

# Evaluación de algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación para la acuicultura, sometido a diferentes cargas de biomasa de peces

## Evaluation of some water quality parameters in a closed aquaculture recirculating-water system, submitted to different loads of fish

Genoveva Ingle de la Mora<sup>1</sup>, Enrique L. Villareal-Delgado<sup>2</sup>,  
José L. Arredondo-Figueroa<sup>2</sup>, Jesús T. Ponce-Palafox<sup>3</sup>  
e Irene de los A. Barriga-Sosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de la Pesca. Pitágoras No. 1320, Colonia Santa Cruz Atoyac, Código Postal 03310, México D.F.

<sup>2</sup>Planta Experimental de Producción Acuícola, Departamento de Hidrobiología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco 186, Colonia Vicentina, Apartado Postal 55-535, Iztapalapa, 09340, México, D. F.

<sup>3</sup>Laboratorio de Bioingeniería Acuícola, Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Apartado Postal 584, Ciudad Universitaria, Cuernavaca 62001, Cuernavaca, Morelos, México.

Ingle de la Mora, G., E. L. Villareal-Delgado, J. L. Arredondo-Figueroa, J. T. Ponce-Palafox e I. de los A. Barriga-Sosa. 2003. Evaluación de algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación para la acuicultura, sometido a diferentes cargas de biomasa de peces. *Hidrobiológica* 13 (4): 247-253.

### RESUMEN

El objetivo de este estudio, fue evaluar algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación utilizado en la acuicultura, sometido a distintas cargas de biomasa de Tilapia del Nilo *Oreochromis niloticus* y de trucha arco iris *Oncorhynchus mykiss*. El sistema consiste de seis estanques de cultivo, una cisterna de sedimentación, dos piletas con biofiltros sumergidos, un filtro de arena rápido, dos bombas, una pileta de reacondicionamiento y una unidad de lámparas de luz ultravioleta. Los peces fueron alimentados durante 120 días dos veces al día con el 2% de su biomasa total. Se registraron los siguientes parámetros de calidad del agua: temperatura, oxígeno disuelto, pH, nitrógeno amoniacial total (NAT), amoníaco, nitrato y demanda química de oxígeno. Los datos se analizaron con un ANDEVA de una sola vía para detectar diferencias significativas entre los componentes del sistema. Los valores promedio de NAT y nitrato indicaron una alta eficiencia en los procesos de nitrificación, aún cuando el sistema fue sometido a diferentes cargas de biomasa de peces. Los bajos valores detectados de NAT y amoníaco se debieron al arrastre eficiente hacia la atmósfera (50% NAT y más del 90% respectivamente). Otras posibles causas que contribuyeron a la eliminación de los compuestos nitrogenados, fueron la asimilación por microorganismos presentes en los lodos acumulados en la cisterna de sedimentación, además de la absorción y la adsorción por los lodos. Los resultados mostraron que la calidad del agua mantenida en el sistema permitió el 99% de sobrevivencia de ambas especies y una tasa de crecimiento aceptable.

**Palabras clave:** Calidad del agua, nitrificación, cultivo de tilapia y de trucha arco iris.

### ABSTRACT

Utilizing different loadings of biomass of the Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, some water quality parameters were evaluated in a closed aquaculture recirculating system. The system is integrated by six culture tanks, a sedimentation cistern, two submerged bio-filters, a fast sand filter,

two pumps, a reconditioning-water reservoir and a unit of ultraviolet light lamps. Fishes were fed twice a day for 120 days with 2% of their total biomass. The following water quality parameters were recorded: water temperature, dissolved oxygen, pH, total ammonium nitrogen (TAN), ammonia, nitrate and chemical oxygen demand. The data were analyzed with a one-way ANOVA to determine statistical differences in the components of the system. The average values of TAN and nitrate indicated a high efficiency of the nitrification process at different fish loading of biomass. About 50% of TAN and more than 90% of ammonia was stripped into the atmosphere and this explains the low levels measured in the other components of the system. Other causes that contribute to the removal of nitrogen compounds were the assimilation by microorganism accumulated in the bottom of the sedimentation tank and the absorption and adsorption by the sludge. Results showed that the water quality parameters were satisfactory for 99% survivorship and an acceptable growth rate for both fish species.

**Key word:** Water quality, nitrification, tilapia and rainbow trout culture.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas tres décadas, se han observado avances importantes en el diseño y manejo de los sistemas cerrados de recirculación de agua utilizados en la acuicultura, debido a que cada día aumenta la demanda por proteínas de origen animal y el grado de conciencia sobre lo frágil y limitado de los recursos acuáticos en el mundo.

