

TRATAMIENTO DE EFLUENTES PISCÍCOLAS (TILAPIA ROJA) EN LAGUNAS CON *Azolla pinnata*

TREATMENT OF FISH FARM EFFLUENTS (RED TILAPIA) IN PONDS WITH *Azolla pinnata*

TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS DE PEIXES (TILÁPIA VERMELHA) POR LAGOAS COM *Azolla pinnata*

GUILLERMO CHAUX F.¹, JULIA ROSA CAICEDO B.², JAVIER ERNESTO FERNANDEZ M.¹

RESUMEN

*Los sistemas con plantas acuáticas flotantes son una alternativa económicamente sostenible para el tratamiento de efluentes piscícolas. Se evaluó a escala piloto el desempeño de un sistema de lagunas con *Azolla pinnata* en serie para el tratamiento de efluentes de cría de tilapia roja durante el proceso de levante y engorde. El sistema construido en la piscícola "La Yunga" (Popayán, Colombia) consistió en dos líneas de cinco lagunas en serie; la primera con *A. pinnata* y la segunda sin la planta acuática; cada laguna se operó con un tiempo de detención de un día. La evaluación se realizó en época seca. La producción de *Azolla* fresca osciló entre 42 y 87 g/m².d y el contenido de proteína entre 18,5% y 20,4%. Las eficiencias de remoción obtenidas en las líneas (con *Azolla*, sin *Azolla*) fueron respectivamente: 56% y 46% DBO₅; 49% y 26% DQO; 56% y 33% SST; 28% y 36% N-NTK; -108% y 23% N-NH₄⁺; 64% y 34% fósforo total, mostrando superioridad del sistema con *Azolla*. Con solo tres lagunas en serie plantadas con *A. pinnata* se alcanzan las eficiencias máximas obtenidas en la remoción de DBO₅, DQO, SST y fósforo total.*

Recibido para evaluación: 03/11/2011. Aprobado para publicación: 15/11/2013

- 1 MSc. Docentes. Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- 2 Ph.D. Docente. Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil. Programa de Ingeniería Ambiental. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Correspondencia: gchaux@unicauca.edu.co

ABSTRACT

Floating aquatic plants systems are an economically sustainable option for fish effluents treatment. A system of ponds with Azolla pinnata was evaluated at pilot scale as the treatment of a fish culture effluent, during the growth-fattening period. The system was located on the fish farm "The Yunga" (Popayán, Colombia) and it consisted of two lines of five ponds in series, one with A. pinnata and the other without the aquatic plant; each pond was operated with a detention time of a day. The assessment was conducted during the dry season. The production of fresh Azolla ranged between 42 and 87 g/m².d and protein content between 18,5% and 20,4%. The removal efficiencies obtained in lines (with Azolla, without Azolla) were respectively 56% and 46% BOD₅, 49% and 26% COD, 56% and 33% TSS, 28% and 36% TKN, -108% y 23% N-NH₄⁺, 64% and 34% total phosphorus. The best performance was of the system with Azolla. With only three ponds in series planted with A. pinnata are reached maximum efficiencies obtained in the removal of BOD₅, COD, TSS and total phosphorus.

RESUMO

Sistemas com plantas aquáticas flutuantes são uma opção economicamente sustentáveis para o tratamento de efluentes de peixes. Foi avaliado o desempenho em escala piloto de um sistema de lagoas em série com Azolla pinnata como um tratamento para efluentes de tilápia vermelha (Oreochromis sp.). A avaliação foi realizada durante o processo de crescimento e engorda. O sistema construído na Estação de Piscicultura "La Yunga" (Popayán, Colômbia) consistiu de duas linhas de cinco lagoas em série, o primeiro com A. pinnata e segunda sem a planta aquática, cada lagoa foi operado com um tempo de retenção de um dia. A avaliação foi realizada durante a estação seca. A produção de Azolla fresca variou entre 42 e 87 g/m².d de teor de proteínas entre 18,5% e 20,4%. As eficiências de remoção obtidos nas linhas (Azolla, sem Azolla) foram respectivamente 56% e 46% de DBO₅, 49% e 26% DQO, 56% e 33% SST, 28% e 36% N- NTK, -108% e 23% N-NH₄⁺, 64% e 34% fósforo total, mostrando a superioridade do sistema com Azolla. Com apenas três lagoas em série plantadas com A. pinnata são alcançadas eficiências máximas obtidas na remoção de DBO₅, DQO, SST e fósforo total.

INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de levante y engorde de tilapia se producen efluentes aparentemente diluidos; sin embargo, aportan contaminación por nutrientes (fósforo y nitrógeno), sólidos, materia orgánica y patógenos a los cuerpos receptores [1, 2, 3]. Tales efluentes no son aptos para su reutilización en piscicultura, ni para vertimiento directo a cuerpos receptores, razón por la cual es necesario el tratamiento de los mismos [4].

Diversas tecnologías se han utilizado en el tratamiento de efluentes de tilapia: filtros en grava [3, 5], osmosis [6], recirculación y biofiltración en sistemas acuapónicos [7], sedimentación convencional y reactor aerobio de

PALABRAS CLAVE:

Fitotratamiento, Piscicultura, Nutrientes, Plantas acuáticas.

KEY WORDS:

Phytotreatment, Pisciculture, Nutrients, Aquatic plants.

PALAVRAS-CHAVE:

Fitotratamiento, Piscicultura, Nutrientes, Plantas aquáticas.

lecho fluidizado [8], humedales de flujo subsuperficial [9] y plantas acuáticas [10, 11].

