

MONTAJE Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE BIOFILTROS DE FLUJO ASCENDENTE Y DESCENDENTE PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN SISTEMA DE RECIRCULACION ACUÍCOLA PARA CULTIVO DE TRUCHA ARCOIRIS

ASSEMBLY AND PRELIMINARY EVALUATION OF UPFLOW AND DOWNFLOW BIOFILTERS FOR THE WASTEWATER TREATMENT FROM A RECIRCULATING AQUACULTURE SYSTEM FOR RAINBOW TROUT CULTIVATION

Iván A. Sánchez-Ortiz¹, Roberto García-Criollo², Camilo L. Guerrero-Romero²

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como finalidad el montaje y evaluación preliminar del comportamiento de biofiltros de lecho fijo con flujo ascendente y descendente para diferentes tiempos de retención hidráulica en cuanto a algunos parámetros de calidad del agua importantes para el cultivo de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación acuícola (SRA). El SRA constó básicamente de tanques plásticos de cultivo circulares, un sedimentador convencional, biofiltros de flujo ascendente y descendente con grava y gravilla como medios de soporte y un sistema de tuberías a presión a descarga libre para distribución y colecta del agua, localizados en el laboratorio de sistemas de recirculación del Programa de Ingeniería en Producción Acuícola de la Universidad de Nariño. El volumen utilizado en cada tanque fue de 220 L y la biomasa inicial del proyecto fue de 1,08 kg/m³. Se realizó la evaluación por un periodo de 16 días, durante los cuales se midieron diariamente el pH, oxígeno disuelto, temperatura y CO₂; cada cuatro días se midió turbiedad, sólidos suspendidos, nitritos, nitratos y fósforo y una vez por semana nitrógeno amoniacal total. Los parámetros se midieron en el afluente bruto y los efluentes de cada uno de los biofiltros evaluados. Los datos analizados sugirieron ciertas diferencias entre el comportamiento de los biofiltros en cuanto a las eficiencias de remoción de algunos parámetros y en cuanto a los valores de ciertos parámetros de calidad del agua medidos diariamente.

Palabras clave: Acuicultura, trucha arco iris, sistemas de recirculación, biofiltración.

ABSTRACT

The main objective of this study was the assembly and the preliminary evaluation of the behavior of biofilters of fixed carrier with up and down flow for different hydraulic detention times for some water quality parameters, which are important for the cultivation of rainbow trout in a recirculating aquaculture system (RAS). The RAS consisted on plastic and circular tanks of cultivation, a conventional settling basin, up flow

¹Ingeniero Civil, Especialista y M.Sc. Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Pecuarias, Departamento de Recursos Hidrobiológicos

²Ingeniero en Producción Acuícola. Universidad de Nariño, Departamento de Recursos Hidrobiológicos - Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería. E-mail: iaso@udenar.edu.co.

and down flow biofilters with gravel and grit, used as carrier, and a system of prepressure pipes with free flow, which were used for water collecting and distribution. These were located at the laboratory of recirculation systems of the Aquaculture Production Engineering Program of University de Nariño, Colombia. The volume of each tank was 220 L and the starting stocking density of the project was 1.08 kg/m³. The evaluation was done for a 16 days period. The pH, the dissolved oxygen, the temperature and the CO₂ were measured daily; the turbidity, the suspended solids, the nitrite, the nitrates and the total phosphorous values were measured every four days, and the total ammonia nitrogen concentrations were measured once a week. The parameters were measured on the raw wastewater and in the evaluated biofilters effluents. The analyzed data suggested certain differences between the biofilter behaviors in relation to some parameters removal efficiencies and in relation to the values of the water quality parameters which were measured daily.

Key words: Aquaculture, rainbow trout, recirculating systems, biofiltration.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales de la producción acuícola cobra cada vez mayor importancia debido principalmente a la alta presencia de materia orgánica, sólida y nutriente en los efluentes de la producción intensiva y súper intensiva. Al respecto, uno de los retos consiste en aplicar tecnologías favorables con el medio ambiente y de fácil acceso desde el punto de vista económico, por tal razón en acuicultura la reutilización parcial o total de las aguas por medio de recirculación es cada vez más necesaria.

Aspectos tales como la necesidad de garantizar condiciones de bioseguridad, optimización del uso del alimento proporcionado a las especies hidrobiológicas y conservación de la calidad del agua de cultivo han justificado el desarrollo de cultivos intensivos y bajo condiciones controladas; sin embargo, el crecimiento de la acuicultura ha acarreado el incremento de los impactos ambientales producidos por esta actividad productiva (Crab *et al.*, 2007).

La eutrofización es el efecto que produce la entrada de nitrógeno y fósforo a los lagos y embalses por causas antrópicas, justamente la descarga de efluentes de la producción acuícola en los ambientes acuáticos presenta altas cargas de nutrientes y compuestos orgánicos e inorgánicos tales como nitrógeno total, amonio, fósforo y materia orgánica (Piedrahita, 2003).