Uno de los principales problemas que presentan los sistemas cerrados de recirculación de agua utilizados en la acuicultura, es la eliminación constante de los metabolitos tóxicos, como el amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) y el nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ). El nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ ), es excretado por los peces a través de sus branquias y la orina (Forster & Goldstein, 1969; Lagler y colaboradores, 1984), y es producido también por la descomposición microbiana del alimento no consumido y de las excretas, por medio de las bacterias. El alimento balanceado que es aportado a los peces, puede constituir hasta el 88% del nitrógeno en un sistema de cultivo. Gross y colaboradores (2000), mencionan que existen cuatro formas de eliminación del nitrógeno en un estanque: a) la cosecha de los peces que representa el 31.5%, b) la desnitrificación con el 17.4%, c) la volatilización del amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) con el 12.5% y d) los sedimentos con el 2.6%.

En un sistema cerrado de recirculación de agua para acuicultura, existen varias maneras de reducir o eliminar el  $\text{NH}_3$ , el cual es extremadamente tóxico para los peces y otros organismos. Luccheti y Gray (1988), sugieren tres mecanismos básicos para eliminarlo: a) por arrastre del aire, proporcionando la denitrificación, b) por intercambio iónico y c) por biofiltración. Este último, es el más frecuentemente utilizado en los sistemas cerrados de recirculación de agua, debido a que es eficiente, tiene bajo costo y su operación y mantenimiento resulta relativamente fácil.

Durante el proceso de biofiltración, el agua rica en nitrógeno pasa a través de los biofiltros sumergidos, previa-

mente colonizados por bacterias nitrificantes. De esta manera, el  $\text{NH}_3$  es oxidado a  $\text{NO}_2^-$  por bacterias amonio oxidantes y posteriormente, el nitrito es oxidado a  $\text{NO}_3^-$  mediante bacterias nitrito oxidantes.

El principal problema en los procesos de biofiltración, es el incierto establecimiento de las colonias de bacterias nitrificantes en el lecho de los biofiltros, que pueden reducir su actividad debido a cambios bruscos en la temperatura del agua o bien a la disminución del pH (a valores menores que 7) (Alleman & Preston, 1991). Asimismo, afectan negativamente, el aumento en la materia orgánica soluble, o bien la presencia de algunas substancias químicas utilizadas en el tratamiento o en el control de enfermedades infecciosas de los peces bajo cultivo, como el formaldehído (Heinen *et al.*, 1995) y la oxitetraciclina (Klaver & Matthews, 1994), entre otras. Si los biofiltros no funcionan adecuadamente, se pueden incrementar los valores de amoniaco y nitrito, ocasionando con ello la muerte de los peces. Klontz (1991), encontró en cultivos de trucha arco iris, *Oncorhynchus mykiss*, que para mantener un ambiente adecuado para el crecimiento y mantenimiento de las bacterias nitrificantes, el agua debe encontrarse a una temperatura entre los 11 y 15°C, un pH ligeramente alcalino, 80% de saturación de oxígeno disuelto en el agua y una dureza total por arriba de los 100 mg/L.

La información sobre la tasa de eliminación del nitrógeno amoniacal total por diferentes biofiltros y en distintas circunstancias de cultivo de peces es escasa, sobre todo en los sistemas cerrados de recirculación de agua a pequeña escala comercial. Entre ellos se pueden mencionar los trabajos realizados por Kolman (1993 a y b), Hargrove *et al.* (1996), Eikbrokk *et al.* (1995), Westerman *et al.* (1996), Twarowska *et al.* (1997) y Schuster y Steltz (1998). Hoy en día, no está claro el por qué diferentes especies de peces, presentan una sensibilidad diferenciada a la presencia de amoniaco. Así, por ejemplo, la Tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus* puede tolerar niveles altos que van desde 1.1 a 4.1 mg/L de  $\text{N-NH}_3$  du-

rante largos períodos de tiempo (hasta 96 horas), mostrando una mortalidad del 50%. En esta especie, también se ha encontrado que la sensibilidad varía de acuerdo al tamaño de los peces y a la temperatura del agua (Abdalla *et al.*, 1996). Por su parte, la trucha arco iris, *Oncorhynchus mykiss*, es la más sensible de las especies a la presencia de amoníaco y sólo puede tolerar pequeñas concentraciones de este gas (de 0.03 a 0.05 mg/L de N-NH<sub>3</sub>). Si persiste esta concentración por varios días, puede ocasionar daños severos y aun la muerte de los organismos (Klontz, 1991).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad del agua de un sistema cerrado de recirculación de agua a pequeña escala comercial, para el cultivo mixto de la trucha arco iris, *Oncorhynchus mykiss* y Tilapia del Nilo, *Oreochromis niloticus*, bajo diferentes cargas de biomasa.