Azolla sp. es un helecho acuático libre flotante, capaz de crecer en variados ambientes, con alta productividad de biomasa asociada a una gran habilidad para fijar nitrógeno de la atmósfera y con múltiples aplicaciones como fertilizante, alimento para animales (rumiantes, aves y peces), biofiltro, concentración de nutrientes y metales pesados en distintas clases de aguas. El cultivo de *Azolla* es simple y barato y crece tanto en aguas claras y frescas como en aguas con bajo nivel de contaminación presentando capacidad para remover fósforo incluso en aguas con deficiencias de nitrógeno [12, 13].

Azolla pinnata es una planta acuática que crece con facilidad en los efluentes de lagos productores de tilapia roja aún en condiciones climáticas adversas [4]. Los trabajos realizados por [10] y [14], reportan la habilidad de *Azolla* para remover nutrientes en efluentes piscícolas, logrando remociones de nitrógeno amoniacal del 95%, NO_3^- N del 78%, fosfatos del 62%. En Brasil [15] evaluó el uso de *Azolla filiculoides* en la remoción de nitrógeno y fósforo en efluentes colectados en el fondo de estanques de cría de tilapia; el fitotratamiento del efluente con *Azolla* presentó mayor remoción de nitrógeno y fósforo, en las unidades experimentales con cobertura del 75% del área.

Con respecto al tratamiento de efluentes de lagos productores de tilapia roja, en el país se registra una experiencia a escala piloto realizada por [3], la cual fue posteriormente realizada a escala real por [5], evaluando el desempeño de filtros gruesos en capas, obteniendo resultados aceptables en la remoción de nutrientes, pero bajos porcentajes de remoción de materia orgánica; lo que sugiere que deben evaluarse alternativas distintas para el tratamiento de estos efluentes.

Los factores anteriormente mencionados sugieren que *Azolla* podría ser una opción adecuada para tratar efluentes piscícolas, razón por la cual este estudio tuvo como propósito evaluar el desempeño de lagunas con *Azolla pinnata* en la remoción de materia orgánica, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, nitrógeno total Kjeldahl (N-NTK), nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) y fósforo total (P total) en efluentes de lagos productores de tilapia roja. Adicionalmente se analizaron las tendencias de remoción de dichos contaminantes y se midió el crecimiento de la biomasa y su contenido proteínico.

MÉTODO

Este trabajo, se realizó a escala piloto en la estación piscícola “La Yunga”, ubicada en zona rural de la ciudad de Popayán, (Cauca). La estación cuenta con ocho estanques de cría de tilapia roja para fines comerciales con una producción media de 12 toneladas anuales. El líquido a tratar se derivó de un estanque 0,8 m de profundidad de base rectangular (45 m X 10 m) con fondo en tierra, pendiente media del 0,2%. La densidad del cultivo era de $0,36 \text{ Kg/m}^3$ con peces de peso medio de 170 g y una frecuencia media de alimentación de dos raciones por día.

La planta piloto se puso en funcionamiento en el mes de febrero, realizando pre ensayos semanales hasta el mes de abril, cuando se pudo observar estabilidad en los parámetros. Durante el periodo de muestreo (abril a agosto) predominó el tiempo seco con temperaturas que oscilaron entre 17 y 24°C .

El sistema de tratamiento consistió en dos líneas de cinco lagunas en serie, una con *Azolla pinnata* como planta flotante y otra línea sin la planta acuática. Cada laguna se construyó con recipientes cilíndricos de material termoplástico (polietileno de alta densidad, PE-HD-2) de 60 cm. de altura y 58 cm. de diámetro. La columna de agua fue de 40 cm. La regulación de caudales se realizó mediante una cámara de carga dotada de rebosadero para mantener un nivel constante y válvulas de bola. Por el bajo tiempo de retención en la cámara (10 minutos), en los pre ensayos se pudo determinar que no tenía ningún efecto significativo en la calidad del líquido. A cada línea se le suministró un caudal promedio de 105,6 L/d, garantizando un tiempo de detención teórico de 1,0 día en cada tanque.

La *Azolla* fue obtenida en su estado natural de la corriente efluente de un estanque de cría de tilapia en la localidad de Pambío (Cauca) y fue trasladada a “La Yunga”. *Azolla* mostró un rápido crecimiento y tuvo una fácil adaptación en el efluente de los lagos de tilapia roja que alimentaban la planta piloto. Cada tanque se inoculó con la misma cantidad de *Azolla* fresca (aproximadamente 4 g/L) procurando cubrir el 75% del área de cada tanque (considerado un porcentaje de cobertura óptima [15]) con el cual se generó una densidad inicial de 1630 g/m^2 . La densidad y el porcentaje de cobertura se eligieron para evitar el crecimiento de algas y la reducción en el crecimiento de *Azolla* por hacinamiento.

La planta se cosechó una vez por semana, retirando los excesos para retornar a la densidad inicial. La ganancia

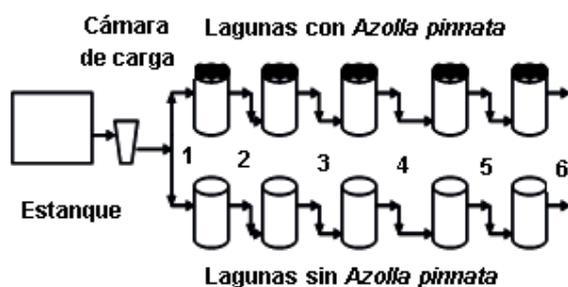
semanal de peso de la planta en cada tanque se utilizó para calcular las tasas de producción de *Azolla* fresca por unidad de área y tiempo. Con el fin de evitar la dilución por las lluvias, el sistema piloto se cubrió con techo de plástico transparente, de modo que no se inhibiera la radiación solar. Se utilizaron seis puntos de muestreo. El esquema de la planta piloto se muestra en la Figura 1.

