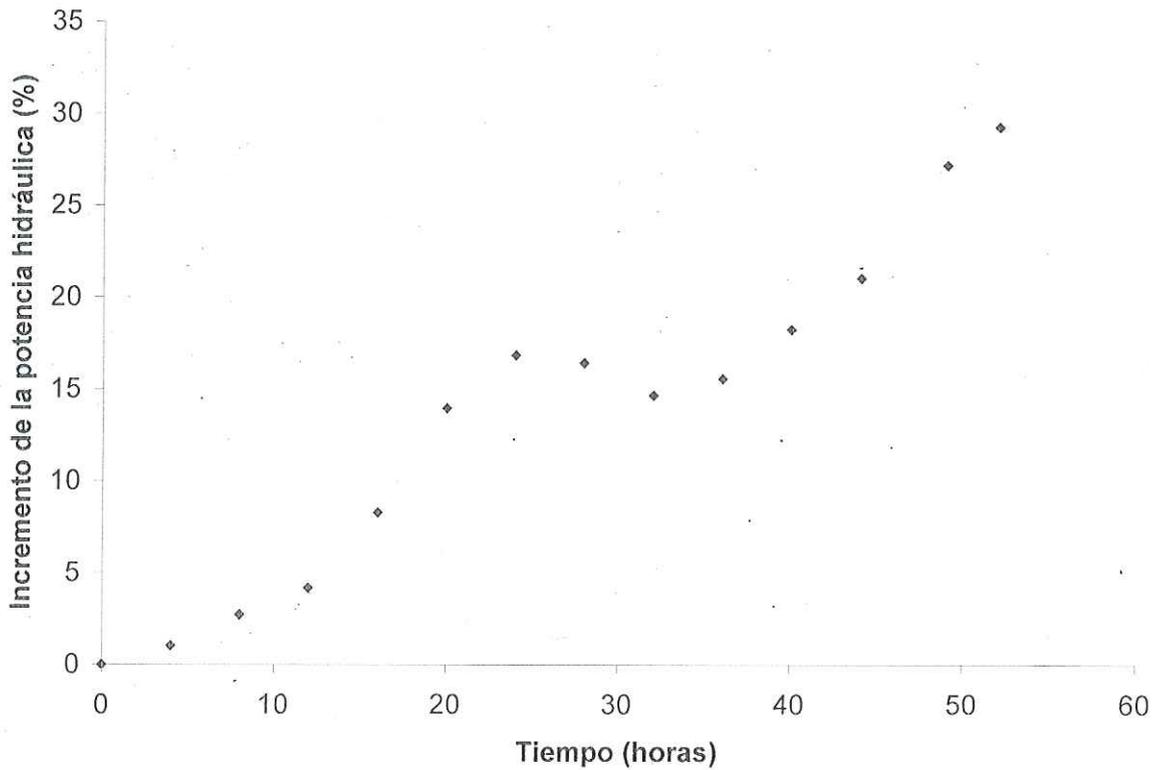


Figura 14. Incremento de la potencia hidráulica expresada como %, requerida para la circulación del agua en el sistema de cultivo, contra el tiempo en horas. Cálculo efectuado utilizando la potencia inicial de referencia igual a cero %.

III. 10 Coste de remoción de los sólidos.

El coste de remoción de los sólidos, para 24 horas, fue de 0.74 kW kg^{-1} (1 hp kg^{-1})

(Tabla XVII).

III.11 Simulación.

III.11.1 Tasa de residencia hidráulica variable.

El modelo simuló la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en el tanque de cultivo para diferentes tiempos de residencia hidráulica (Figura 15). El modelo predice además, la potencia hidráulica necesaria para la circulación del agua en el sistema de cultivo (Tabla XVIII).

