

Uso de geotextil no tejido (GNT) como medio de soporte en un biofiltro percolador para sistemas de recirculación acuícola (SRA)*

Giovany Alexander Jojoa-Cabrera^a ■ José Luis Hoyos-Concha^b ■ Javier Ernesto Fernández-Mera^c

Resumen: Contexto: En acuicultura, los sistemas de recirculación acuícola (SRA) son una tecnología emergente que en los últimos años ha logrado gran aceptación mundial. En los SRA, los sistemas de biofiltración desempeñan un papel de alta importancia, porque permiten mantener la calidad del agua con niveles de parámetros químicos elevados para la producción de la especie piscícola. **Metodología:** Este estudio evaluó el diseño de un biofiltro percolador con base en geotextil no tejido (GNT) y la capacidad para mantener los componentes nitrogenados en los niveles óptimos en un SRA para el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis spp.*). El proceso se desarrolló en un periodo de 45 días utilizando el diseño factorial estadístico de medidas repetidas en el tiempo con componente intersujeto de dos factores de carga hidráulica y dos niveles de grosor de material, en tres réplicas para un total de doce unidades experimentales con $p > 95 \%$. **Resultados:** La eficiencia en términos de concentración de componentes nitrogenados en el biofiltro fue de $T2 \text{ NH}_4^+ = 0,49 \pm 0,15 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_2^- = 0,014 \pm 0,040 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_3^- = 76,7 \pm 20,8 \text{ mg/L}$; $T1 \text{ NH}_4^+ = 0,45 \pm 0,11 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_3^- = 63,9 \pm 18,1 \text{ mg/L}$; $T4 \text{ NH}_4^+ = 0,46 \pm 0,13 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_3^- = 61,7 \pm 17,2 \text{ mg/L}$; $T3 \text{ NH}_4^+ = 0,43 \pm 0,11 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_3^- = 67,8 \pm 18,3 \text{ mg/L}$. **Conclusiones:** T3 tuvo el mejor comportamiento en concentración de componentes nitrogenados, adecuados para la especie piscícola en producción, demostrando la viabilidad del uso de GNT como medio de soporte en biofiltros para SRA.

Palabras claves: acuicultura; biofiltración; biofiltro percolador; recirculación acuícola; geotextil no tejido

* Artículo de investigación.

a Especialista en Gerencia de proyectos. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

Correo electrónico: gjojoa@unicauca.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6457-8580>

b Doctor en Ingeniería. Profesor Titular en la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

Correo electrónico: jlhoyos@unicauca.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-9734>

c Doctor en Ingeniería. Profesor Titular en la Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

Correo electrónico: jefernandez@unicauca.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-9069>

Recibido: 3/11/2024 **Aceptado:** 30/08/2025 **Disponible en línea:** 22/10/2025

Cómo citar: G. A. Joja Cabrera, J. L. Hoyos-Concha, y J. E. Fernández-Mera, «Uso de geotextil no tejido (GNT) como medio de soporte en un biofiltro percolador para sistemas de recirculación acuícola (SRA)», Cien.Ing.Neogranadina, vol. 35, n.º 2, pp. 105–120, oct. 2025.

Use of Nonwoven Geotextile (NWG) as a Support Medium in a Trickling Biofilter for Recirculating Aquaculture Systems (RAS)

Abstract: Context: Recirculating Aquaculture System, RAS, is an emergent technology that has gained acceptance worldwide in the aquaculture field. Within it's system, biofilters play a highly important role allowing to sustain the water quality and required chemical parameters for a given specie in fish farming production. **Methodology:** Present study evaluated the design of a trickling biofilter capacity based of non-waved geotextile (NWG) and its capacity to maintain the optimal nitrogenous levels for Tilapia Roja (*Oreochromis spp*) in a RAS. A repeated measures of factorial design with an inter-subject factor over a period of 45 days was followed regarding: two hydraulic Load and two material thickness on 3 experiment units for a total of 12 trials ($p > 95\%$). **Results:** Biofilter concentration of nitrogenous components for each trial were: T1: $\text{NH}_4^+ = 0,45 \pm 0,11$ mg/L, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048$ mg/L, $\text{NO}_3^- = 63,9 \pm 18,1$ mg/L. Treatment T2: $\text{NH}_4^+ = 0,49 \pm 0,15$ mg/L, $\text{NO}_2^- = 0,014 \pm 0,040$ mg/L, $\text{NO}_3^- = 76,7 \pm 20,8$ mg/L. Unit T3: $0,43 \pm 0,11$ mg/L for NH_4^+ ; $0,021 \pm 0,048$ mg/L for NO_2^- and $67,8 \pm 18,3$ mg/L for NO_3^- . Finally, T4: $\text{NH}_4^+ = 0,46 \pm 0,13$ mg/L, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048$ mg/L and $\text{NO}_3^- = 61,7 \pm 17,2$ mg/L; **Conclusions:** After data analysis, T3 showed the best behavior regarding concentration of the nitrogenous components. This reveals the viability and positive results of using NWG as a biofilter support when included for fish farming.