Para el muestreo del efluente del estanque piscícola (punto 1) se utilizó un periodo de integración de 5 horas (7 AM- 12 M) considerando que este no tiene muchas fluctuaciones porque dicho estanque tiene un tiempo de retención de 5 días y los peces ejercen un efecto homogeneizador sobre el líquido. Por otra parte, debido a que el tiempo de detención en el sistema de lagunas de *Azolla* (1 día en cada laguna) es suficiente para compensar aún más dichas fluctuaciones, en los puntos 2, 3, 4, 5 y 6 se tomaron muestras con un periodo de composición de una hora.

El sistema se operó durante catorce (14) semanas y se evaluó mediante los parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos suspendidos totales (SST), N-NTK, $N-NH_4^+$ y P total, los cuales se midieron una vez por semana en cada punto de muestreo y se analizaron en el laboratorio de acuerdo con las técnicas referenciadas en el Standard Methods [16]. La DBO_5 y la DQO fueron evaluadas sobre muestras no filtradas. El oxígeno disuelto (OD), el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos disueltos (SD) se midieron en el sitio con una frecuencia promedio de dos veces por semana en cada punto de muestreo con una sonda multiparamétrica Hach Sension 156.

Las ecuaciones de regresión y el ajuste óptimo de parámetros se estimaron con base en la calidad a la entrada y salida de cada laguna, utilizando las herramientas disponibles en Microsoft Excel.

Figura 1. Sistema experimental para el tratamiento del efluente piscícola.



También se realizaron algunas determinaciones de nitritos y nitratos en la línea con *Azolla* con el fin de inferir parcialmente sobre las transformaciones de nitrógeno en este sistema y determinar las remociones de nitrógeno total en el mismo. Los nitritos se midieron por el método colorimétrico y los nitratos empleando el método espectrofotométrico [16], con una frecuencia promedio de una vez por punto de muestreo cada dos semanas. Adicionalmente, se determinó el contenido de nitrógeno y fósforo en la biomasa. Para tal fin, se tomaron muestras de *Azolla* cosechada, se drenaron, pesaron y secaron en un horno a 80 °C durante 24 horas lo que permitió calcular el contenido de materia seca. La materia seca se pulverizó y se utilizaron 0,1 gramos para el análisis de nitrógeno mediante el método estándar 4500 N org- B. Para analizar el contenido de fósforo, 0,1 g del polvo se llevaron a una mufla, se sometieron a una temperatura de 550 °C por una hora y las cenizas fueron procesadas usando el método de digestión con ácido clorhídrico seguido del método colorimétrico del molibdato de amonio y cloruro estañoso (método estándar 4500 P) [16].

Modelo estadístico

Se llamó L1, L2, L3, L4, L5 y L1', L2', L3', L4', L5' a cada laguna de las líneas con *Azolla* y sin *Azolla* respectivamente. El afluente al sistema se designó como AFL. Para comparar la calidad obtenida en el efluente de cada laguna de las dos líneas de tratamiento (L1 con L1', L2 con L2', etc.) inicialmente se chequeó la normalidad e independencia de los residuos y la homogeneidad de las varianzas; cumplidos estos supuestos, se utilizó un modelo estadístico de bloques al azar con estructura factorial. La calidad del líquido tratado se vio afectada por las condiciones ambientales, por ello cada día de muestreo se consideró como factor de bloqueo. Dicho modelo se corrió mediante una versión de evaluación del Software Minitab 15.

Se consideró que había diferencias significativas de calidad entre las dos líneas cuando la probabilidad arrojada por el análisis de varianza del modelo fue menor del 5% ($p < 0,05$), caso en el cual se pasó a realizar pruebas comparativas de Tukey. Con el fin de evaluar el efecto del incremento del número de lagunas en el sistema con *Azolla pinnata* (equivalente al incremento en el tiempo teórico de retención) se utilizaron pruebas t pareadas comparando cada laguna de la serie con las restantes. Se consideró que el incremento

en el número de lagunas ejercía un efecto significativo en la mejora de calidad del efluente cuando al compa-

rar dos lagunas entre sí la probabilidad arrojada por la prueba fue menor del 5% ($p < 0,05$).

RESULTADOS

Parámetros físico químicos y biomasa

Temperatura, pH, OD, CE, SD, DBO₅, DQO, SST, P total, NTK y NH₄⁺. Las Figuras 2 y 3 presentan la variación de los principales parámetros y los resultados del modelo estadístico que comparó la calidad efluente de cada par de lagunas de las dos líneas de tratamiento.

Producción de biomasa. Las tasas de producción y los contenidos de nitrógeno, proteína y fósforo de la biomasa en cada laguna plantada con *Azolla* se presentan en el Cuadro 1 (estadísticas reportadas para $n=12$ datos por cada laguna, intervalo de confianza (IC) 95%).

No se presentaron diferencias significativas en la producción de biomasa entre la primera y la segunda laguna ($p=0,673$), pero se observó un descenso significativo a partir de la tercera laguna, permaneciendo sin variaciones en la cuarta y quinta laguna ($p > 0,05$) (Cuadro 1). Con respecto al nitrógeno y el fósforo contenidos en la biomasa, no se registraron diferencias significativas entre las lagunas de la serie ($p > 0,05$). El promedio de fósforo asimilado por *Azolla* desde la primera hasta la quinta laguna fue de 0,010 gP/m².d, 0,0105 gP/m².d, 0,004 gP/m².d, 0,006 gP/m².d y 0,005 gP/m².d, respectivamente.