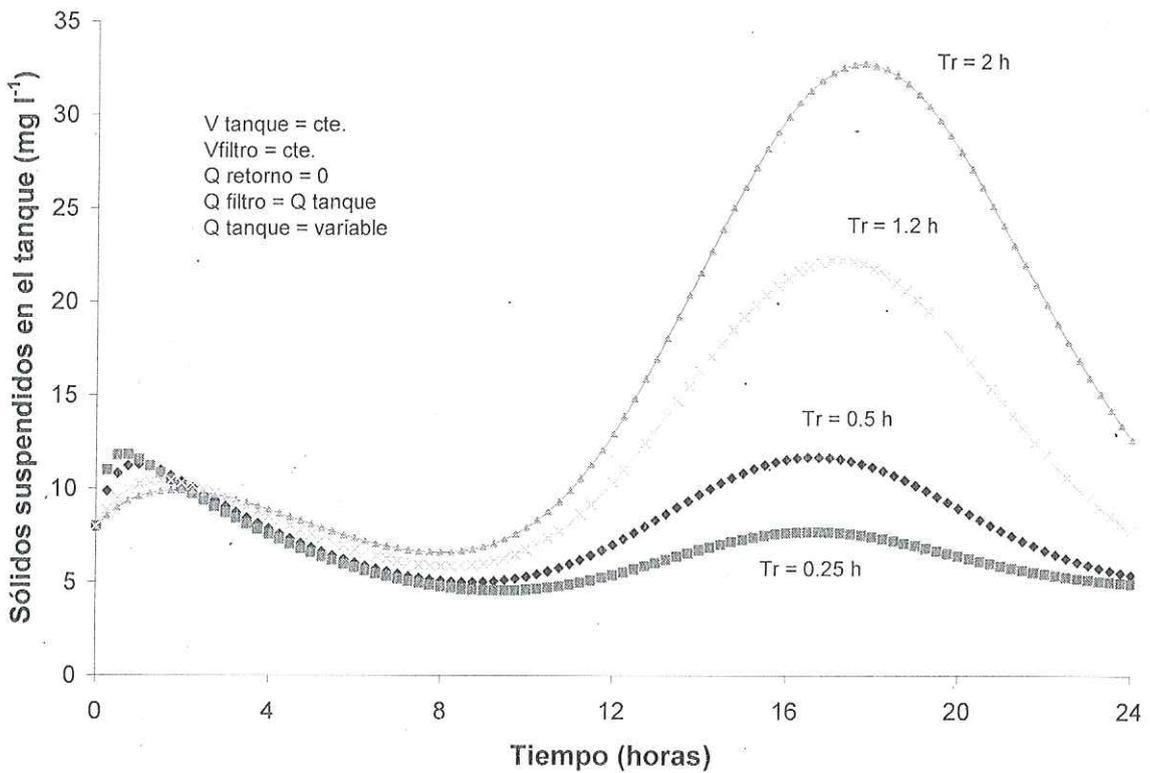


Figura 15. Sólidos suspendidos totales en el tanque de cultivo en mg l^{-1} , contra el tiempo en h, proporcionados por el modelo para diferentes tiempos de residencia hidráulica.

Tabla XVIII. Potencia hidráulica máxima requerida para la circulación del agua en el sistema en vatios, para los diferentes tiempos de residencia hidráulica en horas, proporcionados por el modelo. La potencia del sistema de cultivo experimental fue de 542 vatios.

Tr	Potencia	Diferencia
(h)	(Vatio)	(%)
0.25	295	54
0.5	144	27
1.2	85	16
2	71	13

III.11.2 Volumen de medio filtrante variable.

La predicción del modelo de los SST que se retienen en el bioclarificador para diferentes volúmenes del medio filtrante, con respecto al tiempo, se presenta en la figura 16.

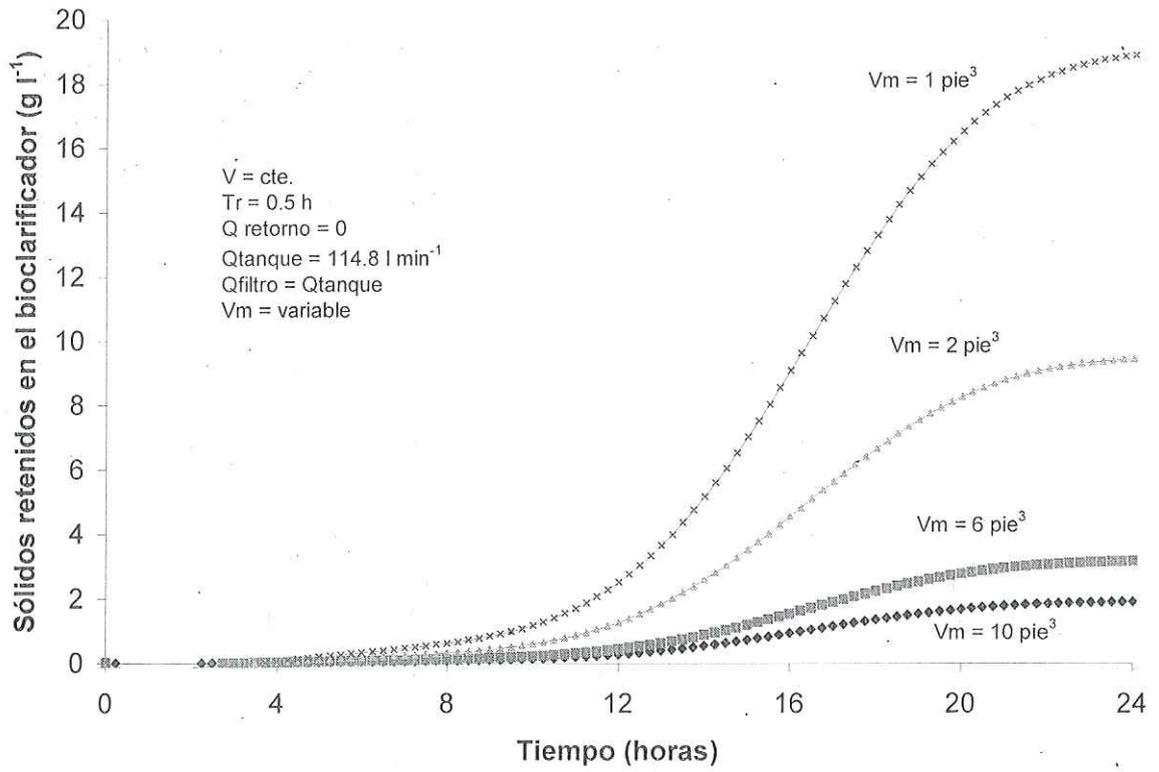


Figura 16. Sólidos retenidos en el bioclarificador en g l^{-1} , contra el tiempo en h, proporcionados por el modelo para diferentes volúmenes de medio filtrante.