Con base en lo afirmado por Metcalf & Eddy (1991), los contaminantes presentes en las aguas residuales pueden eliminarse por medios físicos, químicos y biológicos. En las operaciones físicas unitarias predomina la aplicación de fuerzas físicas; incluye operaciones como desbaste, mezclado, floculación, y filtración. En los procesos químicos unitarios el tratamiento

es provocado por adición de productos químicos, entre sus opciones se encuentran la precipitación, transferencia de gases, adsorción y desinfección. En los procesos biológicos unitarios se eliminan los contaminantes por actividad biológica, se utiliza para eliminar sustancias orgánicas biodegradables.

En acuicultura se han utilizado diversas alternativas de tratamiento de los efluentes por mecanismos físicos; químicos; biológicos; o la combinación de los anteriores, bien sea para su descarte final siguiendo los límites establecidos por las directrices ambientales; o para su reuso, mediante sistemas de recirculación para acuicultura (SRA), los cuales consisten en un conjunto integrado de dispositivos que permiten el reciclaje del agua, permitiendo una utilización más eficiente e independiente de las condiciones climáticas y una reducción del volumen de efluentes en sistemas de producción acuícola.

En cuanto a los niveles de tratamiento de las aguas residuales, muchos autores coinciden en que se presentan básicamente los siguientes tipos: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento avanzado.

En acuicultura desarrollada bajo SRAs, el tratamiento de las aguas residuales se inicia desde la propia unidad de cultivo, pues cobra importancia la eficiente remoción de sólidos desde los tanques, para ello diversos autores han investigado las configuraciones geométricas e hidrodinámicas más recomendables para facilitar dicha remoción; por ejemplo, Timmons *et al.* (2002), recomiendan para el diseño de tanques circulares relaciones diámetro/profundidad entre 5:1 y 10:1.

En el tratamiento primario se pretende fundamentalmente la remoción de sólidos sedimentables y aquella la fracción particulada de la materia orgánica (MO) que es susceptible de remoción por procesos físicos. El tratamiento secundario busca principalmente la remoción de la materia orgánica disuelta o finamente particulada y se basa en la mayoría de los casos en las opciones de tratamiento biológico. El tratamiento avanzado o terciario hace énfasis principalmente en la remoción adicional de MO, la remoción de nutrientes, de microorganismos patógenos o de sustancia de difícil remoción por tratamientos convencionales. La Figura 1, adaptada de Crites & Tchobanoglous (2000) esquematiza los tamaños correspondientes a diversos tipos de sólidos presentes en las aguas residuales así como algunos mecanismos utilizados para su remoción.

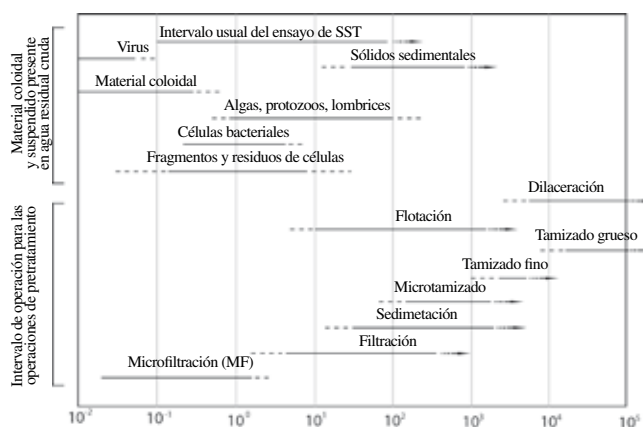


Figura 1. Tamaños de partículas típicas presentes en las aguas residuales y mecanismos de remoción. (Crites & Tchobanoglous, 2000)

Los sólidos dentro de las unidades de cultivo están conformados por excretas de los peces, residuos finos del alimento y alimento no consumido, según Timmons *et al.* (2002), la producción de sólidos sedimentables en una SRA se encuentra en función de la cantidad de alimento suministrado, generalmente oscilando entre un 20% y 40%.

Los tratamientos secundarios consisten en la depuración de la concentración de MO en el agua mediante una biocenosis, una comunidad de organismos vivos que se alimentan de la contaminación del agua, la cual se mantiene en un lugar adecuado donde se garantiza su desarrollo óptimo.

En los tratamientos biológicos se presenta la oxidación biológica, que es la conversión bacteriana de

elementos de su forma orgánica a su forma inorgánica altamente oxidable. En la oxidación aerobia el oxígeno es donante, mientras que en la oxidación anaerobia nitritos, sulfatos y CO_2 son donantes y producen finalmente metano, H_2S y agua.

Según Metcalf & Eddy (1991), los reactores son tanques donde se realizan los procesos biológicos o químicos del tratamiento de las aguas, éstos se pueden clasificar por la forma en que circula el agua como: reactores de mezcla completa, de flujo pistón, de flujo arbitrario y de flujo discontinuo.