Keywords: Aquaculture; Biofiltration; Trickling Biofilter; Aquaculture Recirculation; Non-waved geotextile}

Uso de geotêxtil não tecido (GNT) como meio de suporte em um biofiltro percolador para sistemas de recirculação aquícola (SRA)

Resumo: Contexto: Na aquicultura, os sistemas de recirculação aquícola (SRA) são uma tecnologia emergente que, nos últimos anos, tem alcançado grande aceitação mundial. Nos SRA, os sistemas de biofiltração desempenham um papel de alta importância porque permitem manter a qualidade da água com níveis adequados de parâmetros químicos para a produção das espécies de peixes cultivadas. **Metodologia:** Este estudo avaliou o projeto de um biofiltro percolador baseado em geotêxtil não tecido (GNT) e sua capacidade de manter os compostos nitrogenados em níveis ótimos em um SRA destinado ao cultivo de tilápia vermelha (*Oreochromis spp.*). O processo foi desenvolvido ao longo de 45 dias, utilizando um delineamento fatorial estatístico de medidas repetidas no tempo, com componente intersujeitos de dois fatores de carga hidráulica e dois níveis de espessura do material, em três réplicas, totalizando doze unidades experimentais com $p > 95\%$. **Resultados:** A eficiência em termos de concentração dos compostos nitrogenados no biofiltro foi: T2 $\text{NH}_4^+ = 0,49 \pm 0,15$ mg/L, $\text{NO}_2^- = 0,014 \pm 0,040$ mg/L, $\text{NO}_3^- = 76,7 \pm 20,8$ mg/L; T1 $\text{NH}_4^+ = 0,45 \pm 0,11$ mg/L, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048$ mg/L, $\text{NO}_3^- = 63,9 \pm 18,1$ mg/L; T4 $\text{NH}_4^+ = 0,46 \pm 0,13$ mg/L, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048$ mg/L, $\text{NO}_3^- = 61,7 \pm 17,2$ mg/L; T3 $\text{NH}_4^+ = 0,43 \pm 0,11$ mg/L, $\text{NO}_2^- = 0,021 \pm 0,048$ mg/L, $\text{NO}_3^- = 67,8 \pm 18,3$ mg/L. **Conclusões:** T3 apresentou o melhor desempenho na concentração dos compostos nitrogenados, adequados para a espécie piscícola em produção, demonstrando a viabilidade do uso de GNT como meio de suporte em biofiltros para SRA.

Palavras-chave: aquicultura; biofiltração; biofiltro percolador; recirculação aquícola; geotêxtil não tecido

Introducción

Si la acuicultura produce proteína animal de alta calidad nutricional contribuirá a combatir el hambre, la malnutrición y la pobreza de las próximas generaciones. Esto es esencial para cumplir con los objetivos y metas de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. En 2024, esta práctica sobrepasó a la pesca en un 51 % [1].

La crianza controlada de organismos acuáticos hace uso del agua que sirve como hábitat de las especies en producción y que al término del proceso en los sistemas convencionales fluye como descarga hídrica, con un componente orgánico y nitrogenado agregado, producto del proceso metabólico desarrollado por la especie. A esto se suman las heces y los alimentos no consumidos, que finalmente salen del sistema al medio natural, afectando el desarrollo normal de los ecosistemas [2], [3], [4].