## MATERIAL Y MÉTODOS

**Descripción del sistema cerrado de recirculación y reacondicionamiento de agua (SCRRA).** El sistema utilizado en esta investigación, está localizado en la Planta Experimental de Producción Acuícola (PExPA) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Distrito Federal, México. Consiste de seis estanques circulares (EC) de autolimpieza para el cultivo de peces, los cuales están conectados a una cisterna de sedimentación (CS), dos piletas de concreto con biofiltros sumergidos cada una (PI y PII), un filtro de arena rápido (FRA), dos bombas (B), una pileta de reacondicionamiento (PR) del agua y una unidad de lámparas de luz ultravioleta (Figura 1).

El flujo de agua que pasa a través de todo el sistema es de aproximadamente 103 m<sup>3</sup>. Cada estanque circular tiene un

volumen de operación de 2.7 m<sup>3</sup> y un flujo promedio de agua de 0.640 m<sup>3</sup> por hora, produciendo un recambio total de 5.4 veces al día. El agua que pasa por los otros componentes del sistema (CS, PI, PII y PR) mantiene un recambio de 6.5 veces al día, con un bombeo promedio de 23 horas al día. Permanentemente en cada EC se inyecta 48.3 litros de aire por metro cúbico por minuto y 13.4 litros por metro cúbico por minuto en las tres piletas (PI, PII y PR), por medio de un soplador de 15 caballos de fuerza, que suministra la aireación a todo el sistema.

**Operación.** La Tilapia del Nilo y la trucha arco iris fueron introducidas en los seis estanques circulares por un periodo de 120 días, utilizando diferentes cargas de biomasa (expresada en kilogramos). Cada catorce días, se registró el peso total húmedo de los peces por medio de una balanza marca Ohaus GT 4800 (0.01 g de precisión), para ajustar la ración diaria de alimento. La biomasa total contenida, el número de peces y la ración diaria de alimento suministrado (2% de la biomasa total al día) a los peces en cultivo, durante todo el periodo experimental, se presenta en la Tabla 1.

Los peces fueron alimentados con balanceado comercial de la marca "El Pedregal" (bajo licencia de Silver Cup, USA) con un contenido de 40% de proteína y 16% de lípidos. El alimento se suministró diariamente en dos raciones iguales (a las 10:00 y a las 16:00 horas).

De manera aleatoria, se registraron los parámetros de calidad del agua en los EC, la CS, en los dos biofiltros (PI, PII) y en el PR. Los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron: temperatura del agua y oxígeno disuelto (OD) con un oxímetro YSI modelo 57, pH con un medidor de pH marca Beckman, modelo 50. El nitrógeno amoniacal total NAT (N-NH<sub>3</sub> + N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>),

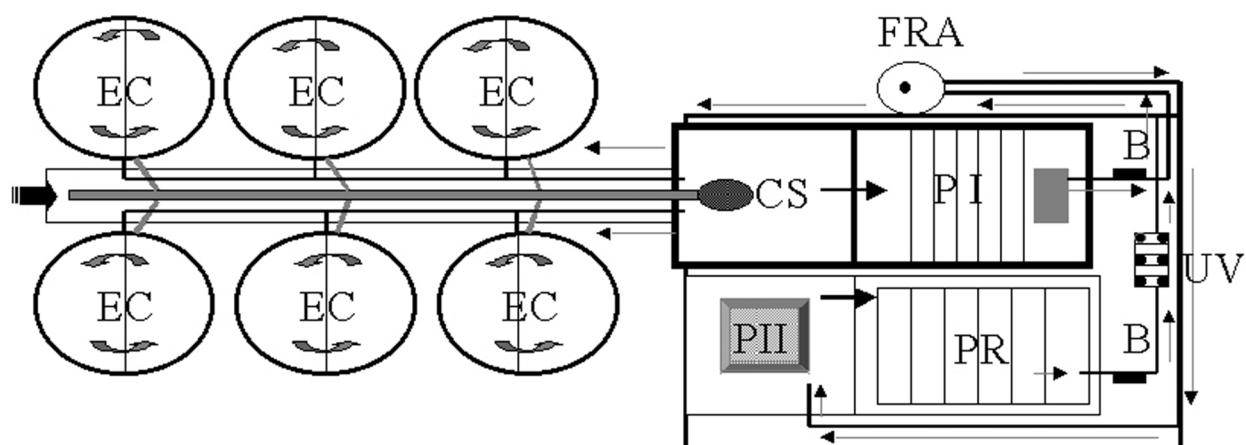


Figura 1. Diagrama funcional del sistema cerrado de recirculación de agua utilizado en este trabajo (sin escala). Las flechas indican la dirección del flujo de agua: EC = estanques de cultivo; CS = cisterna de sedimentación; PI = pileta 1; PII = pileta 2; PR = piletas de reacondicionamiento; FRA = filtro rápido de arena; B = bombas; UV = unidad de luz ultravioleta.