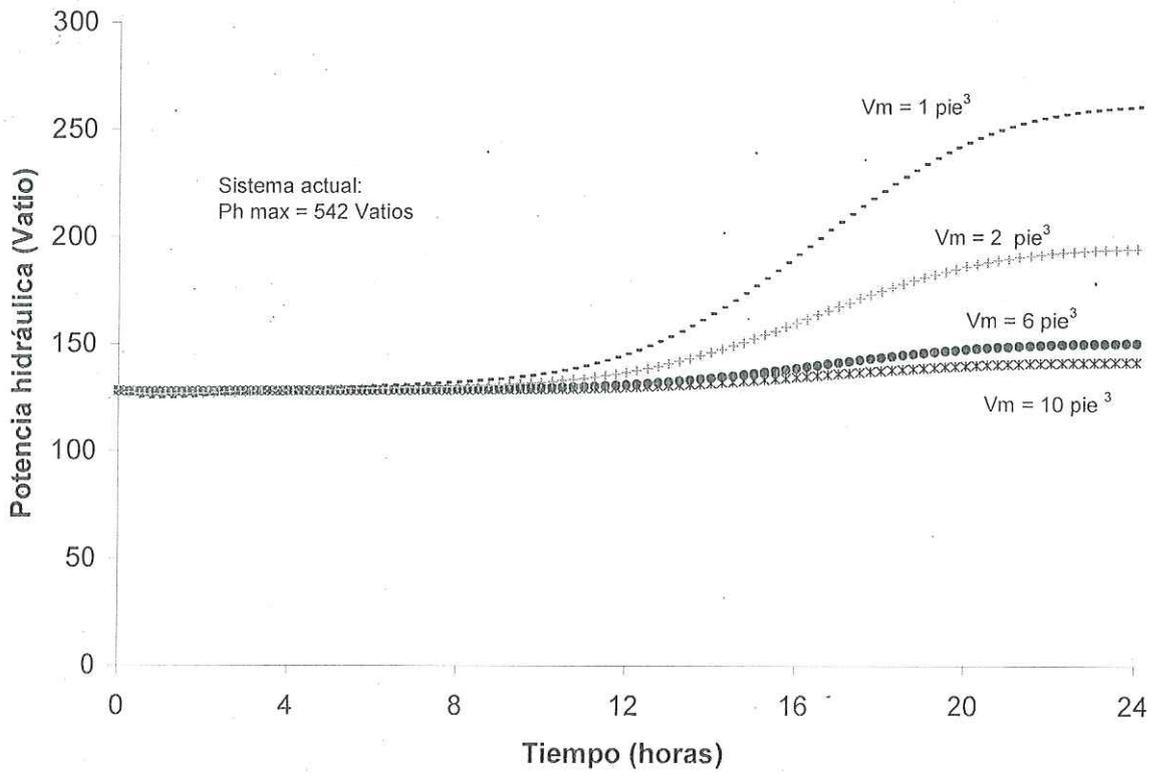


Figura 17. Potencia hidráulica en vatios, contra el tiempo en h, obtenida con el modelo para diferentes volúmenes del medio filtrante.

IV. DISCUSIÓN.

El sistema de recirculación usado en este experimento, mantuvo el control de los factores físicos y químicos del agua proporcionando un ambiente óptimo para el crecimiento de la tilapia (Losordo *et al.*, 2000; Timmons *et al.*, 2002). La biomasa máxima presente en el sistema fue de 219 ± 44.25 kg con una densidad de cultivo de 63.6 kg m^{-3} y una tasa de recambio de agua del 8% en 24 h.

En este experimento se usó un biofiltro de cuentas de plástico (Malone, 2006). Este tipo de biofiltros cuenta con tres ventajas operativas sobre otro tipo de biofiltros, la primera es que la pérdida de agua por retrolavado puede ser tan baja como el 3-4% del volumen total. La segunda ventaja de este tipo de biofiltro es que tienen una función dual (lleva a cabo dos operaciones unitarias en forma conjunta): la captura de los sólidos y la filtración biológica (Golz *et al.*, 1996; Sastry *et al.*, 1999; Malone y Beecher, 2000). La tercera ventaja de este biofiltro o bioclarificador es que son funcionales, robustos y aplicables comercialmente (Sastry *et al.*, 1999; Malone y Beecher, 2000). Sin embargo, el consumo de energía asociado con la circulación del agua en este tipo de biofiltro debe reducirse (Malone y Beecher, 2000). La tasa de circulación mínima recomendada en relación con el alimento que se proporciona diariamente es de $50 \text{ l min}^{-1} \text{ kg}_{\text{alimento}}^{-1} \text{ día}$ (Malone y Beecher, 2000), durante el periodo de cultivo en este trabajo, la tasa de circulación fue 5.1 veces el valor recomendado lo que significó un importante consumo de energía. Este alto consumo de energía está asociado a la tasa aparente de nitrificación, la cual se define como el producto del volumen total de medio filtrante y su superficie específica, la cual está en función de la tasa