Los SRA son un modelo de producción sostenible que se caracteriza por reutilizar el efluente acuícola mediante el tratamiento de las aguas residuales. Este proceso permite retirar de forma física y transformar biológicamente gran parte de los contaminantes ya descritos, generando un ambiente propicio para el desarrollo de las máximas expresiones genéticas productivas de la especie en cultivo [5].

Para mantener la calidad del agua de la especie en producción, en los SRA se deben desarrollar cinco etapas: 1) circulación de agua; 2) remoción de sólidos; 3) biofiltración; 3) oxigenación; 4) eliminación de gases, y 5) desinfección [6]. El buen funcionamiento de cada componente favorece la estabilidad del sistema. Los dos más importantes son la remoción de sólidos y la biofiltración; los demás contribuyen al desarrollo de los principales; sin embargo, es necesario entender la dinámica del componente contaminante con el fin de obtener el mejor diseño del sistema de tratamiento [7].

En los SRA, así como en los otros sistemas de tratamiento de aguas residuales, se busca extraer unidades gruesas por medios físicos y posteriormente remover los componentes nitrogenados disueltos. Si estos no se tratan, resultan muy tóxicos para las especies en producción. Para el caso se emplea el

sistema de biofiltración que permite la conversión del amonio a nitrito mediante los microorganismos nitrificantes como *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* y *Nitrosovibrio*. Luego se transforma a nitrato, con oxidantes de nitritos con géneros como *Nitrobacter*, *Nitrococcus* y *Nitrospina* [8], [9], [10], [11].

Los microorganismos que transforman el nitrógeno en los biofiltros se encuentran en la biopelícula, una bioestructura formada por múltiples agregaciones de poblaciones celulares microbianas, fijadas a una matriz hidratada extracelular de polímeros, que a su vez se desarrolla sobre una superficie o medio de soporte que actúa como un sustrato. De este modo, los microorganismos están protegidos contra el estrés ambiental (deshidratación, reacción del sistema inmunológico, ingestión de protozoos, presencia de biocidas) y tienen garantías para una mejor sobrevivencia [12]. En la actualidad son ampliamente estudiados los sustratos o medios de soporte para biopelículas microbianas utilizados en biofiltros en SRA. Algunos autores indican que para la selección del medio, una de las características elementales debe ser un material no biodegradable con alta superficie específica y alta porosidad [7], [13].

Por otra parte, los sistemas de biofiltración pueden considerar diferentes factores como condicionantes en su eficiencia dentro de los SRA, como las concentraciones de oxígeno mayores a 2 mg/L, que aseguran procesos aerobios, temperaturas mayores a 15 °C, y pH superior a 6. Además, mejoran el metabolismo bacteriano y tienen una alcalinidad cercana a 100 mg/L y CO₂ menor a 10 mg/L, para garantizar el trabajo microbiano [14]. Timmons *et al.* [3] afirman que el diseño del biofiltro ideal en SRA debe ser la tecnología que permita remover el amoníaco en un 100 %, sin producir nitrito, que necesite poca superficie, que se utilice un medio de soporte barato, que no demande presión de agua, que su requerimiento en operación sea casi nulo y que no capture sólidos.

En este orden de ideas, el objetivo de este trabajo es evaluar la capacidad de la transformación del amonio para el diseño de un biofiltro percolador de flujo descendente por goteo, con medio de soporte en GNT, material sintético con características de

alta superficie específica (14 000 a 16 000 m²/m³), porosidad (> 95 %), con duración mayor a 15 años, debido a su alto nivel de resistencia a la tracción y la deformación [7], [15], manejado por dos cargas hidráulicas diferentes para evaluar el desempeño. Así, se podrán las identificar propiedades del GNT como una alternativa de medio de soporte para filtros biológicos, que junto con el diseño estructural y de operación, alcancen un alto grado de transformación de componentes nitrogenados, con un sistema novedoso y de bajo costo.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en las instalaciones de la facultad de Ciencias Agrarias, sede Las Guacas de la Universidad del Cauca al norte de Popayán, departamento del Cauca, Colombia, con altitud de 1738 m s. n. m., temperatura media de 19 °C, precipitación anual de 2040 mm y humedad relativa del 69 % [16].