Se necesita oxígeno para la respiración de los microorganismos que se encargan de la descomposición aeróbica de la materia orgánica. El medio acuático es inherente y críticamente sensitivo respecto a las necesidades de oxígeno de los organismos que lo pueblan, porque la cantidad de oxígeno en el agua es solamente de 0,8% en volumen, a las temperaturas normales (50°F o 10°C) en comparación con 21% en la atmósfera.

Los lechos bacterianos son una forma del tratamiento de las AR por medio de procesos aerobios. El funcionamiento de los lechos consiste en hacer caer en forma de lluvia el agua a tratar (previamente decantada), sobre una masa de material de gran superficie específica (soporte de los microorganismos depuradores). En el momento en que a los microorganismos no les llegue suficiente materia orgánica entran en fase endógena, así el agua residual arrastra la película de microorganismos y comienza el crecimiento de otra nueva, la película nueva es llamada mucilago (bacterias aerobias y anaerobias, hongos, algas y protozoos).

Los lechos pueden conformarse con relleno tradicional de baja carga, en ellos el agua hace un solo paso a través del filtro con cargas volumétricas bajas permitiendo una eliminación de la DBO alrededor del 90%. Otra opción consiste en los lechos con relleno tradicional de alta carga, los cuales necesitan generalmente una recirculación que puede llegar a 400% cuyo fin es realizar auto limpieza del lecho bacteriano y diluir la DBO de las aguas residuales. Una alternativa adicional son los lechos de rellenos plásticos, entre cuyas características se cuentan que son autorportantes, con una superficie específica elevada, índice de vacíos elevado, resistencia mecánica, estabilidad química y gran durabilidad.

Para un buen mantenimiento del filtro percolador se hace necesaria la distribución uniforme de las AR sobre la superficie y una buena ventilación. En caso de obstrucciones se suele: reforzar la fuerza de empuje aumentando la carga del filtro, efectuar una recirculación intensa o disminuir la velocidad de la distribución, enjuagar la superficie del filtro con un flujo de alta presión, aflojar el material de relleno en la superficie, si es necesario se puede sacar todo el material de relleno del filtro lavarse y volverse a colocar.

En este proyecto, que formó parte de las actividades realizadas con los Estudiantes de IX Semestre del Programa Ingeniería en Producción Acuícola – núcleo problémico profundización en diseño y

construcción de instalaciones acuícolas, se realizó el montaje y evaluación preliminar durante 16 días del comportamiento de biofiltros de lecho fijo y flujo ascendente y descendente para diferentes tiempos de retención hidráulica en relación a algunos parámetros de calidad del agua importantes para el cultivo de trucha arco iris en un sistema de recirculación acuícola. Al afluente bruto y los efluentes de cada uno de los biofiltros se tomaron muestras del agua para medir diariamente los valores de pH, oxígeno disuelto (OD), temperatura y CO₂; cada cuatro días se midió turbiedad, sólidos suspendidos (SS), nitritos, nitratos y fósforo y una vez por semana nitrógeno amoniacal total (NAT).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El proyecto se realizó en el laboratorio de sistemas de recirculación del Programa de Ingeniería en Producción Acuícola de la Universidad de Nariño – Sede Torobajo, localizado a una altitud aproximada de 2.540 msnm, Latitud Norte 01°09' y Longitud Oeste 77°08', según el Instituto de Estudios Medioambientales y Meteorológicos IDEAM - Pasto, Colombia (2006).

Materiales y equipos

En el laboratorio en mención se dispone de un SRA con 12 tanques de 250 litros (L), cada uno de ellos posee un sistema de entrada de agua proveniente de una red ramificada de diámetro tres pulgadas y derivaciones para el sistema de distribución de una pulgada. El sistema también posee una red mallada para distribución de aire por tubería de dos pulgadas y derivaciones en tubería de ½ pulgadas. Los 12 tanques estuvieron dotados de sistemas de drenaje por medio de rebalse lateral.

En el SRA los efluentes de los tanques se colectan mediante tubería sanitaria de cuatro pulgadas que los transporta hacia un sedimentador convencional de sección rectangular y en la zona de salida conecta una tubería de succión de una motobomba centrífuga de 2,0 HP, elevando el efluente del sedimentador

hacia un reservorio elevado a 9,9 metros respecto al nivel del suelo, posteriormente pasó por gravedad hacia la caja de nivel constante y de ésta hacia los biofiltros de flujo ascendente o descendente cuyos efluentes ingresaron a un tanque reservorio de 1,0 m³ y posteriormente se distribuyó a la red ramificada que llevó el flujo de agua tratada de nuevo hacia los 12 tanques. El suministro de aire se realizó por medio de un aireador tipo Blower de 2,5 HP, del cual se derivó por medio de red ramificada en tubería de presión hacia cada unidad de cultivo. Un perfil de la disposición del sistema de recirculación y algunos de sus componentes se puede apreciar en la Figura 2.