Nitritos y nitratos. Estos parámetros aumentaron a lo largo de la línea con *Azolla*: los nitritos pasaron de 0,020±0,002 mgN/L en el afluente a 0,080±0,017 mgN/L en el efluente final, mientras que los nitratos pasaron de 0,070±0,027 mgN/L a 0,228±0,023 mgN/L, respectivamente.

Discusión de resultados

De acuerdo con la calidad del efluente de los lagos de cría de tilapia reportada en las Figuras 2 y 3, dicho líquido puede ser considerado como un agua residual débil. Sin embargo, en función de sus niveles medios de oxígeno (menores de 5 mg/L), conductividad eléctrica (mayor de 30 μ S/cm) y fósforo total (mayores de 0,05 mg/L), dicho efluente no es adecuado para ser reutilizado con fines piscícolas [17].

Adicionalmente, de acuerdo con los aportes típicos de aguas residuales per cápita sugeridos por Von Sperling (2012): 50 gDBO/hab.d, 8 gNTK/hab.d, 60 gSST/hab.d [18], y asumiendo que las concentraciones de contaminantes presentan fluctuaciones mínimas a lo largo del día; por cada litro por segundo utilizado en la cría de tilapia se produce diariamente la contaminación equivalente a la que generarían 20, 51 y 159 personas por aguas residuales domésticas en términos de materia orgánica, NTK y sólidos suspendidos respectivamente, lo que indica que las cargas contaminantes generadas por estos efluentes pueden disminuir el potencial de los cuerpos receptores para ser potabilizados.

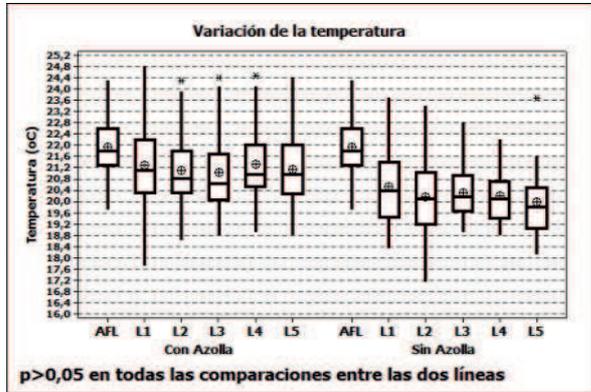
Cuando los aportes de contaminación citados se multiplican por el caudal producido por los estanques de tilapia que hay en el país, se evidencia una problemática real, que justifica la necesidad de tratar dichos efluentes antes de ser vertidos a fuentes hídricas. En tal sentido, el propósito del sistema piloto montado fue investigar sobre las cargas de materia orgánica, sólidos suspendidos, N-NTK, N-NH₄⁺ y fósforo total para mejorar la calidad de estos líquidos, tratando de dejarlos aptos para reuso en cría de tilapia o para vertimiento a fuentes hídricas.

El análisis de dicho sistema mostró que los valores de pH y las concentraciones de oxígeno disuelto fueron superiores en la línea sin *Azolla*, esto se explica por la actividad fotosintética desarrollada por la pre-

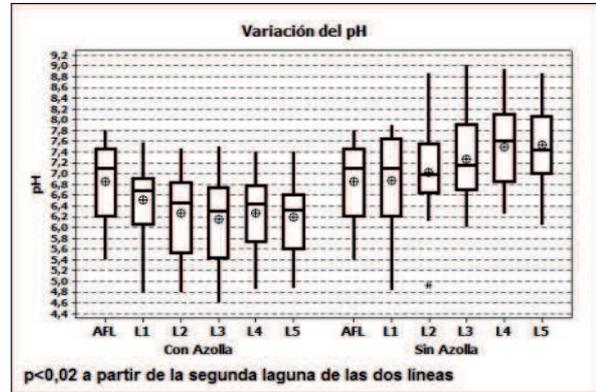
Cuadro 1. Producción de biomasa y contenido de nutrientes en *Azolla* para cada laguna.

	Producción de biomasa fresca (g/m ² .d)	Contenido de nitrógeno (%)	Contenido de proteína (%)	Contenido de fósforo (%)
L1	87,1±33,3	3,26±0,16	20,4±1,03	0,34±0,14
L2	94,1±44,8	3,17±0,16	19,8±0,97	0,31±0,20
L3	44,4±25,8	3,02±0,20	18,9±1,23	0,28±0,14
L4	45,6±25,2	3,14±0,25	19,6±1,56	0,41±0,09
L5	42,4±15,7	2,97±0,24	18,5±1,49	0,31±0,18

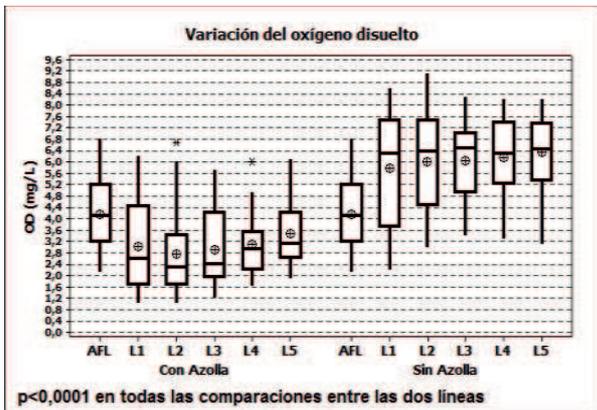
Figura 2. Variación de los parámetros medidos en el sitio.