Tabla 1. Número de peces, carga y ración de alimento suministrada durante el experimento.

Días	Número de peces	Biomasa (kg)	Ración de alimento diario (kg)
1	100	15	0.30
49	100	23	0.46
50	340	48	0.96
79	337	76	1.52
80	337	76	1.52
93	337	98	1.52
94	247	75	1.50
108	247	90	1.50
109	129	49	0.98
119	129	56	1.12
120	27	13	0.26

nitrato ( $\text{N-NO}_3$ ) y la demanda química de oxígeno (DQO), fueron medidos de acuerdo con las técnicas estándar (APHA *et al.*, 1992). El amoniaco ( $\text{N-NH}_3$ ), fue estimado a partir del NAT, ajustando el valor de acuerdo con la temperatura del agua y el pH, de acuerdo con la tabla propuesta por Piper *et al.* (1982). El sedimento acumulado en el fondo de la cisterna de sedimentación, fue analizado para determinar nitrógeno total, lípidos totales, fibras y carbohidratos, nitrógeno amoniacal total y cenizas utilizando muestras individuales duplicadas de acuerdo a los métodos estándar (AOAC, 1990).

Para evaluar la pérdida de amoniaco por el arrastre de aire en el sistema, se construyó un sistema a escala piloto montado en el laboratorio. Para ello se utilizó un micro-fermentador New Brunswick de 10 litros de capacidad, con agua del sistema, la cual fue previamente irradiada con luz ultravioleta, y se le agregó cloruro de amonio anhídrido. La temperatura del agua se mantuvo a 20°C, el pH en 8.6 y se aplicó una

aireación de 5 litros por minuto. El amoniaco fue medido mediante la técnica estándar de APHA *et al.* (1992).

Para comprobar si existían o no diferencias significativas entre los diferentes componentes del sistema cerrado de recirculación y los compuestos nitrogenados, se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de una sola vía y la prueba *a posteriori* de Tukey HSD, utilizando el programa de Software Statistica versión 4.5.

## RESULTADOS

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos en cada componente del sistema cerrado de recirculación de agua a lo largo de 120 días se presentan en la Tabla 2.

El valor mínimo promedio de oxígeno disuelto, se registró en la CS, donde se acumulan las excretas y los desperdicios de alimento provenientes de los EC. En esta cisterna en particular, se observó una diferencia menor en la concentración de oxígeno disuelto de hasta 1.7 mg/L, con respecto a los otros componentes del sistema, presentando una diferencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) con respecto a los otros componentes. Esto mismo se observó con el porcentaje de saturación de oxígeno, donde la mayoría de los componentes presentó valores cercanos a la saturación, a excepción de la CS. El pH también mostró en esta cisterna el valor más bajo (7.7), y presentó diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) con respecto a los otros componentes, indicando que el proceso de nitrificación disminuyó el valor de pH. Los valores promedio de NAT fueron mayores en los EC y en la CS, siendo similares en los demás componentes, los EC y la CS, presentaron diferencias significativas con respecto a los otros componentes del sistema. El amoniaco ( $\text{N-NH}_3$ ) presentó una conducta similar, registrando los valores más altos en los EC y en el resto de los compo-

Tabla 2. Valores promedio y la desviación estándar, de los parámetros fisicoquímicos registrados en los componentes del sistema.