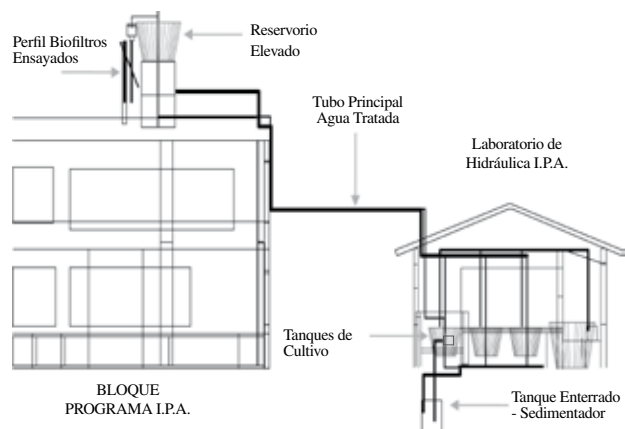


Figura 2. Vista de perfil de algunos elementos de SRA y su ubicación respecto al Bloque del Programa Ingeniería en Producción Acuícola.

Para el experimento se realizó la limpieza y adecuación de los tanques de cultivo y se homogenizó el nivel de agua de los tanques, utilizando para ello agua declorinada.

Se realizó el montaje de una caja de nivel constante en lámina de acrílico, la función principal de dicha caja fue la de mantener un flujo homogéneo hacia los biofiltros por medio de una carga hidráulica constante, las medidas de la caja de nivel fueron: altura 25 cm; largo: 51 cm; ancho: 20 cm; altura del vertedero: 20 cm. Una vez cortados y pulidos los pedazos de lámina se limpiaron con limpiador para tubos de PVC con el fin de remover residuos y aceites que dificulten su pegado, para ésta última labor se utilizó cloruro de metilo, una vez armada la caja ésta se reforzó con silicona sobre las paredes de contacto. En la lámina del fondo se practicó perforaciones para localizar las mangueras de salida del agua hacia cada uno de los ocho biofiltros, posteriormente se pegó todos los accesorios (insertos de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgadas) a la caja de nivel constante, utilizando para ello cinte-solda y fueron reforzados con silicona. Para la entrada y salida del agua a la caja de nivel constante se utilizó tubería PVC de diámetro $1\frac{1}{2}$ pulgadas, y la del vertedero de excesos fue reducida a una pulgada.

Para el montaje de los biofiltros se utilizaron tubería sanitaria PVC de cuatro pulgadas, obteniéndose cuatro segmentos de tubo de 1,5 m de altura total, los biofiltros se acondicionaron con tapones en el extremo inferior que fueron sellados con silicona, en los tapones se colocaron insertos de reducción a $\frac{1}{2}$ pulgada.

El medio granular con el que fueron rellenos los filtros fue grava pasante del tamiz $1\frac{1}{2}$ pulgada y retenido por una pulgada (10 centímetros) y gravilla pasante del tamiz una pulgada y retenido por el tamiz de $\frac{3}{4}$ pulgadas. Para instalar la salida de los biofiltros de flujo ascendente en la parte superior del tubo a una distancia de 10 cm del borde terminal se incrustaron lateralmente insertos PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada para adecuar la salida con manguera flexible del mismo diámetro. En la parte inferior interna de los tubos de todos los biofiltros se colocaron placas perforadas de acrílico circulares de 10,17 cm de diámetro, en las que se practicaron perforaciones con broca de 3 mm de forma homogénea, el propósito de las placas fue el de brindar soporte a los medios granulares de las unidades de biofiltración. Un esquema de la disposición de los ocho biofiltros evaluados (cuatro de flujo ascendente y cuatro de flujo descendente) se presenta

en la Figura 3, en la que la nomenclatura “RH” hace referencia al tiempo de retención hidráulica para el que se evaluó cada biofiltro; el número que le sigue se refiere al número de minutos que le correspondió a los tiempos de retención evaluados, que fueron de 5, 10, 15 y 20 minutos; finalmente, la letra A ó D correspondieron al tipo de flujo que se proporcionó a los biofiltros, donde “A” correspondió al flujo ascendente y “D” al flujo descendente.