de flujo (Golz *et al.*, 1996). A su vez la tasa de flujo está determinada en un balance de masa por la cantidad de alimento suministrado, la densidad de cultivo y la diferencia en las concentraciones de entrada y salida de oxígeno disuelto (Timmons *et al.*, 2002). En relación a los metabolitos nitrogenados acumulados en el agua en el cultivo, los niveles de nitrógeno amoniacal total (NAT) y de nitritos (NO_2^-) fueron de $2.0 \pm 2.0 \text{ mg l}^{-1}$ y de $1.7 \pm 2.9 \text{ mg l}^{-1}$, respectivamente y los valores máximos recomendados son de 3 mg l^{-1} para el (NAT) y de 1 mg l^{-1} para los nitritos (Losordo *et al.*, 2000; Timmons *et al.*, 2002). La concentración de oxígeno disuelto en el sistema durante el período en el cual se llevó a cabo el experimento fue de $3.33 \pm 1.23 \text{ mg l}^{-1}$, menor a lo recomendado por Timmons *et al.* (2002), sin embargo, con base en los valores de NAT y NO_2^- , no tuvo un efecto negativo en la tasa de nitrificación.

En el primer experimento se trató de conocer la dinámica de la generación de los SST en el tanque sin que el agua reciclada pasara por el bioclarificador. Los valores promedio que se obtuvieron con los muestreos uno y dos fueron de 14.66 ± 9.01 y de $19.88 \pm 14.53 \text{ mg l}^{-1}$, respectivamente, los que se encontraban ligeramente arriba de las concentraciones recomendadas para el cultivo de esta especie (Costa-Pierce y Rackocy, 1997; Timmons *et al.*, 2002). La concentración de los SST durante el período de alimentación en las primeras ocho horas, fue baja ($6.6 \pm 4 \text{ mg l}^{-1}$) y después de ese período de tiempo el incremento de los sólidos fue notable, encontrándose valores máximos entre las 16 ($51 \pm 29 \text{ mg l}^{-1}$) y las 18 horas ($26.3 \pm 0.9 \text{ mg l}^{-1}$), lo que se explica por el aumento en la generación de heces de los organismos (Riche *et al.*, 2004) (Figura 5). La

relación de excreción de sólidos, Es, obtenida en este trabajo fue de 0.057 y 0.094, se encuentra muy por debajo de lo indicado por Golz *et al.* (1999), lo que podría explicarse por la disminución en concentración de los SST que sucede después de las 16 y 18 horas y que probablemente se debe a los altos niveles de carbono orgánico en el sistema, favoreciendo con ello el proceso heterotrófico (Zhu y Chen, 2001^b; Ling y Chen, 2005), combinado con la disminución del tamaño de los sólidos causado por el efecto del bombeo (McMillan *et al.*, 2003).

En el experimento dos, la concentración de SST en el tanque de cultivo fue de $4.99 \pm 1.75 \text{ mg l}^{-1}$ para el Tr de 0.41 h y de $7.87 \pm 2.43 \text{ mg l}^{-1}$ para el Tr de 0.74 h, los cuales son significativamente menores que el valor máximo recomendado de hasta 15 mg l^{-1} de SST para tilapia (Timmons *et al.*, 2002). La rápida remoción de los SST reduce el carbono orgánico en el sistema e impacta favorablemente el proceso de nitrificación sobre el proceso heterotrófico (Zhu y Chen, 2001^b).

El tiempo de residencia hidráulica (Tr) tiene un efecto importante en la calidad del agua y en el consumo de energía. Las diferencias encontradas en la concentración de los SST en el tanque de cultivo se explican por los diferentes tiempos de residencia hidráulica. A menor tiempo de residencia hidráulica, menor es la concentración de SST en el tanque de cultivo (Tabla XI, Figura 6). En el cultivo llevado a cabo durante este trabajo se manejó un Tr de 0.74 h lo que permitió lograr una buena calidad del agua. Losordo *et al.*, (2000) reportaron tiempos de residencia hidráulica de 1.2 h para cultivo con tilapia, *O. niloticus*. En cultivos comerciales de un pez del ártico *Salvelinus alpinus*, Summerfelt *et al.* (2004), reportaron deficiencias en la calidad del agua para un Tr de 1.87 h y

sugieren que tiempos de 0.5-0.75 h permiten lograr una mejor calidad del agua. Barón Sevilla *et al.* (2004) utilizaron un Tr de 1.23 h para un cultivo de camarón *Litopenaeus vannamei*, manteniendo una alta calidad del agua. El consumo de energía por concepto de circulación del agua es inversamente proporcional al Tr, por lo cual es conveniente utilizar el Tr necesario y suficiente para proporcionar la calidad del agua requerida por la especie cultivada.