Parámetros	Estanques de cultivo		Componentes del sistema de recirculación			
	1	2	CS	PI	PII	PR
O. D. (mg/L)	6.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	6.4 ± 0.4 <sup>a</sup>	4.7 ± 0.4 <sup>b</sup>	6.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	6.6 ± 0.4 <sup>a</sup>	6.9 ± 0.4 <sup>a</sup>
Saturación de O.D. (%)	96 ± 7.2 <sup>a</sup>	95 ± 5.7 <sup>a</sup>	67 ± 5.6 <sup>b</sup>	91 ± 7.1 <sup>a</sup>	94 ± 5.6 <sup>a</sup>	98 ± 5.6 <sup>a</sup>
NAT (mg/L)	0.32 ± 0.22 <sup>c</sup>	0.28 ± 0.16 <sup>c</sup>	0.16 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.04 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.04 ± 0.02 <sup>a</sup>
N-NH <sub>3</sub> (mg/L)	0.26 ± 0.001 <sup>b</sup>	0.22 ± 0.014 <sup>b</sup>	0.02 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.03 ± 0.002 <sup>a</sup>
Temperatura del agua (°C)	18.9 ± 1.2 <sup>a</sup>	18.8 ± 1.3 <sup>a</sup>	18.7 ± 1.4 <sup>a</sup>	18.7 ± 1.3 <sup>a</sup>	18.7 ± 1.2 <sup>a</sup>	18.7 ± 1.3 <sup>a</sup>
pH	8.4 ± 0.13 <sup>a</sup>	8.4 ± 0.12 <sup>a</sup>	7.7 ± 0.4 <sup>a</sup>	8.1 ± 0.3 <sup>a</sup>	8.2 ± 0.3 <sup>a</sup>	8.4 ± 0.2 <sup>a</sup>
DQO (mg/L)	34.3 ± 47.4 <sup>a</sup>	41.5 ± 68.3 <sup>b</sup>	38.7 ± 51.9 <sup>a</sup>	32.6 ± 56.2 <sup>a</sup>	32.2 ± 59.9 <sup>a</sup>	37.7 ± 61.3 <sup>a</sup>

<sup>a,c</sup>Las letras diferentes en los renglones, indican que existen diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los componentes del sistema.

(CS) Cisterna de sedimentación; (PI) pileta I; (PII) pileta II; (PR) pileta de reacondicionamiento; (O.D.) oxígeno disuelto; (DQO) demanda química de oxígeno; (NAT) nitrógeno amoniacal total.

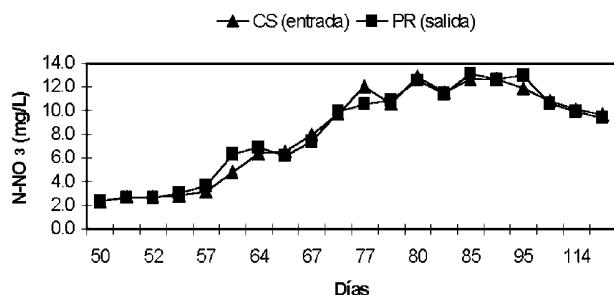


Figura 2. Valores promedio de nitrato ( $\text{N}-\text{NO}_3$ ) registrados en la entrada (cisterna de sedimentación CS) y en la salida (pileta de reacondicionamiento PR) del sistema.

tes los valores fueron bajos y no presentaron diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ). En general, los valores promedio de DQO fueron semejantes en todos los componentes, a excepción del EC2.

Los valores de nitrato ( $\text{N}-\text{NO}_3$ ) registrados en la CS y en la PR, que corresponden a la entrada y salida respectivamente del sistema, mostraron un incremento a lo largo del periodo experimental, se inició con un valor mínimo promedio de 2.3 mg/L en el día 50 alcanzó un valor máximo de 12.9 mg/L en el día 84 y declinando levemente hacia el final del experimento (120 días), con un valor promedio de 9.6 mg/L. No se observaron diferencias significativas ( $p \geq 0.05$ ) entre los valores de nitrato en la entrada (CS) y en la salida (PR) del sistema para cada registro (Figura 2).

Se observó una relación directa entre la carga de biomasa de peces y la concentración del NAT. Este comportamiento fue especialmente notorio en la CS, donde se acumularon los desechos provenientes de los EC. Cuando la carga de biomasa de peces alcanzó valores aproximados a los 100 kg, el valor registrado de NAT fue de 0.38 mg/L (Figura 3).

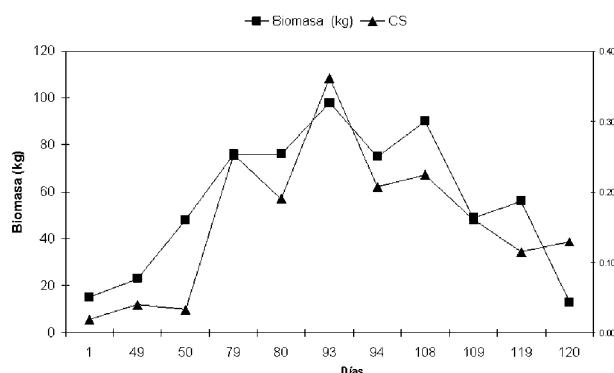


Figura 3. Relación entre la carga de biomasa de peces (kg) y el nitrógeno amoniacal total (NAT) registrada durante el periodo experimental.