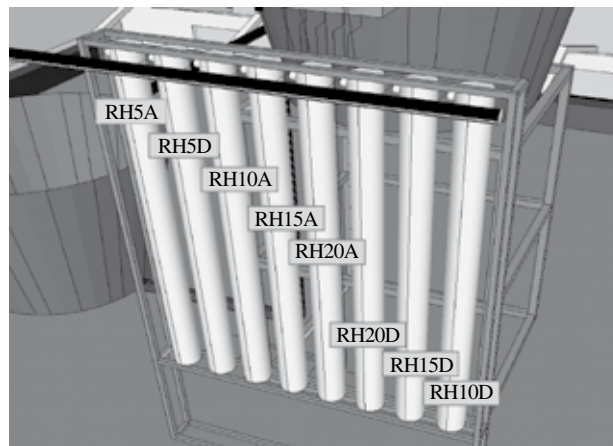


Figura 3. Disposición de los ocho biofiltros evaluados

Para la fabricación del soporte metálico de la estructura se cortaron las varillas de hierro de $\frac{1}{2}$ pulgada y los ángulos de una pulgada por una pulgada según las medidas establecidas en el diseño, posteriormente se soldaron las partes en ángulo y se unieron las varillas para darle rigidez a la estructura, las uniones se realizaron mediante el uso de soldadura eléctrica. Se lijó totalmente la estructura y se pintó con anticorrosivo negro. Por medio de chasos y abertura de orificios con taladro en la estructura de los biofiltros y la caja de nivel constante, se fijó a la losa de concreto de la terraza del Programa I.P.A.

Material biológico.

En el experimento se utilizaron 150 ejemplares de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) procedentes de la estación de jaulas flotantes “Inti Yaco” de la Universidad de Nariño localizada en el Lago Guamués, con un peso promedio inicial de 2 g. La densidad de siembra que se realizó en dos unidades de cultivo correspondió a 10 animales/tanque equivalente a $0,34\text{ kg/m}^3$, a los animales se les proporcionó concentrado comercial con 40% de proteína. Para la aclimatación de los peces que llegaron al laboratorio se colocó las bolsas en un tanque auxiliar de $1,0\text{ m}^3$ lleno con agua previamente desclorada,

las bolsas de dejaron en flotación libre durante un periodo de aproximadamente 20 minutos para homogeneizar la temperatura del agua, se abrieron las bolsas, se hizo recambios de volumen para homogeneizar pH y se dejaron salir los animales de manera progresiva.

Acondicionamiento de peces para el transporte

Según Vollman (1978), para el transporte de peces a largas distancias sin sufrir pérdidas, hay que tomar las siguientes medidas: ante todo los peces deben reponerse por completo del estrés ocasionado por la pesca, las branquias deben estar completamente limpias y el intestino evacuado, antes de comenzar el transporte, los animales deben disponerse de antemano en diferentes depósitos, clasificados según su edad pues de lo contrario podrían ser golpeados por coletazos. A este respecto Gonzales y Heredia (1989) establecieron que los peces transportados deben guardar ayuno 1-2 días antes y durante el transporte, pues la presencia de alimento en el tubo digestivo de los animales transportados aumenta el consumo de oxígeno disuelto, debido a los procesos de digestión, asimilación y excreción, adicionalmente recomendaron que los peces deben ser aclimatados al tipo de agua donde serán transportados.

Para el transporte de peces y alevines suele recomendarse el uso de sacos de plástico con grosor de pared de 0,08 a 0,5 mm, con longitud de 0,80 a 1,20 m, y diámetro de 0,40 a 0,50 m. En la medida de lo posible el fondo debe ser redondo, de manera que no se produzcan esquinas en las puedan comprimirse los peces. En particular para la fase de alevinaje Amaya y Anzola (1988) proponen realizar el transporte en bolsas plásticas de fondo circular o cuadrado de un calibre de 2, 5 a 3; así mismo respecto Rubin (1985) sostiene que para el transporte de alevinos basta con una bolsa de polietileno semitransparente y medianamente grueso de 0,70 m de ancho por 1,0 m de alto, para efectuar sin bajas cualquier viaje de 6 a 8 horas.

Recepción y adaptación de los animales

Una vez en el laboratorio se procedió a someter los dedinos a un tratamiento con sal marina para desinfección a una concentración del 1%, seguido de la aclimatación y traspaso a las unidades de cultivo, introduciendo los 240 dedinos, 20 por tanque, con un peso promedio de 11,5 gramos. Después de dos días,

se inició la alimentación de los animales a voluntad; las mortalidades que se presentaron durante el periodo de aclimatación y adaptación de los dedinos de trucha fueron sustituidas por otros animales. Ya en condiciones normales de funcionamiento del sistema con recirculación y aireación se realizó muestreos de peces para verificar el peso y longitud con el fin de determinar la cantidad de alimento a suministrar para un periodo de 25 días. Después de dos semanas de adaptación se estableció en función de la biomasa un porcentaje de alimentación del 1%, con lo cual la cantidad de concentrado a suministrar fue de 10,88 gramos por unidad de cultivo.

Partida del experimento

Una vez instalados los equipos y elementos necesarios, se inició llenando de agua en las unidades de cultivo y el sedimentador, luego se puso en funcionamiento la motobomba para llenar el tanque elevado o reservorio, la caja de nivel constante y los biofiltros de flujo ascendente o descendente.

Se dispusieron piedras difusoras para suministro de aire en la base de cada una de las unidades de cultivo; el aire provino desde el blower principal del SRA. Se verificó y ajustó los caudales de ingreso a las unidades de cultivo, que para el caso fueron de 0,05 litros por segundo.