La pérdida de carga hidráulica es una pérdida de energía causada por la fricción a lo largo de las tuberías, accesorios, tales como codos, válvulas, etc. y por los equipos instalados como por ejemplo los biofiltros (Streeter *et al.*, 2000). En el biofiltro la pérdida de energía se explica por la resistencia que ofrece el medio filtrante (cuentas de plástico) al flujo del agua de cultivo y por los sólidos suspendidos que han sido retenidos por el filtro. La magnitud de la pérdida de carga es relevante porque es proporcional al consumo de energía. La pérdida de carga hidráulica medida en este trabajo alcanzó valores de hasta 7.1 metros de columna de agua. Wimberly (1990), reporta pérdidas de carga que oscilan entre 0.8 y 6 metros de columna de agua para filtros con cuentas de plástico. La regresión de la pérdida de carga sobre los sólidos retenidos en el bioclarificador fue una recta con $r^2 = 0.9467$, para el muestreo uno y por un polinomio de grado dos con $r^2 = 0.9817$, para el muestreo dos (Figura 8). Según Metcalf & Eddy (1996), la relación entre esas variables es de tipo exponencial; en este experimento posiblemente la corta duración de los muestreos (52 y 72 h), puede explicar las diferencias de los resultados obtenidos comparados con lo reportado por la literatura. En este trabajo se estudió la respuesta de los SST en el corto

plazo (24 h) ya que ésta fue la frecuencia de retrolavado del bioclarificador y por consiguiente la regresión lineal se prefirió para el cálculo de la pérdida de carga hidráulica y de la potencia en función de los sólidos retenidos en el bioclarificador. El consumo de energía por concepto de la circulación del agua se expresó como la potencia hidráulica. La potencia hidráulica es proporcional a la tasa de flujo y a la pérdida de carga hidráulica (ecuación 17) y también es proporcional a los sólidos retenidos en el bioclarificador (ecuación 18). La potencia hidráulica inicial fue de 442 W y aumentó a 517 W por efecto de los sólidos retenidos en el bioclarificador, lo que significó un incremento del 17% en sólo 24 horas (Tabla XVII). La potencia hidráulica en relación con el alimento proporcionado fue de $0.32 \text{ kW kg}_{\text{alimento}}^{-1}$, este valor fue 3.7 veces más alto que lo reportado por Losordo *et al.*, (2000) para cultivo con tilapia. En este trabajo hay que considerar que el cultivo es experimental y operó a la mitad de su capacidad mientras que el otro es un cultivo realizado con fines comerciales. El coste de remoción de los sólidos suspendidos totales fue de 0.74 kW kg^{-1} en un tiempo de 24 h (Tabla XV). Sin embargo, el coste de energía no solo involucra la remoción de los SST, ya que el consumo de energía por concepto de circulación del agua es proporcional a la tasa de flujo requerida, la cual se determinó en un balance de masa donde se involucra la nitrificación y las concentraciones de oxígeno y de dióxido de carbono en el sistema de recirculación (Timmons *et al.*, 2002).

Un modelo debe reunir los siguientes requisitos para ser aceptable: debe estar formalmente bien construido, estar de acuerdo con las leyes aceptadas por la

comunidad científica del campo donde se sitúan y no debe discrepar dentro de ciertos límites de las observaciones empíricas (Bojórquez Castro, 1998).

El modelo elaborado en este trabajo se construyó matemáticamente con un par de funciones del tipo $y' = f(x)$, con el tiempo como variable independiente y la concentración de SST como variable de respuesta. El modelo tiene como fundamento la primera ley de la termodinámica, que establece la conservación de la masa y la energía. En términos biológicos parece más razonable considerar una tasa de producción de heces variable en lugar de considerar que ésta permanece constante con el tiempo. Las concentraciones de los SST obtenidas experimentalmente y las teóricas se compararon y se encontró que el modelo sobreestima los valores de la concentración de SST en el tanque de cultivo (Figura 10), probablemente esto se debe a que no se consideraron el efecto de la retención de SST en las tuberías por efecto del crecimiento del biofilm (Wasche *et al.*, 2002), en el cedazo de la bomba centrífuga y en el cono de oxigenación.

El modelo describe en condiciones dinámicas el proceso de generación de transporte y de remoción de los sólidos suspendidos totales. El modelo utilizado en esta investigación consideró la metodología descrita por Weatherly (1982). Sin embargo, las ecuaciones resultantes (ecuaciones 6 y 12) son originales y adaptadas a las condiciones experimentales particulares del sistema de cultivo. Una de las aportaciones del modelo es que considera la biología de la especie en relación a la generación de los sólidos (ecuación 6) y propone una tasa de producción de sólidos variable con el tiempo (ecuación 7). Adicionalmente, el modelo incluye una ecuación original (ecuación 18) para calcular la potencia

hidráulica requerida para la circulación del agua en el sistema y consideró la pérdida de carga hidráulica en función de los sólidos retenidos en el bioclarificador. Además, el modelo fue utilizado para hacer simulación, variando parámetros de interés como son el volumen del medio filtrante y el tiempo de residencia hidráulica.

Una restricción del modelo es que consideró que las heces de los organismos eran una fuente exclusiva para la generación de los SST, ya que se prestó especial cuidado en la tasa de consumo de alimento a lo largo del periodo experimental. Bullock *et al.*, (1997), Franco Nava *et al.* (2004) y Davidson y Summerfelt (2005) entre otros autores, encontraron que las heces, el alimento y el biofilm son las principales fuentes que generan SST. Golz *et al.* (1996) consideran que la biomasa de bacterias heterótrofas contribuye a la generación de los sólidos pero que la contribución de la biomasa de las bacterias nitrificantes es despreciable. El modelo no cuantifica el efecto de la generación de sólidos debida al biofilm.