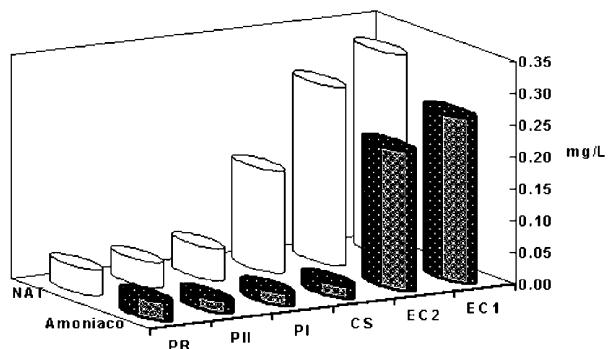


Figura 4. Comparación de los valores promedios del NAT y del amoniaco ( $\text{N}-\text{NH}_3$ ), registrados en cada uno de los componentes del sistema.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre la concentración promedio del NAT y el amoniaco en cada uno de los componentes del sistema, siendo los valores más altos registrados de NAT y de amoniaco de 0.32 y 0.25 mg/L respectivamente en el EC2 (Figura 4). Los valores no excedieron los límites de seguridad de la tolerancia a estos compuestos para las especies cultivadas, excepto en los estanques de cultivo 1 y 2. En el experimento donde se simularon las condiciones de los estanques, el porcentaje de pérdida de NAT debido al arrastre, mostró que cerca del 65% se pierde durante las primeras 22 horas, alcanzando hasta el 90% durante las próximas 208 horas (ocho días aproximadamente) (Figura 5).

Los resultados del análisis químico de los lodos acumulados en la CS, se presentan en la Tabla 3. En ella destacan los valores elevados de nitrógeno total y de NAT (20.42 y 409.8 mg/L, respectivamente), que se acumularon en los lodos.

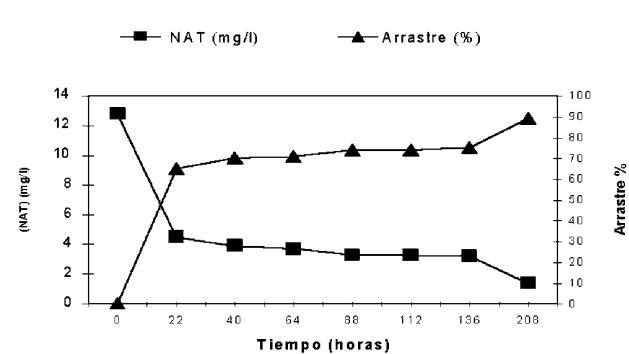


Figura 5. Porcentaje de NAT ( $\text{N}-\text{NH}_4^+$ ) perdido en el tiempo, registrado en un experimento *in situ* en condiciones similares al cultivo.

Tabla 3. Resultados del análisis químico de los lodos acumulados en la cisterna de sedimentación (CS).

Componentes (mg/L en 100 g)	Base húmeda (%)	Base seca (%)
Nitrógeno total	2.74	20.42
Lípidos totales	0.72	5.36
Fibras y carbohidratos	7.72	57.53
NAT	57.7	409.80
Cenizas (550°C)	2.24	16.69

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio, indican que los parámetros de calidad del agua evaluados en los distintos componentes del sistema cerrado de recirculación a lo largo de los 120 días que duró el experimento, se mantuvieron dentro de los límites razonables de seguridad para las especies cultivadas, excepto en las estanques de cultivo, donde los valores promedio de N-NH<sub>3</sub> excedieron los niveles de seguridad establecidos para la trucha arco iris que van de 0.03 a 0.05 mg/L de acuerdo con Klontz (1991). El recambio de agua diario y los altos niveles de saturación de oxígeno disuelto, contribuyeron a mantener bajos los valores del NAT. No obstante, se observó una clara tendencia a la acumulación y retención del NAT y del amoniaco en los EC, en contraste con los otros componentes del sistema, donde los valores fueron significativamente más bajos. Esto podría ser explicado, si se considera que los peces recibieron alimento balanceado, ya que es una fuente constante de nitrógeno, puesto que los peces lo excretan a través de las branquias, la orina, la descomposición de las heces y de los alimentos no consumidos por acción bacteriana. De hecho, se ha calculado que el alimento balanceado aporta hasta el 88% del nitrógeno endógeno generado en el sistema. Por esta razón, los valores del NAT y amoniaco fueron elevados en los estanques de cultivo. También, se podría esperar valores similares o más elevados en la CS, sin embargo, no ocurrió así. Este hecho indica que hay una eliminación cercana al 50% del nitrógeno amoniacal total y del más del 90% del amoniaco, en una distancia relativamente corta entre los EC y la CS.