Monitoreo de los parámetros de calidad del agua

Durante el periodo de evaluación del desempeño de los biofiltros se realizaron las mediciones de los parámetros de calidad del agua de acuerdo a la siguiente frecuencia: una vez por día se registraron los valores de pH, OD, temperatura y CO₂; cada cuatro días se midió turbiedad, sólidos suspendidos, nitritos, nitratos y fósforo y una vez por semana nitrógeno amoniacal total.

Los puntos de muestreo para efectuar los análisis de laboratorio o para registro directo de los parámetros susceptibles de ser medidos *in situ* -tales como el oxígeno disuelto y la temperatura, fueron el compartimiento central de la caja de nivel constante (correspondiente al afluente bruto, desde el cual se distribuyó el líquido afluente a los biofiltros) y a la salida de cada uno de los biofiltros (correspondientes al efluente tratado). Los análisis realizados para cada

uno de los parámetros de calidad del agua anteriormente citados se basaron en los métodos definidos por APHA, AWWA & WPCF (1992).

Debido a que el experimento demandó un importante tiempo en las labores de construcción, instalación y ejecución de pruebas hidráulicas del sistema de tratamiento de las aguas por medio de los biofil-

tros, se optó por efectuar una evaluación preliminar del comportamiento de los parámetros de calidad del agua durante un periodo de 16 días, por ello el número de datos obtenidos fue pequeño, especialmente para aquellos parámetros que representan eficiencia de remoción y se optó por reportar el promedio de los valores medidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en los valores medidos se obtuvieron los siguientes resultados promedio para los parámetros monitoreados:

Temperatura

Durante el experimento la temperatura del líquido osciló entre 14 y 17,9°C, el promedio calculado para el afluente bruto (AB) fue de 16,2°C y los valores medios calculados para los efluentes de los reactores de flujo ascendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 16,3, 15,8, 16,3 y 16,0°C respectivamente; los valores medios en los efluentes de los reactores de flujo descendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 16,3, 16,1, 16,3 y 16,2°C respectivamente. Las temperaturas registradas se encuentran dentro de los rangos de valores para el cultivo de la trucha según lo recomendado por Timmons *et al.* (2002). Según Phillips (s.f.), la trucha en condiciones naturales puede vivir en aguas con temperaturas de entre 0° y 25° C; sin embargo, términos de cría artificial de trucha, los límites de la temperatura del agua en los cuales su crecimiento y desarrollo son los adecuados es entre los 9 y 17°C.

Oxígeno disuelto

A lo largo del periodo de evaluación del sistema de tratamiento del SRA se registraron valores de OD que variaron entre 3,3 y 8,2 mg/L, presentando como era de esperarse los máximos valores en el AB, cuyo valor promedio fue de 6,2 mg/L. Los valores medios calculados para los efluentes de los reactores de flujo ascendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 5, 8, 5, 6, 5, 6 y 5,9 mg/L respectivamente; los valores medios en los efluentes de los reactores de flujo descendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 6,0, 5,7, 5,9 y 5,9 mg/L respectivamente. Los valores anteriormente

mencionados indican que hubo consumo de oxígeno dentro de los biofiltros como parte de los procesos biológicos de degradación de la materia orgánica y fundamentalmente de transformación del amonio en nitritos y nitratos por medio de la nitrificación. Los promedios calculados se encontraron dentro de los valores sugeridos por Losordo *et al.* (1999A).

pH

Los valores de pH medidos oscilaron entre 6,2 y 7,8, donde el AB reportó un valor medio igual a la neutralidad. Los promedios calculados para los efluentes de los reactores de flujo ascendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 6,9 en todos los casos y los valores medios en los efluentes de los reactores de flujo descendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 6,8, 6,8, 6,9 y 6,9 respectivamente. Como se puede apreciar, los valores medios estuvieron muy cerca del valor de pH neutro, lo que favorece el cultivo de las especies hidrobiológicas y en el caso particular de la trucha.

CO₂

Durante el experimento las concentraciones de CO₂ en el agua oscilaron entre 3,5 y 52,8°C, el promedio calculado para el AB fue de 13,9 mg/L y los valores medios calculados para los efluentes de los reactores de flujo ascendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 12,7, 15,1, 11,8 y 11,3 mg/L respectivamente; los valores medios en los efluentes de los reactores de flujo descendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 11,8, 12,0, 12,6 y 11,1 mg/L respectivamente. La acumulación de este gas es uno de los aspectos que justifican la realización de sustitución parcial del orden de 5 al 10% del volumen de agua del sistema con agua fresca para evitar que alcance valores que afecten la salud y crecimiento óptimo de las especies a cultivar.

Turbiedad

La turbiedad medida en el afluente bruto y los efluentes de los biofiltros varió entre 0,57 y 3,77 UT. La Figura 4 ilustra los valores promedio de turbiedad registrados en las muestras del líquido obtenidas en los puntos de muestreo anteriormente citados.