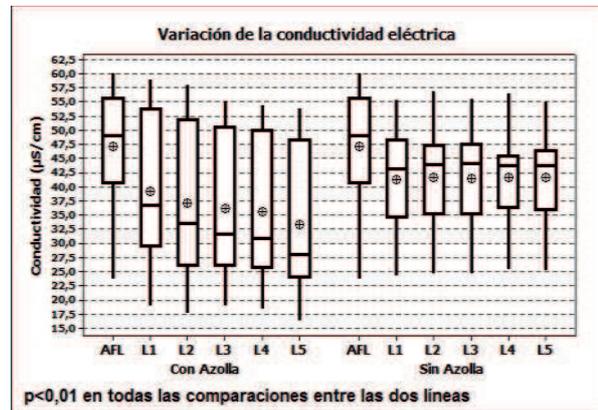
No hay diferencias significativas en la temperatura de las dos líneas.



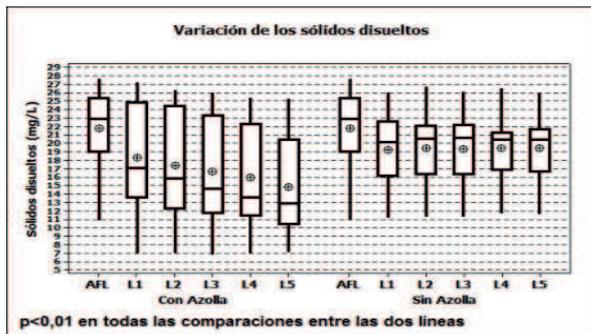
Hay diferencias significativas de pH entre las dos líneas a partir de L2.



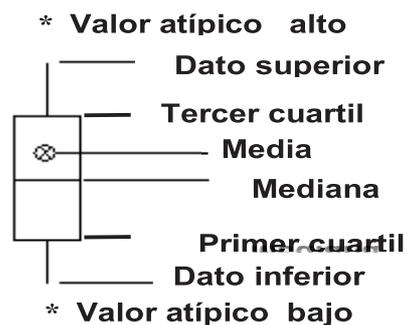
Hay diferencias significativas en OD entre todas las lagunas de las dos líneas.



Hay diferencias significativas en CE entre todas las lagunas de las dos líneas.



Hay diferencias significativas en SD entre todas las lagunas de las dos líneas.

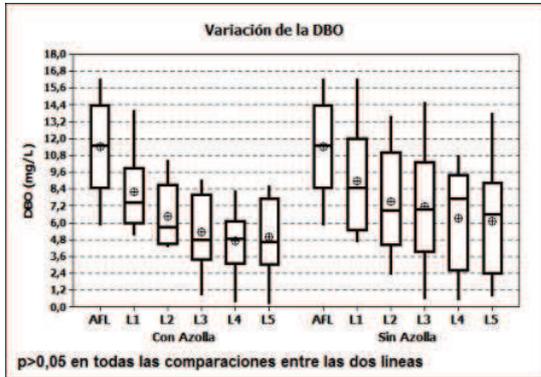


Contenido de cada caja esquemática

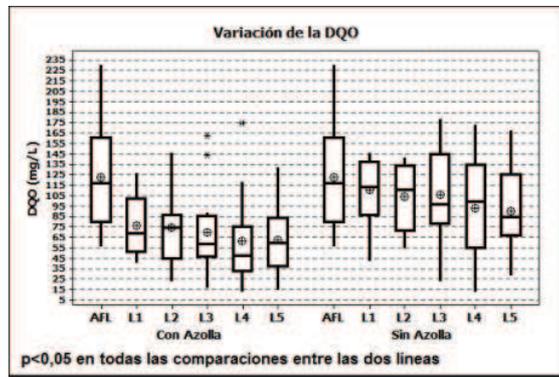
sencia de algas, fenómeno que no se presenta en el sistema con *Azolla*, dado que la cobertura de *Azolla pinnata* sobre la superficie de las lagunas bloquea la luz solar, lo cual inhibe el crecimiento de algas y disminuye la transferencia de oxígeno desde la atmósfera a la fase acuosa [19, 20].

Los rangos de carga orgánica superficial aplicada variaron entre 45,5 kgDBO/ha.d en la primera laguna y 19 kgDBO/ha.d en la quinta para el sistema con *Azolla* mientras que para la línea sin *Azolla* dichos rangos variaron entre 45,5 kgDBO/ha.d en la primera laguna y 25 kgDBO/ha.d en la quinta. Bajo estas cargas los estan-

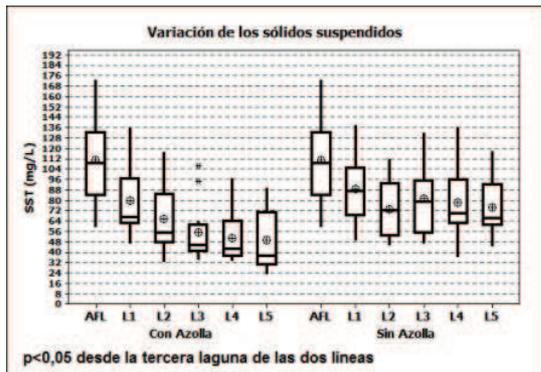
Figura 3. Variación de los parámetros medidos en laboratorio.