De los resultados obtenidos en este estudio, se sugiere que la eliminación del nitrógeno amoniacal y del amoniaco, en los estanques de cultivo y en la cisterna de sedimentación fue debida a diversos factores, tales como la volatilización del NAT y del N-NH<sub>3</sub> debido a la fuerte aireación de los estanques de cultivo y a la presencia de microorganismos en el lodo en la cisterna de sedimentación, lo que se puede corroborar con la conducta exhibida por los valores de oxígeno disuelto y pH, los cuales disminuyeron ligeramente en este sitio, como resultado del proceso de nitrificación, y

finalmente, debido a la absorción o adsorción del nitrógeno por los sedimentos o lodos acumulados en el fondo de la cisterna de sedimentación, ya que el análisis químico del lodo indicó que una fuerte cantidad de nitrógeno amoniacal (57.7 mg/L por cada 100 g de lodo), puede ser acumulado o atrapado en esta interfase. Estos mismos mecanismos fueron propuestos por Gross *et al.* (2000), en estanques fertilizados que contenían una densidad alta de peces y al parecer estas son las principales pérdidas de nitrógeno en el sistema.

Las fluctuaciones del amoniaco expresadas en la figura 4, indican que los estanques de cultivo, presentaron los valores promedio más altos de este gas. A pesar de esto, no se observaron problemas de conducta anómala o muerte de los peces y tanto la Tilapia del Nilo como la trucha arco iris, mostraron un comportamiento normal. Estudios previos en este sistema cerrado de recirculación (Arredondo *et al.*, 1996), indican que el agua utilizada, presenta las siguientes características químicas: pH alcalino (> 8.0), alcalinidad total de 300 mg/L, 1.5 g/L de ion sodio y 300 mg/L de cloruros. Los iones sodio (Na<sup>+</sup>) y cloro (Cl<sup>-</sup>), presentan un efecto antagónico contra el amoniaco, por lo que lo hace menos tóxico para los peces en cultivo, además, el alimento balanceado utilizado y la aireación constante de los estanques de cultivo, permiten mantener buenas condiciones de la calidad del agua y evitar efectos fisiológicos adversos. Cai *et al.* (1996), indican que existe una relación directa entre la calidad de la proteína ingerida y la excreción del nitrógeno amoniacal total y el amoniaco. Bajo las condiciones de cultivo, los requerimientos de proteína de ambas especies fueron cubiertos, ya que se obtuvo una sobrevivencia del 99% y una buena tasa de crecimiento en ambas especies, aunque superior en la trucha arco iris, debido a que las condiciones de temperatura fueron mejores, que para la Tilapia del Nilo, ya que esta última requiere de temperaturas superiores a los 23°C para alcanzar la tasa de crecimiento óptima. En el caso de esta última especie, se obtuvo una tasa de crecimiento diario mayor a un gramo, mientras que la trucha arco iris creció más de tres gramos al día.

Diversos trabajos científicos han descrito condiciones parecidas a las nuestras en sistemas cerrados de recirculación de agua, utilizando diversos tipos de biofiltros (Kolman, 1993 a y b; Hargrove *et al.*, 1996; Twarowska *et al.*, 1997; Westerman *et al.*, 1996; Schuster & Steltz, 1998), con lo cual se puede asegurar que la operación de este sistema fue eficiente en cuanto a la acción de los biofiltros, manteniendo una buena calidad del agua y un control adecuado de los compuestos nitrogenados tóxicos durante todo el tiempo de cultivo. La experiencia obtenida en su operación fue importante para aplicar futuros criterios de diseño y mejorar las condiciones de manejo del sistema, sobre todo en lo que se refiere a la aireación y la manera de aumentar la eficiencia de arras-

tre del amoníaco hacia la atmósfera, sin que esto implique una mayor inversión y eleve los costos de producción.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de la tesis doctoral de la primera autora, en el Programa del Doctorado en Ciencias Biológicas, de la Universidad Autónoma Metropolitana. Deseamos agradecer al CONACYT, por la beca otorgada para la realización de esta tesis y el apoyo económico dado a través del Proyecto CONACYT 400200-5-4253. También, a la División de Ciencias Biológicas y de la Salud, por el apoyo económico aportado a través el Proyecto Multidisciplinario "Incremento al valor agregado de productos de origen acuícola".