Construcción de la planta piloto

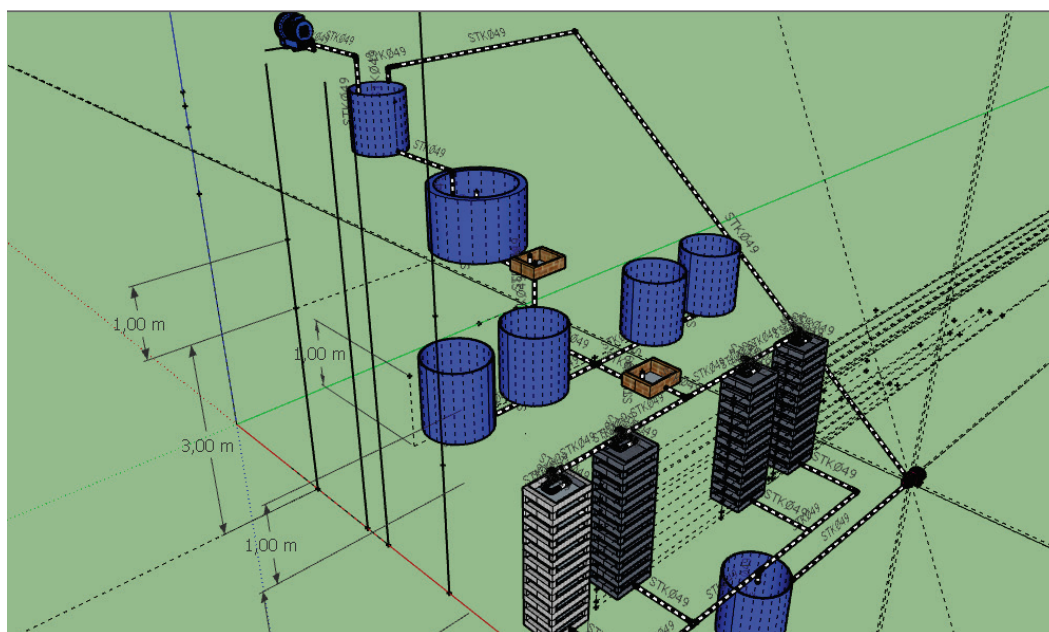
El sistema se construyó con un área cubierta tipo invernadero de 150 m² y una pendiente de entre 30 ° y 40 ° para garantizar su funcionamiento por

gravedad que albergue al SRA con todos sus componentes. Se diseñó de acuerdo con el balance general de masas de [3] y la carga hidráulica (CH) por cubrir, para operar con un caudal máximo de 0,703 L/s, flujo necesario para suplir la demanda de los dos tratamientos de carga hidráulica (150 m/h y 300 m/h). A continuación, se detallan todos los componentes (figura 1).

Tanque de cultivo del material biológico. *Alimentación*

Está compuesto por un tanque plástico con capacidad aproximada de 1 m³, en el que se depositaron los ejemplares de tilapia roja (*Oreochromis spp.*), a una carga de biomasa inicial de 20 kg/m³, en etapa de levante y ceba, los cuales aportaron la materia orgánica al agua, necesaria para el desarrollo de esta investigación. Se utilizaron individuos con reversión sexual mayor al 95 %, machos con adecuadas características genéticas, que se alimentaron con balanceados comerciales de 32 % a 38 % de proteína, a una ración promedio de 557 g/día, que produce cerca de 0,018 kg de nitrógeno amoniacal total (NAT), y que a su vez genera casi 20 mg/L de (NAT)/día.

Figura 1. Componentes de planta piloto

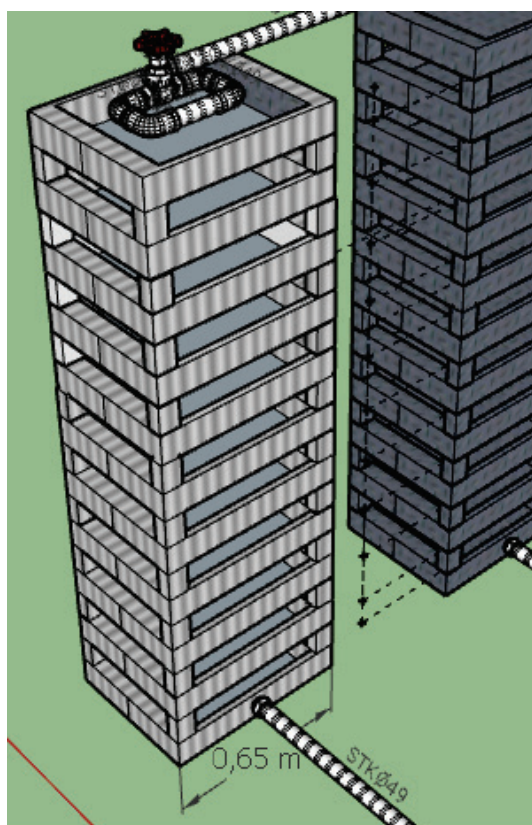


Fuente: elaboración propia.