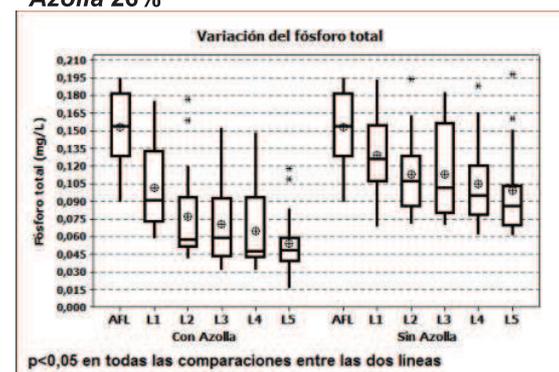
No hay diferencias significativas en DBO₅ entre las dos líneas. Remoción DBO₅: Con Azolla 56%. Sin Azolla 46%



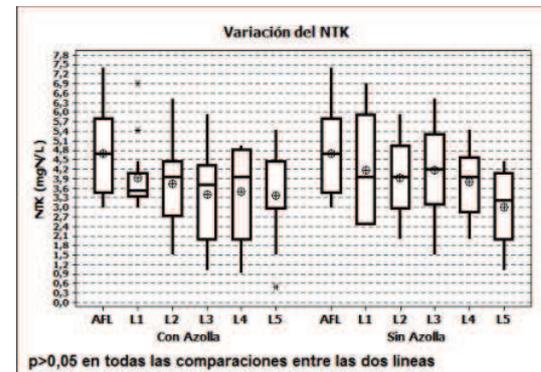
Hay diferencias significativas en DQO entre todas las lagunas de las dos líneas. Remoción DQO: Con Azolla 49%. Sin Azolla 26%



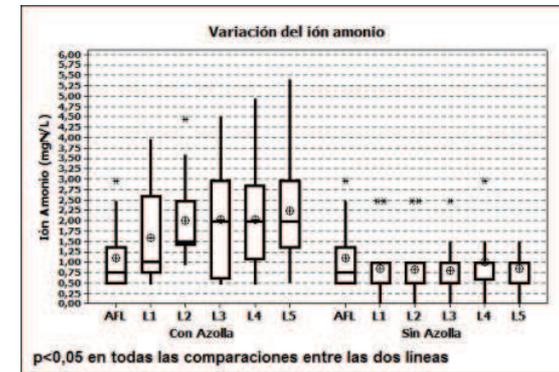
Hay diferencias significativas en SST entre las dos líneas a partir de L3. Remoción SST: Con Azolla 56%. Sin Azolla 33%



Hay diferencias significativas en P total entre todas las lagunas de las dos líneas. Remoción P total: Con Azolla 64%. Sin Azolla 34%



No hay diferencias significativas en NTK entre las dos líneas. Disminución de NTK: Con Azolla 28%. Sin Azolla 36%



Hay diferencias significativas en NH₄⁺ entre todas las lagunas de las dos líneas. Variación del ión amonio: Con Azolla incremento 108%. Sin Azolla disminución 23%

ques piloto de la línea sin *Azolla* se comportan como lagunas de estabilización terciarias (carga menor de 100 kgDBO/ha.d)[19].

Las remociones de DBO₅ y DQO logradas por los dos sistemas se pueden considerar altas si se tiene en cuenta que se trata de un efluente bastante diluido con una muy baja relación entre la DBO₅ y la DQO (<0,10). Esta baja relación es generada por la naturaleza del efluente piscícola, que además de presentar niveles muy altos de dilución contiene plancton, restos de alimento y algas que son oxidadas en el análisis de DQO pero no alcanzan a ser degradadas en los cinco días que dura el ensayo de DBO. Otros investigadores [21], empleando *Azolla* para tratar aguas residuales más cargadas (61 kgDBO₅/ha.d) y tiempos de detención de 6,2 días lograron eliminar el 69% de la DBO₅ evidenciando similitud en el comportamiento del sistema con la planta para diversos tipos de aguas residuales.

Las remociones de DQO y sólidos suspendidos fueron estadísticamente superiores en el sistema con *Azolla*. Esto puede ser explicado porque la capa vegetal mejora las condiciones de sedimentación. Por otro lado, en el sistema con la planta acuática al disminuir el crecimiento de algas disminuyen los sólidos y la DQO.

Las concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente final de las dos líneas de tratamiento incumplen la norma Norte americana para efluentes de sistemas de lagunas y la recomendación de la EPA [20] para descarga directa de efluentes líquidos a cuerpos receptores (SST máximos de 30 mg/L). Al respecto, Fernández *et al.* (2009) [3], empleando filtros gruesos ascendentes en grava lograron que el mismo efluente cumpliera con los estándares en sólidos de la EPA, manejando una velocidad de filtración de 0,6 m/h.

La superioridad en la remoción de fósforo en el sistema con *Azolla pinnata* se explica por la utilización de este nutriente por parte de la planta acuática para su crecimiento y desarrollo. Lo mismo se puede afirmar de los sólidos disueltos, cuya remoción fue mayor en el sistema con la planta acuática.

Colombia no tiene una legislación específica para efluentes de piscicultura; sin embargo, países como Brasil tienen normas para este tipo de efluentes. Según dicha norma [17], el contenido de fósforo total para reuso en piscicultura debe ser inferior o igual a 0,05 mgP/L, lo que quiere decir que el sistema con *Azolla pinnata*, logra la calidad exigida en términos de este parámetro.

La remoción de fósforo total por parte del sistema con *Azolla pinnata* fue superior a la reportada por [22] (20%) y [15] (23%) quienes emplearon otra variedad, *Azolla filiculoides*, en el tratamiento de efluentes de producción de tilapia, mientras que la remoción de este parámetro en el sistema sin *Azolla* fue similar a la reportada por [23] quienes emplearon lagunas de estabilización en el tratamiento de efluentes de piscicultura con niveles de calidad y tiempos de detención similares a los evaluados en este estudio.

La DBO₅, la DQO, los SST, los SD y el fósforo total registraron una tendencia exponencial en su eliminación en el sistema con *Azolla*. El Cuadro 2 muestra las ecuaciones de regresión.

Los resultados muestran que el sistema piloto con *Azolla* disminuyó significativamente (p<0,05) los parámetros evaluados. Hubo una reducción significativa de los mismos hasta la tercera laguna, sin diferencias entre la cuarta y la quinta (p>0,05); lo que quiere decir que para fines prácticos, se requieren tres lagunas en serie, cada una con un tiempo de detención de un día para lograr eficiencias de remoción similares a las reportadas en el presente estudio.