## REFERENCIAS

- ABDALLA, A. A. F., C. D. McNABB & T. R. BATTERSON. 1996. Ammonia dynamics in fertilized fish ponds stocked with Nile Tilapia. *The Progressive Fish-Culturist* 58: 117-123.
- ALLEMAN, J. E. & K. PRESTON. 1991. *Behavior and physiology of nitrifying bacteria*. In: S. LADON (Ed.). Second Annual Workshop of Commercial Aquaculture Using Water Recirculating Water. Purdue University, Illinois, USA, pp. 1-11.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (A.P.H.A.), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (A.W.W.A.) & AMERICAN WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (A.W.P.C.F.). 1992. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Díaz de Santos, S.A. Madrid, España. 1134 p.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS (A.O.A.C.). 1990. *Official Methods of Analysis*. Vol. I y II. 15th Edition. Arlington, V.A., 2200 p.
- ARREDONDO, F. J. L., C. V. BOLAÑOS, V. R. CAMPOS, A. H. GARDUÑO & L. E. VILLAREAL. 1996. *Water quality analysis in a recirculating-water system for aquaculture in Mexico City*. In: VOGEL, E., A. ABDELGHANI, J. VALLADARES, J. AGUILERA & L. CHAPA (Eds). Second Inter-American Environmental Congress. ITESM, RICA, OEA, Monterrey, México, pp. 59-62.
- CAI, Y., J. WERMERSKIRCHEN & R. I. ADELMAN. 1996. Ammonia excretion rate indicates dietary protein adequacy for fish. *The Progressive Fish-Culturist* 58: 124-127.
- EIKEBROKK, B., A. PIEDRAHITA & R. Y. ULGRENES. 1995. Rates of fish waste production and effluent discharge from recirculating system (BIO-FISH) under commercial conditions. *Aquaculture Research* 26: 589-599.
- FORSTER, R. P. & L. GOLDSTEIN. 1969. Formation of excretory products. In: HOAR, W. S. & D. J. RANDALL (Eds). *Fish Physiology*. Academic Press, New York. Vol. I, pp. 313-345.
- GROSS, A., C. E. BOYD & C. W. WOOD. 2000. Nitrogen transformations and balance in channel catfish ponds. *Aquacultural Engineering* 24 (1): 1-14.
- HARGROVE, L. L., P. W. WESTERMAN & T. M. LOSORDO. 1996. Nitrification in three-stages and single-stage floating bead biofilters in a laboratory-scale recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering* 15 (1): 67-80.
- HEINEN, J. M., A. L. WEBER, A. C. NOBLE & J. D. MORTON. 1995. Tolerance to formalin by a fluidized-bed biofilter and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in a recirculating culture system. *Journal of the World Aquaculture Society* 26 (1): 65-71.
- KLAVER, A. L. & R. A. MATTHEWS. 1994. Effects of oxytetracycline on nitrification in a model aquatic system. *Aquaculture* 123 (3-4): 237-247.
- KLONTZ, G. W. 1991. *Fish for the future: concepts and methods of intensive aquaculture*. Idaho Forest, Wildlife and Range Experiment Station, Universidad of Idaho, Idaho, USA, 192 p.
- KOLMAN, R. A. 1993a. Model studies on a recirculation system with a rotating biological filter for fish fattening. Part I. Preliminary model studies on the rotating drum filter. *Archives of Polish Fisheries* 1 (2): 161-166.
- KOLMAN, R. B. 1993b. Model studies on a recirculation system with a rotating biological filter for fish fattening. Part II. Model studies of a biological drum filter cooperating with a mechanical filter. *Archives of Polish Fisheries* 1 (2): 167-176.
- LUCCHETTI, G. L. & G. A. GRAY. 1988. Water reuse systems: a review of principal components. *The Progressive Fish-Culturist* 50: 1-16.
- LAGLER, K. F., J. E. BARDACH, R. R. MILLER & M. PASIÓN. 1984. *Ictiología*. AGT Editor, S.A. México, D.F. 506 p.
- PIPER, G., I. B. McELWAIN, L. E. ORME, J. P. McCAREN, I. G. FOWLER & J. R. LEONARD. 1982. *Fish hatchery management*. U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C. USA, 517 p.
- SCHUSTER, C. & H. STELTZ. 1998. Reduction in the make-up water in semi-closed recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* 17: 167-174.
- TWAROWSKA, G. T., W. P. WESTERMAN & M. T. LOSORDO. 1997. Water treatment and waste characterization evaluation of an intensive recirculating fish production system. *Aquacultural Engineering* 16: 133-147.
- WESTERMAN, P. W., T. M. LOSORDO & M. L. WILDHABER. 1996. Evaluation of various biofilters in an intensive recirculating fish production facility. *Transaction of the ASAE* 2: 723-727.

Recibido: 21 de enero de 2003.

Aceptado: 29 de septiembre de 2003.