Sistema de pretratamiento

Cada filtro en gravas se diseñó hidráulicamente para operar a velocidades de filtración de 1,5 m/h, contó con un área superficial calculada de 0,48 m² y 0,87 m de altura en columna de agua, con distribución de fluido de fondo de flujo ascendente y función de retrolavado. Los materiales granulares se seleccionaron de acuerdo con lo recomendado por [17] por medio de los procedimientos estipulados en la norma NTC 1522 [17]. También se utilizaron los tamices recomendados por la norma NTC 32 [18].

Figura 2. Componentes de la torre percoladora



Fuente: elaboración propia.

Sistema de biofiltración

El diseño utilizado se denominó torres percoladoras de flujo descendente y se equipó con diez bandejas extraíbles con material de soporte en GNT de uso comercial (GNT-1600). A continuación, se describe en detalle cada componente (figura 2).

Estructura de soporte y número de bandejas

El diseño se creó mediante la adaptación de las características de una torre de enfriamiento y se le agregó la particularidad tipo lego para el intercambio de las bandejas de soporte, pensada en función de facilitar el proceso de operación en campo, construida en ángulo de acero y altura aproximada de 2,60 m, equipada con diez niveles, cuya altura de separación entre bandejas es de 0,20 m, que facilitaron el estudio de la altura total del filtro con base en la determinación de la eficiencia de transformación de componentes nitrogenados.

Bandejas de soporte y sistema de distribución de flujo

La bandeja que soporta el material filtrante se compone de un cuadrado con un área de filtración de 0,0225 m² fabricada en madera tratada, recubierta con GNT-1600. El sistema de distribución de flujo fue en goteo y homogénea al área del biofiltro.

Tipo y espesor del GNT

Se utilizaron seis y doce capas con espesor de 1,2 mm de GNT por tratamiento, acorde con los trabajos presentados por [20], quienes afirman que se requieren espesores de geotextil mayores a 1 cm para alcanzar superficies específicas entre 13 000 y 14 000 m²/m³. Asimismo, se consideró el reporte realizado por [15], utilizando GNT 1400 y 2000 en filtros lentos en arena, con un espesor de 1,2 cm.

Sistema de bombeo y distribución

Está conformado por una electrobomba sumergida de 1 HP con capacidad máxima de bombeo de 3,6 L/s, con sistema de flotador para función automática, que se encargó de enviar el flujo desde el tanque de succión al tanque de nivel constante, ambos con capacidad de 0,5 m³.

Sistema de aireación

Consiste en un *blower* de 2 HP que realizó el proceso de aireado en los tanques de producción de los tres SRA. Además, se contó con un sistema

de soporte compuesto por un *blower* Resun LP100 con UPS de 1000 vatios, que garantizó un almacenamiento de carga eléctrica de 30 minutos y una planta eléctrica de 800 vatios.

Sistema de desinfección

Después del tratamiento biológico y junto al tanque de nivel constante, se instaló un sistema de filtro UV de 55 vatios con capacidad para el tratamiento de 1,6 L/s [19].

Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial de medidas repetidas [20]. Se evaluaron dos factores con dos niveles y tres réplicas para un total de doce unidades

experimentales. En el primer factor se evaluó el impacto de dos cargas superficiales hidráulicas (CH) de 150 y 300 m³/m²/d (CH150 = 2592 L/día y CH300 = 6048 L/día por unidad experimental) y para el segundo factor se evaluaron dos espesores (E) de material filtrante dado en número de capas de GNT-1600 (seis y doce capas). Cada unidad experimental tiene una torre percoladora con diez bandejas y un área de biofiltración de 0,0225 m². Para el diseño hidráulico y la construcción de biofiltros se tomó como referencia un caudal de 0,7 L/s. En la tabla 1 se detalla el esquema del diseño experimental. La información obtenida se ingresó y procesó en el *software* paquete estadístico para las ciencias sociales (SPSS, por sus siglas en inglés), versión 23 [21].