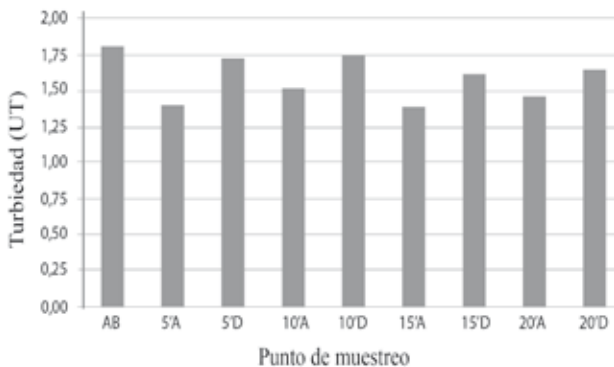


Figura 4. Valores medios de turbiedad calculados para el AB y los efluentes de los 8 biofiltros.

Los valores en general evidenciaron que hubo remoción de la turbiedad en las unidades de biofiltración; sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 4 tales resultados sugieren que hubo mayor remoción de este parámetro en los biofiltros de flujo ascendente

Sólidos suspendidos

Los valores de SS medidos oscilaron entre 0 y 149 mg/L, donde el AB tuvo un valor medio de 42,7 mg/L. Los promedios calculados para los efluentes de los reactores de flujo ascendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 2,0, 5,5, 1,8 y 2,0 mg/L respectivamente y los valores medios en los efluentes de los reactores de flujo descendente con TRH de 5, 10, 15 y 20 min fueron de 30,3, 24,8, 18,3 y 8,7 mg/L respectivamente. Tales valores muestran que los biofiltros realizaron remoción de SS y sugieren que los biofiltros de flujo ascendente presentaron un mejor desempeño, de manera similar a lo observado para la turbiedad. Tal situación se pudo deber a que para el flujo ascendente se haya presentado una distribución más homogénea del flujo, lo que ayuda a que haya mayor posibilidad de trabajo de todas las partículas que constituyen el medio granular en comparación a los biofiltros de flujo descendente.

Nitrógeno amoniacal total, nitritos y nitratos

Durante el experimento las concentraciones de nitritos en el agua oscilaron entre 0,0 y 0,385 mg/L, con los menores valores observados en el AB, cuyo valor promedio fue de 0,077 mg/L. Los valores medios calculados en los efluentes de los biofiltros y en el AB se presentan en la Figura 5.

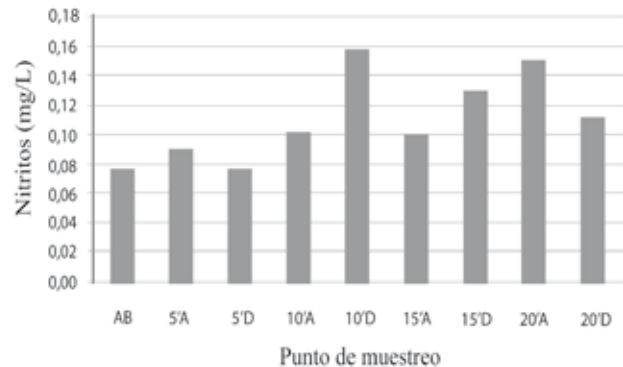


Figura 5. Concentraciones medias de nitritos calculadas para el AB y los efluentes de los biofiltros.

Los resultados muestran que hubo un incremento en las concentraciones de nitritos en los efluentes de los biofiltros con respecto a los valores registrados a su entrada (AB).

A partir de las muestras tomadas tanto en la caja de nivel constante como a la salida de los biofiltros de flujo ascendente y descendente se siguió los protocolos para determinación de las concentraciones de nitrógeno amoniacal total; sin embargo, los valores no pudieron ser leídos en el espectrofotómetro ya que se encontraron por debajo del rango de detección del aparato.

Por su parte, las concentraciones de nitratos medidas variaron entre 0,8 y 14,9 mg/L, nuevamente registrando los menores valores en el AB, que tuvo un valor promedio calculado de 4,08 mg/L. La Figura 6 ilustra gráficamente los valores promedio calculados para los efluentes de los biofiltros y su AB.

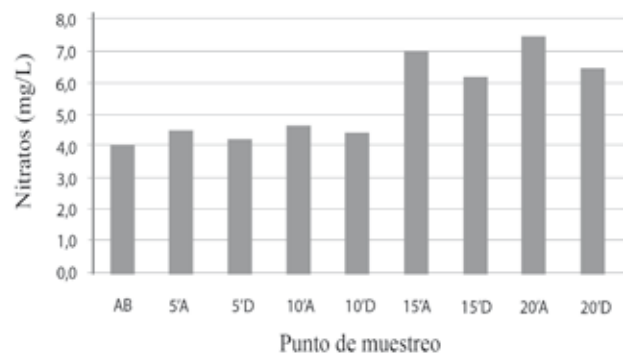


Figura 6. Concentraciones medias de nitratos en el AB y los efluentes de los biofiltros.