Desde el punto de vista de calidad de aguas, la concentración media de nitrógeno total a la salida de la línea plantada con *Azolla* (3,67 mgN/L) cumple con la norma de calidad para vertimiento de efluentes a cuerpos receptores de los Estados Unidos (<10 mgN/L) mientras que el nitrógeno amoniacal (2,24 mgN/L), los nitritos (0,23 mgN/L) y el nitrato (0,08 mgN/L) cumplen con los estándares dados por la norma brasilera para reuso en acuicultura (3,7 mg/L N-NH₄, 1,0 mg/L N-NO₂, 10 mg/L N-NO₃) [17].

El incremento del nitrógeno amoniacal a lo largo del sistema con *Azolla* puede ser explicado en parte por la producción de nitrógeno amoniacal durante el pro-

Cuadro 2. Ecuaciones de regresión de parámetros en el sistema con *Azolla**.

Parámetro	Ecuación	R ²
DBO ₅	y = 9,9462e-0,1709x	0,87
DQO	y = 100e-0,11x	0,75
SST	y = 97,21e-0,16x	0,91
SD	y = 20,563e-0,0676x	0,91
P total	y = 0,130e-0,19x	0,91

* (y: concentración media del parámetro (mg/L); x: número acumulado de lagunas, cada una con un día de tiempo de retención)

ceso de fijación de este elemento por parte de la *Azolla* [24,25] y en parte por posible descomposición de biomasa vegetal muerta. El Cuadro 1 indica que parte de la remoción de nitrógeno se debe a la asimilación por parte de *A. pinnata*. Los bajos valores de nitritos y nitratos en el sistema, sugieren la presencia de tasas de nitrificación igualmente bajas. La presencia del proceso de denitrificación se estima como muy baja debido a las altas concentraciones de oxígeno y a las bajas concentraciones de materia orgánica. Dadas las condiciones ambientales en el sistema como pH y niveles de oxígeno, se considera que otros procesos como volatilización de amonio o el anammox (oxidación anaerobia del ion amonio) no estuvieron presentes [25, 26, 27, 28]. Al respecto, los estudios futuros deberán involucrar la realización de balances de nitrógeno que permitan comprender mejor y cuantificar sus transformaciones en lagunas con *Azolla pinnata*.

La mayor producción de biomasa fresca se registra en las dos primeras lagunas con una disminución importante en la misma a partir de la tercera laguna, lo que se explica por la mayor disponibilidad de fósforo en las dos primeras lagunas, sitios donde se presenta la mayor remoción de este elemento. Resultados similares a los obtenidos con *A. pinnata* se han presentado en aguas residuales domésticas tratadas con sistemas de lagunas Duckweed en serie: el trabajo realizado por [26] reporta rangos de producción de biomasa fresca de 54-90 g/m².d y 36-84 g/m².d en aguas residuales con y sin pretratamiento, respectivamente, mientras que [27] reporta contenidos de proteína medios de 20,7% para Duckweed colectada en época de verano. Los porcentajes de proteína obtenidos en este estudio (entre 18,5 y 20,4%) son ligeramente inferiores a los obtenidos por [13] quienes reportan contenidos de proteína del 25% para *Azolla pinnata* colectada en corrientes naturales; no obstante, el contenido proteínico registrado por *Azolla pinnata*, asociado a la productividad de biomasa sobre efluentes de tilapia, se puede considerar bueno, a pesar de que la disponibilidad de nutrientes del efluente piscícola es baja, lo que evidencia el potencial de la planta no solo para mejorar la calidad de los efluentes de los estanques de producción sino como fuente de alimentación animal, compostaje, fertilización de suelos, entre otros posibles usos.

CONCLUSIONES

El efluente proveniente de estanques de cría de tilapia roja se puede considerar como un agua residual dilui-

da semejante a un efluente de calidad terciaria; sin embargo, dicho líquido no es adecuado para ser vertido de manera directa a un cuerpo receptor ni para reuso en cría de tilapia, hecho que justifica su tratamiento.

A pesar de la baja relación entre la DBO₅ y la DQO del efluente de los lagos de cría de tilapia (DBO₅/DQO < 0,10), sistemas con plantas acuáticas flotantes (*A. pinnata*), o sin ellas (Lagunas de estabilización) mejoran la calidad del mismo. Las eficiencias obtenidas en la remoción de DBO₅, DQO, SST, N- NTK, P y SD para los sistemas con *Azolla* y sin *Azolla*, respectivamente, muestran superioridad del sistema con *Azolla*.

En las comparaciones realizadas entre las dos líneas de tratamiento se pudo establecer que la planta acuática juega un papel importante en la remoción fósforo, que es el nutriente crítico para efectos de eutrofización, además, en términos de nitrógeno total y fósforo total, el sistema con *Azolla* permitió cumplir con las regulaciones para vertimiento a cuerpos receptores y para recirculación en cría de tilapia.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Universidad del Cauca, Universidad del Valle y CREPIC, por el apoyo financiero y académico que posibilitó el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] SANCHEZ, I. A. and MATSUMOTO, T. Hydrodynamic characterization and performance evaluation of an aerobic three phase airlift fluidized bed reactor in a recirculation aquaculture system for Nile Tilapia production. *Aquacultural Engineering*, 47, 2012, p. 16-26.
- [2] VAN RIJN, J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 53, 2013, p. 49- 56.
- [3] FERNÁNDEZ, J., GARCÍA, M. y LUNA, M. Estudio de la filtración ascendente en gravas en el tratamiento de efluentes de la producción de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). *Revista Ingeniería Hoy*, 31, 2009, p. 35-42.
- [4] CUERVO, M. y HUETIO, J. Evaluación del crecimiento de la planta *Azolla pinnata* en efluentes piscícolas y su efecto en la calidad del agua [Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental]. Popa-