Tabla 1. Diseño experimental

Factores	Niveles	Variables de resultado	
		Parámetros químicos semanales	Parámetros fisicoquímicos diarios
Carga superficial hidráulica (m ³ /m ² /d)	CH1 (150)	Nitrito (NO ₂ -)	Potencial de hidrógeno (pH)
		Nitrato (NO ₃ -)	Temperatura (T°)
	CH2 (300)	Amonio (NH ₄ +)	Oxígeno disuelto (O ₂)
Espesor en capas GNT (GNT) 1600 (número de capas)	E1(6)		
	E2(12)		

Fuente: elaboración propia.

Variables evaluadas

Evaluación de la carga superficial hidráulica

Para evaluar el impacto de las cargas superficiales hidráulicas en la concentración de componentes nitrogenados en los biofiltros percoladores, se realizó la toma de parámetros fisicoquímicos relacionados como variables de salida. La medición de los parámetros de control (oxígeno disuelto, temperatura y pH), se hizo con sonda multiparamétrica de alta precisión (YSI profesional plus; oxígeno rango 0 a 20 ± 0,2 mg/L; pH rango 0 a 14 ± 0,2; temperatura precisión ± 2 %). La medición de los parámetros químicos como

amonio (HI715 rango 0 a 9,99 ± 0,05 ppm) y nitrito (HI707 rango 0 a 600 ± 20 ppb), se obtuvo con el fotómetro comercial Hanna; nitrato por colorimetría, durante un periodo de seis semanas de funcionamiento del SRA.

Resultados y discusión

Para determinar la configuración de diseño que tuviera mejor comportamiento, se monitorearon los parámetros físicos de control como la temperatura, el potencial de hidrógeno y la concentración de oxígeno. Con el fin de establecer el funcionamiento diferencial entre los tratamientos, se hizo seguimiento a los parámetros químicos, como amonio, nitrito y nitrato. Enseguida se presenta en detalle el comportamiento individual por tratamiento.

Comportamiento del potencial de hidrógeno (pH) en los tratamientos

El comportamiento del pH para los cuatro tratamientos se mantuvo en el rango de $6,28(\pm 0,24)$ a $6,41(\pm 0,25)$ (tabla 2), límite tolerante para realizar el proceso de la nitrificación. De igual forma, se puede observar que los valores de pH aumentaron cuando el número de divisiones recorridas por el agua fue mayor, y la torre percoladora en su diseño de flujo descendente por goteo garantizó la desgasificación del dióxido de carbono, disminuyendo su concentración lo que influyó directamente en el efecto que esta causó al pH. Estos

rangos permanecieron en los niveles medios para la producción de la especie piscícola [22], [23]. El parámetro tuvo un comportamiento diferente con tendencia a la acidez en el sistema de prefiltración ($4,51 \pm 0,35$), en comparación con los tanques de cultivo ($6,41 \pm 0,33$) y de nivel constante ($6,38 \pm 0,30$), proceso que se puede atribuir al desarrollo de mayor actividad microbiológica aerobia generada, debido a la alta retención de materia orgánica acumulada en el sistema de remoción física. Todo lo anterior condujo a la fermentación y a la producción de ácidos en condiciones bajas de oxígeno que aumentó los iones de hidrógeno y redujo el pH [24], [6], [25], [26].

Tabla 2. Valores promedio de pH en los tratamientos

Niveles	T2(150/12)	T1(150/6)	T4(300/12)	T3(300/6)
1	6,34 ($\pm 0,25$)	6,31 ($\pm 0,26$)	6,28 ($\pm 0,24$)	6,27 ($\pm 0,23$)
5	6,36 ($\pm 0,25$)	6,34 ($\pm 0,26$)	6,30 ($\pm 0,24$)	6,29 ($\pm 0,23$)
10	6,41 ($\pm 0,25$)	6,34 ($\pm 0,27$)	6,31 ($\pm 0,26$)	6,30 ($\pm 0,23$)

Fuente: elaboración propia.