La validación del modelo se realizó comparando los resultados experimentales con los proporcionados por el modelo para dos diferentes tasas de producción de sólidos: $\varnothing(t) = \text{constante}$ y $\varnothing(t) = \text{variable}$, encontrando una mejor aproximación a los resultados experimentales en el segundo caso (Figura 10 y 11). El modelo se calibró con diferentes valores de la relación de excreción de sólidos (E_s), los cuales se consideraron de 0.20 para el caso de la tasa de producción constante y de 0.28 para cuando la tasa de producción variable. Estos valores se encuentran dentro del intervalo de 0.18 - 0.69 reportados por Golz *et al.* (1999) y son más

cercanos al valor medio de 0.25 recomendado por Timmons *et al.* (2002) para la excreción de sólidos.

Diversos autores han utilizado la ley de la conservación de la masa y la energía, para formular modelos dinámicos que describen algún proceso de los sistemas de recirculación (Weatherley, 1982; Weatherley *et al.*, 1993; Golz *et al.*, 1999; Glouanec y Noël, 1999) (Tabla XIX). El modelo descrito por Weatherley *et al.* (1993) es similar al elaborado en este trabajo, con la diferencia de que describe el proceso de transporte y remoción de nitrógeno amoniacal total (NAT). En este modelo los autores utilizan una tasa de producción constante de NAT y la validación se realizó de manera analítica.

El modelo elaborado por Golz *et al.* (1999) considera la relación entre la nitrificación y los sólidos retenidos en el biofiltro. Como parte del modelo los autores consideran que el biofiltro retiene la totalidad de los sólidos y que la tasa de producción es constante respecto al tiempo, el modelo se calibró experimentalmente. En un trabajo previo Golz *et al.* (1996) determinaron el valor óptimo de la tasa de nitrificación para un intervalo de retrolavado crítico y relacionaron el valor óptimo con el tiempo de residencia de los sólidos en el biofiltro. Para intervalos de retrolavado mayores al crítico, hay una disminución de la tasa de nitrificación, la que se explica por un aumento en la relación carbono nitrógeno, derivada de la mayor permanencia de los sólidos en el biofiltro (Golz *et al.*, 1996). Por otro lado, la tasa de nitrificación aumenta con el número de Reynolds y este último aumenta con la tasa de flujo (Zhu y Chen, 2001^a). En este trabajo se demuestra que la tasa de flujo y los sólidos retenidos en el

bioclarificador determinan la energía que se requiere para la circulación del agua en el sistema (ecuación 18). En consecuencia, podría determinarse un óptimo de la tasa de nitrificación en la que el coste de operación sea mínimo, es decir, la potencia hidráulica que se requiere para la circulación del agua sea la mínima.

El modelo de Glouanec y Noël (1999) describe la transferencia de calor en la unidad de cultivo y predice la temperatura de la unidad de cultivo. Por otro lado, Losordo y Westers (1994) y Timmons *et al.* (2002) utilizan el balance de masa para estimar la tasa de flujo de diseño de un sistema de recirculación, pero no con fines de modelado de algún proceso.

Tabla XIX. Características de algunos modelos basados en la ley de la conservación de la masa y la energía.

Variable	Tasa de producción	Validación	Autor
NAT	Constante	Experimental	Weatherley, 1982
NAT	Constante	Teórica	Weatherley <i>et al.</i> , 1993
NAT y SST	Constante	Experimental	Golz <i>et al.</i> , 1999
Temperatura	-----	Experimental	Glouanec y Noël, 1999
SST	Variable	Experimental	Este trabajo

La simulación confirma que el tiempo de residencia hidráulica regula las concentraciones de SST en el tanque de cultivo (Figura 14) y determina que a

menor T_r hay un aumento en la potencia hidráulica requerida para la circulación del agua en el sistema (Tabla XVIII). Debido a que en general, las tasas de flujo están determinadas en un balance de masa y el factor limitante es la tasa de nitrificación, es necesario determinar la relación óptima entre el gasto y la tasa de remoción de amonio en función del coste de energía.

La simulación también predice la potencia hidráulica requerida para la circulación del agua en el sistema la cual varía inversamente con el tamaño del bioclarificador. A menor volumen de medio filtrante la potencia requerida es mayor conforme pasa el tiempo, lo que se explica porque el bioclarificador de menor tamaño se obstruye más rápidamente, aumentando por consiguiente la potencia hidráulica (Figuras 16 y 17). Es decir, si se requiere usar un bioclarificador solamente como clarificador, esta operación unitaria es posible porque pueden determinarse los tiempos de retrolavado óptimos en función del tiempo.

V CONCLUSIONES.

- El bioclarificador de cuentas de plástico con propela mantuvo una alta calidad del agua y fue muy eficaz para la retención de los sólidos suspendidos totales, pero la tasa de circulación fue de 5.1 veces el valor mínimo recomendado, lo que significó un consumo de energía importante.
- El tiempo de residencia hidráulica tiene un efecto importante en la calidad del agua, regula los niveles de la concentración de SST en el tanque de cultivo y es inversamente proporcional al consumo de energía.
- Utilizar tasas de flujo más altas para mantener los parámetros de calidad del agua dentro de los límites requeridos por la especie implica consumos de energía más altos.
- La regresión entre la pérdida de carga hidráulica y los sólidos retenidos es lineal, para períodos cortos (24 h), e implica un incremento en la potencia de 17% por efecto del taponamiento del bioclarificador en solo 24 horas.
- La potencia hidráulica en relación con el alimento proporcionado fue de $0.32 \text{ kW kg alimento}^{-1}$; fue 3.7 veces más alta que la reportada por la literatura y el coste de remoción de los sólidos fue de 0.79 kW kg^{-1} .
- El modelo elaborado en este trabajo se expresó como un sistema de dos ecuaciones diferenciales, su fundamento lo constituye la ley de la conservación de la masa y la energía y se validó y calibró experimentalmente.