- yán (Colombia): Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, 2009, 85 p.
- [5] CARVAJAL, F.T. y SANTACRUZ, R.D. Evaluación de la eficiencia de un sistema de tratamiento de efluentes por medio de un filtro en grava de flujo ascendente provenientes de un cultivo intensivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*), durante periodos de operación normal y de cosecha [Tesis de pregrado en Ingeniería Ambiental]. Popayán (Colombia): Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil, 2011, 92 p.
- [6] LIU, C.C. The Development of a Renewable-Energy-Driven-Reverse osmosis system for Water Desalination and Aquaculture Production. *Journal of Integrative Agriculture*, 12 (8), 2013, p. 1357-1362.
- [7] CAMPOS, R., ALONSO, A., ÁVALOS, D. ASIAIN, A. y RETA, J.L. Caracterización fisicoquímica de un efluente salobre de tilapia en acuaponía. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 2013, p. 939-950.
- [8] SÁNCHEZ, I.A. and MATSUMOTO, T. Ammonia removal in a water recirculating system for tilapia. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 24, 2011, p. 263-261.
- [9] ZACHRITZ, W., HANSON, A., SAUCEDA, J. and FITZSIMMONS, K. Evaluation of submerged surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production systems. *Aquacultural Engineering*, 39, 2008, p.16–23.
- [10] REDDING, T., TODD, S. and MIDLEN, A. The Treatment of Aquaculture Wastewaters: A Botanical Approach. *Journal of Environmental Management*, 50, 1997, p.283- 289.
- [11] HENRY-SILVA, G. and CAMARGO, A. Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents. *Scientia Agricola*, 63 (5), 2006, p. 433-438.
- [12] SINGH, S.S., KUMAR, A. and SANMUKH, R. Potentiality of *Azolla* as a suitable P-biofertilizer under salinity through acid phosphatase activity. *Ecological Engineering*, 36, 2010, p. 1076–1082.
- [13] LABIB, E.H., MABROUK, H.A., and ZAKI, M.A. Trial to improve the utilization of water lettuce (*Ulva lactuca*) and water fern (*Azolla pinnata*) in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) diets. In *Proceedings of the 3rd Global Fisheries and Aquaculture Research Conference, Foreign Agricultural Relations (FAR)*. El Cairo (Egypt): 2010, p. 336-354.
- [14] FORNI, C., CHEN, J., TANCIONI, L. and GRILLI, M. Evaluation of the fern *Azolla* for growth, nitrogen and phosphorus removal from wastewater. *Wat. Res.*, 35 (6), 2001, p. 1592–1598.
- [15] DA SILVA, J. Fito tratamento de efluente de aquacultura com *Azolla filiculoides* [Tese de Mestre em Zootecnia]. Porto Alegre (Brasil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, 2006, 118 p.
- [16] APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Edition. Washington DC (USA): 1998.
- [17] CONAMA. Resolução N° 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicação DOU nº 053. Brasil: 2005, p. 58-63.
- [18] VON SPERLING, M. *Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales*. 1 ed. San Juan de Pasto (Colombia): Universidad de Nariño, 2012, 470 p.
- [19] MARA, D. *Domestic wastewater treatment in developing countries*. Sterling (United States of America): 2004, 293 p.
- [20] UNITED STATES OF AMERICA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- EPA. *Manual Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Cincinnati (USA): 2000, p. 23- 50.
- [21] RODRÍGUEZ, C., DÍAZ, M., GUERRA, L. y HERNÁNDEZ, J. Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales. *La Habana (Cuba): Centro de investigaciones hidráulicas*, 2001, p. 1- 3.
- [22] COSTA, M., SANTOS, M., CARRAPICO, F. and PEREIRA, A. *Azolla-Anabaena's behaviour in urban wastewater and artificial media – Influence of combined nitrogen*. *Wat. Res.*, 43, 2009, p. 3743 – 3750.
- [23] PORELLO, S., LENSÍ, M., PERSIA E., TOMASSETTI, P. and FINOIA, M. Reduction of aquaculture wastewater eutrophication by phytotreatment ponds system I: Dissolved and particulate nitrogen and phosphorus. *Aquaculture*, 219, 2003, p. 515-529.
- [24] SATHISH, S.R. and BAHSCARA, K.V. Biological Nitrogen Fixation: A review. *International Journal of Advanced Life Sciences*, 1, 2012, p. 1-9.
- [25] KERN, M.A. *Azolla* as a technology to improve the nitrogen use efficiency of lowland rice [Chapter of Ph.D. dissertation]. Bonn (Germany): Center for Development Research (ZEF), University of Bonn, 2007, p. 21-23.
- [26] CAICEDO, J.R. Effect of operational variables on nitrogen transformations in Duckweed stabilization ponds [Dissertation for the Degree of

- Doctor]. London (UK): Academic Board of Wageningen University and Academic Board of the UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2005, 163 p.
- [27] EL-SHAFI, S., EL-GOHARY, F., NASR, F., VAN DER STEEN, P. and GIJZEN, H. Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. *Bioresource Technology*, 98 (4), 2007, p. 798-807.
- [28] VAN HULLE, S., VANDEWEYER, H., MEESCHAERT, B., VANROLLHEGUEM, P., DEJANS, P. and DUMOULIN, A. Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams. *Chemical Engineering Journal*, 162, 2010, p. 1–20.