Los mayores valores tanto de nitritos como de nitratos registrados en los efluentes de los biofiltros sugieren que al interior de tales unidades de tratamiento del agua se pudo desarrollar el proceso de la nitrificación, donde por medio de procesos aerobios se transforma el amonio en nitritos y posteriormente en nitratos. Tal situación puede ser apoyada por los menores valores de OD registrados a la salida de los biofiltros en comparación con los medidos en el AB, lo que efectivamente indica que hubo consumo de OD por parte de los microorganismos que se desarrollaron en las unidades de biofiltración.

Fósforo total

Las concentraciones de FT medidas oscilaron entre 0,40 y 6,24 mg/L, donde el AB presentó los mayores valores con una concentración media de 2,57 mg/L. Los promedios calculados para los efluentes de los reactores y el AB se presentan en la Figura 7.

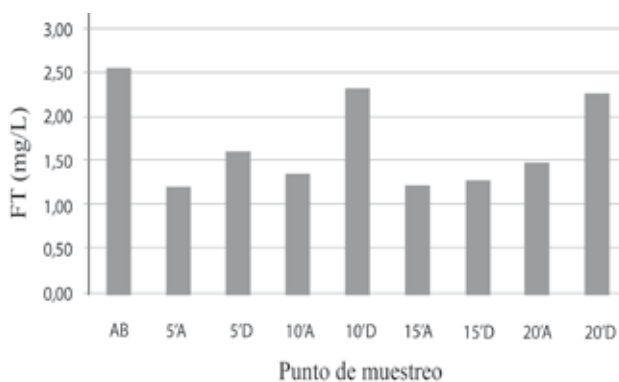


Figura 7. Concentraciones medias de FT en el AB y los efluentes de los 8 biofiltros.

Los valores calculados muestran que hubo remoción de fósforo por parte de los biofiltros y sugieren que en ese sentido hubo un mejor desempeño por parte de los biofiltros de flujo ascendente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera especial al Departamento de Recursos Hidrobiológicos y a la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño

por el apoyo prestado en la realización de este proyecto de investigación formativa.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los biofiltros ensayados desarrollaron el proceso de nitrificación pues en ellos hubo consumo de oxígeno y en sus efluentes las concentraciones de nitritos y nitratos fueron mayores que en el afluente.

Los biofiltros realizaron remoción de sólidos suspendidos y de turbiedad para todos los tiempos de retención hidráulica evaluados y para los dos tipos de flujo ensayados.

Los resultados obtenidos sugirieron que los biofiltros de flujo ascendente presentaron mejor desempeño en cuanto a la remoción de parámetros como SS, turbiedad y fósforo; adicionalmente, pudieron desarrollar de manera más eficiente el proceso de nitrificación.

Se recomienda realizar estudios más extensos que permitan comprender mejor el desempeño de los biofiltros y establecer si existen diferencias entre el comportamiento de los biofiltros según los tiempos de retención hidráulica y el tipo de flujo con el respectivo soporte estadístico.

Es recomendable mejorar el sistema de tratamiento primario dentro del SRA para evitar alteraciones en la determinación de parámetros fisicoquímicos por presencia de sólidos que no hayan sido oportunamente removidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaya, R. y Anzola, E. 1988. Generalidades sobre el cultivo de trucha. Bucaramanga: INDERENA. 61 p.

APHA-AWWA-WPCF. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid España: Ediciones Días de Santos.

- Crab, R.; Avnimelech, Y.; Defoirdt, T.; Bossier, P. and Verstraeteet, W. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*. 270: 1-14.
- Crites, R. y Tchobanoglous, G. 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblacionales. McGraw Hill. 776 p.
- González, J. A. y Heredia, B. 1989. Cultivo de la cachama (*Colossoma macropomum*). Macaray: Fondo Nacional de investigaciones Agropecuarias del Estado Guárico FONAIAP. 124 p.
- Losordo, M.; Racocy, J. and Masser, M. 1999. Recirculating aquaculture tank production systems: A review of components options. USA: Southern Regional Aquaculture Center (SRAC). 12 p.
- Metcalf and Eddy. 1991. Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse. 3th ed. Metcalf & Eddy Inc. 1334 p.
- Phillips, V. s.f. Manual básico para el cultivo de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) disponible en internet: <http://www.uwsp.edu/cnr/gem/MANUAL%20BASICO%20PARA%20EL%20CULTIVO%20DE%20TRUCHA%20ARCO%20IRIS-1.pdf>.
- Piedrahita, R.H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*. 226: 35–44.
- Rubin, R. 1982. La piscifactoría: cría industrial de los peces de agua dulce. 4a ed. México: Continental. 191 p.
- Timmons, M. B.; Ebeling, J. M.; Summerfelt, S. T. y Vinci, B. J. 2002. Sistemas de recirculación para la acuicultura. 2a ed. Santiago: Fundación Chile. 747 p.
- Vollmann-Schipper, F. 1978. Transporte de peces vivos. Zaragoza: Acribia. 99 p.