- El modelo es original en la descripción del proceso de generación, transporte y remoción de los sólidos suspendidos totales; considera la biología de la especie en la generación de los SST y propone una ecuación original para calcular el consumo de energía para la remoción de los SST.
- El modelo predice la concentración de SST en la unidad de cultivo para diferentes tiempos de residencia hidráulica y diferentes volúmenes del medio filtrante.
- El modelo tiene potencial para dimensionar un sistema de cultivo, en este caso particular, la unidad de remoción de sólidos.

VI RECOMENDACIONES.

- Conviene precisar las causas de la disminución de la generación de los SST a partir de las 16 y 18 horas (Figura 5).
- Los resultados de la simulación sugieren que es factible instalar un clarificador de pequeño volumen con el fin de remover los sólidos, colocado antes del biofiltro.
- Exclusivamente, para la remoción de los sólidos suspendidos, es conveniente utilizar la tasa de flujo en el tanque de cultivo necesaria para mantener las concentraciones de SST en los niveles tolerables para la especie de cultivo, lo que puede significar ahorro de energía en la circulación del agua del sistema.

VII. LITERATURA CITADA.

- Avault, J. W. 1996. Fundamentals of aquaculture. A step-by-step guide to commercial aquaculture. AVA Publishing Co. Inc. Primera edición. Baton Rouge. 889 p.
- Barón Sevilla, B., L. F. Bückle Ramírez y M. Hernández Rodríguez. 2004. Intensive culture of *Litopenaeus vannamei* Boone 1931, in a recirculating seawater system. Ciencias Marinas. 30 (1B): 179-188 p.
- Bojorquez Castro, L. 1998. Modelos biomatemáticos en acuicultura. En: Luis R. Martínez Córdova (editor). Ecología de los sistemas acuícolas. Bases ecológicas para el desarrollo de la acuicultura. A.G.T. Editor., México, 227 p.
- Bullock, G.L., Summerfelt, S.T., Noble, A., Weber, A.W., Durante, M.D. y J.A. Hankins. 1997. Ozonation of a recirculating rainbow trout culture system: effects on bacterial gill disease and heterotrophic bacteria. Aquaculture. 158: 43-55.
- De Silva, S. S. 2003. Culture-based fisheries: an underutilized opportunity in aquaculture development. Aquaculture. 221: 221 - 243 p.
- Chen, S., M.B. Timmons, D.J. Aneshansley y J.J. Bisogny Jr. 1993. Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. Aquaculture. 112: 143-155 p.
- Chen S., D. Stechey y R.F. Malone. 1994. Suspended solids in recirculating aquaculture systems. En: M.B. Timmons and T.M. Losordo (eds) Aquaculture water reuse systems: Engineering Design and Management. Elsevier Science. B.V. Amsterdam. 333 pp.
- Costa-Pierce, A. y J.E. Rackocy. 1997. Tilapia aquaculture in the Americas. Volume One. World Aquaculture Society and the American Tilapia Association. 258 p.
- Cripps, S.J. y A. Bergheim. 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. Aquacultural Engineering. 22: 33-56 p.
- Davidson, J. y S.T. Summerfelt. 2005. Solids removal from a coldwater recirculating system—comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. Aquacultural Engineering. 33: 47-61 p.

- Franco Nava, M.A., J. P. Blancheton, G. Deviller y J. Y. Le-gall. 2004. Particulate matter dynamics and transformations in a recirculating aquaculture system: application of stable isotope tracers in seabass rearing. *Aquacultural Engineering*. 31: 135-155 p.
- Glouannec, P. y H. Noël. 1999. Energy characterization of an aquacultural installation in closed loop. *Aquacultural Engineering*. 21: 1-18 p.
- Golz, W.J., K. A. Rusch y R. F. Malone. 1996. Developing backwash protocols for floating-bead filters: a model of solids-loading and biofilm retention effects on nitrification. En *Aquacultural Engineering Society Proceedings II: Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture*. 196-205 p.
- Golz, W.J., K. A. Rusch y R. F. Malone. 1999. Modeling the major limitations on nitrification in floating-bead filters. *Aquacultural Engineering*. 20: 43-61 p.
- Huguenin, J. E. y Colt, J. 1989. Design and operating guide for aquaculture seawater systems. *Developments in aquaculture and fisheries science*, 20. Elsevier. Primera edición. New York. 264 p.
- Ling, J. y S. Chen. 2005. Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. *Aquacultural Engineering*. 33: 105-162 p.
- Losordo, T. M., M.P. Masser y J. E. Rakocy. 1992. Recirculating aquaculture tank production systems: An overview of critical considerations. SRAC No. 451.
- Losordo, T.M. y H. Westers. 1994. System carrying capacity and flow estimation. En: M.B. Timmons and T.M. Losordo (eds) *Aquaculture water reuse systems: Engineering Design and Management*. Elsevier Science. B.V. Amsterdam. 333 p.
- Losordo, T.M., A.O. Hobbs y D.P. DeLong. 2000. The design and operational characteristics of the CP&L/EPRI fish barn: a demonstration of recirculating aquaculture technology. *Aquacultural Engineering*. 22: 3-16 p.
- Malone, R. F. y L. E., Beecher. 2000. Use of floating bead filters to recondition recirculating waters in warmwater aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*. 22: 57-73 p.
- Malone, R.F. y T.J. Pfeiffer. 2006. Rating fixed film nitrifying biofilters in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*. 34: 389-402.

- McMillan, J.D., F.W. Wheaton, J.N. Hochheimer y J. Soares. 2003. Pumping effect on particle sizes in a recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering*. 27: 53-59 p.
- Metcalf & Eddy, Inc. 1996. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw- Hill. Tercera edición. Volumen I. México. 752 p.
- Riche, M., D.I. Haley, M. Oetker, S. Garbrecht y D.L. Garling. 2004. Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture*. 234: 657-673 p.
- Sastry, B.N., A. A. DeLosReyes Jr., K.A. Rusch y R. F. Malone. 1999. Nitrification performance of a bubble-washed bead filter for combined solids removal and biological filtration in a recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering*. 19: 105-117 p.
- Shulin, C., M.B. Timmons, J.J. Bisogni Jr y D.J. Aneshansley. 1994. Modeling surfactant removal in foam fraction: I Theoretical development. *Aquacultural Engineering*. 13: 163-181 p.
- Streeter, V. L., E.B. Wylie y K.W. Bedford. 2000. Mecánica de fluidos. McGraw- Hill Interamericana S.A. Novena edición. Bogotá. 740 p.
- Summerfelt, S.T., G. Wilton, D. Roberts, T. Rimmer y K. Fonkalsrud. 2004. Developments in recirculating systems for Arctic char culture in North America. *Aquacultural Engineering*. 30: 31-71 p.
- Timmons, M.B., J.M. Ebeling, F. W. Wheaton, S. T. Summerfelt y B. J. Vinci. 2002. *Recirculating Aquaculture Systems*. Cayuga Aqua Ventures. Segunda edición. Ithaca. Nueva York. 769 p.
- Wasche, S., H. Horn y D.C. Hempel. 2002. Influence of growth conditions on biofilm development and mass transfer at the bulk/biofilm interface. *Water Research*. 36: 4775-4784 p.
- Weatherley, L. R. 1982. Application of simple dynamic response analysis to a recirculating aquaculture system - a preview. *Aquacultural Engineering*. 1: 33 -113 p.
- Weatherley, L. R., R. G. Hill y K. J. Macmillan. 1993. Process modeling of an intensive aquaculture system. *Aquacultural Engineering*. 12: 215 -230 p.
- Wheaton F. W. 1982. *Acuicultura. Diseño y construcción de sistemas*. AGT editor S.A. Primera edición. México. 704 p.

Wimberly, D. M. 1990. Development and evaluation of a low-density media biofiltration unit for use in recirculating finfish systems. Tesis de maestría, Louisiana State University. 162 p.

Zar, J.H. 1996. Biostatistical analysis. Prentice Hall. Tercera edición. New Jersey. 662 p.

Zhu, S. y S. Chen. 2001^a. Impacts of Reynolds number on nitrification biofilm kinetics. *Aquacultural Engineering*. 24: 213 - 229 p.

Zhu, S. y S. Chen. 2001^b. Effects of organic carbon on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering*. 25: 1 - 11 p.

APÉNDICE

Programa de Matlab para la solución del sistema de ecuaciones diferenciales (ecuaciones 6 y 14) y respuesta gráfica del modelo y de los resultados experimentales.

```
%Definicion del sistema de ecuaciones
function dy = s4(t,y);
Dy=zeros(2,1);
Dy(1)= 2.42*((2*10^-5)*t^4 - 0.0029*t^3 + 0.1214*t^2 -1.8689*t+13 - y(1))
+ (16.3)*exp(-(t-16).^2/23.67);
Dy(2)= 33.38*(y(1)- 0.86*((2*10^-5)*t^4 - 0.0029*t^3 + 0.1214*t^2 -1.8689*t
+13) )- 0.0044*y(2);

%Solucion del sistema
tspan=[0:0.25:24];
Y0=[8 28]';
[T,Y]=ode45(@s4,tspan,y0);
%[Y(:,1)]
%[Y(:,2)]
subplot (2,1,1)
t=0:4:24;
S=[11.37,8.47,7.44,6.77,9.56,6.62,4.85];
St4=[7.8,7.33,3.5,3.05,4.25,6.08,6.21];
%Trazo de los resultados del modelo y de datos experimentales
plot(T,Y(:,1),t,s,' rs',t,st4,' rs')
ylabel('Solidos en el tanque(mg/l)')
subplot (2,1,2)
Sf=[14,185,464,704,1384,2323,2803];
Sf4=[28,34,787,1547,1547,2314,2314];
plot(T,Y(:,2),t,sf,' rs',t,sf4,' rs')
ylabel('Solidos en el filtro (mg/l)')
xlabel('tiempo (h)')
disp('ya termine')
```