Comportamiento de la temperatura (T°) en los tratamientos

El comportamiento de la T° para los cuatro tratamientos se mantuvo en el rango de $21,1(\pm 1,1)$ a $22,3(\pm 1,0)$ (tabla 3), límite aconsejado para el desarrollo del proceso de nitrificación, recomendado en 18°C [27]. La torre percoladora sigue el diseño de una columna de enfriamiento de flujo descendente, lo cual sugiere que a mayor número de divisiones el agua debe perder más temperatura. El parámetro se conservó en los límites de tolerancia de la especie en producción, aunque no era el ideal, debido a que la temperatura fue influenciada en gran medida por la condición

medioambiental de Popayán, el sitio de ensayo, ubicado a 1700 m s. n. m.

Una alternativa de mitigación de este efecto consistió en instalar de forma progresiva de uno a cinco termostatos de 1000 vatios en el tanque de producción (tanque cuadrado con $0,9\text{ m}^3$) con el fin de obtener temperaturas de 24 a 26°C , indicada para la tilapia roja. Sin embargo, no se obtuvieron resultados positivos en razón a la velocidad de paso del flujo por el sistema, que no permitió que la cantidad de calor transferido al agua, ocasionara variación de temperatura [3], [28], [6] que tuvo un comportamiento similar en los tanques de nivel constante ($22,2 \pm 1,9$) y de cultivo ($21,7 \pm 1,8$) y en el sistema de prefiltración ($22,6 \pm 0,36$).

Tabla 3. Valores promedio de temperatura en los tratamientos ($^\circ\text{C}$)

Niveles	T2(150/12)	T1(150/6)	T4(300/12)	T3(300/6)
1	21,4 ($\pm 1,3$)	21,6 ($\pm 1,2$)	21,9 ($\pm 1,1$)	22,2 ($\pm 1,0$)
5	21,3 ($\pm 1,2$)	21,6 ($\pm 1,2$)	21,9 ($\pm 1,1$)	22,3 ($\pm 1,0$)
10	21,1 ($\pm 1,1$)	21,3 ($\pm 1,2$)	21,6 ($\pm 1,1$)	22,1 ($\pm 0,9$)

Fuente: elaboración propia.

Comportamiento del oxígeno (O₂) en los tratamientos

El comportamiento del O₂ disuelto en el agua para los cuatro tratamientos se mantuvo en el rango de 3,11(±0,87) a 4,82(±0,92) mg/L (tabla 4), apto para el desarrollo del proceso nitrificante y la producción de la especie piscícola. En los datos obtenidos se puede observar que la mayor CH (300 m/h) influyó la menor incorporación de oxígeno atmosférico al agua, fenómeno que hidráulicamente se pudo presentar por el mayor caudal de paso, que convierte el goteo en lámina de agua. La relación indica que si la lámina es más delgada o la gota es más pequeña se facilita el intercambio gaseoso, mejorando la captación de oxígeno. También se observó el incremento de concentración de oxígeno a medida que el flujo de agua desciende por los niveles del biofiltro, lo que se puede atribuir al intercambio gaseoso descrito en el parámetro de temperatura [29], [3], [30], [25].

La recuperación del oxígeno disuelto en el sistema fue medida en concentración mg/L y en porcentaje (%); estuvo en el rango de 2,51 mg/L antes de entrar al sistema de biofiltración, a 3,0 mg/L igual a 23,8 % de recuperación cuando pasó por el primer nivel. Luego ascendió a 4,22 mg/L igual al 68,2 % cuando pasó por el nivel cinco y 4,74 mg/L igual a 88,6 % cuando llegó al nivel diez (tabla 4). El parámetro tiene un comportamiento diferente en el componente de prefiltración (2,5±0,29 mg/L) en comparación con los tanques de cultivo (4,5±0,63 mg/L) y de nivel constante (5,32±0,66 mg/L), condición que se puede atribuir a la mayor concentración de materia orgánica, lo que aumenta los procesos aerobios de los microorganismos [22]. En general, se puede afirmar que esta característica única del sistema de incremento rápido de oxígeno mediante el intercambio gaseoso facilita el ciclo aerobio de los microorganismos responsables de la nitrificación y de la transformación de la materia orgánica.

Tabla 4. Concentración promedio en mg/L de oxígeno disuelto en el agua y recuperación de oxígeno en % en los tratamientos

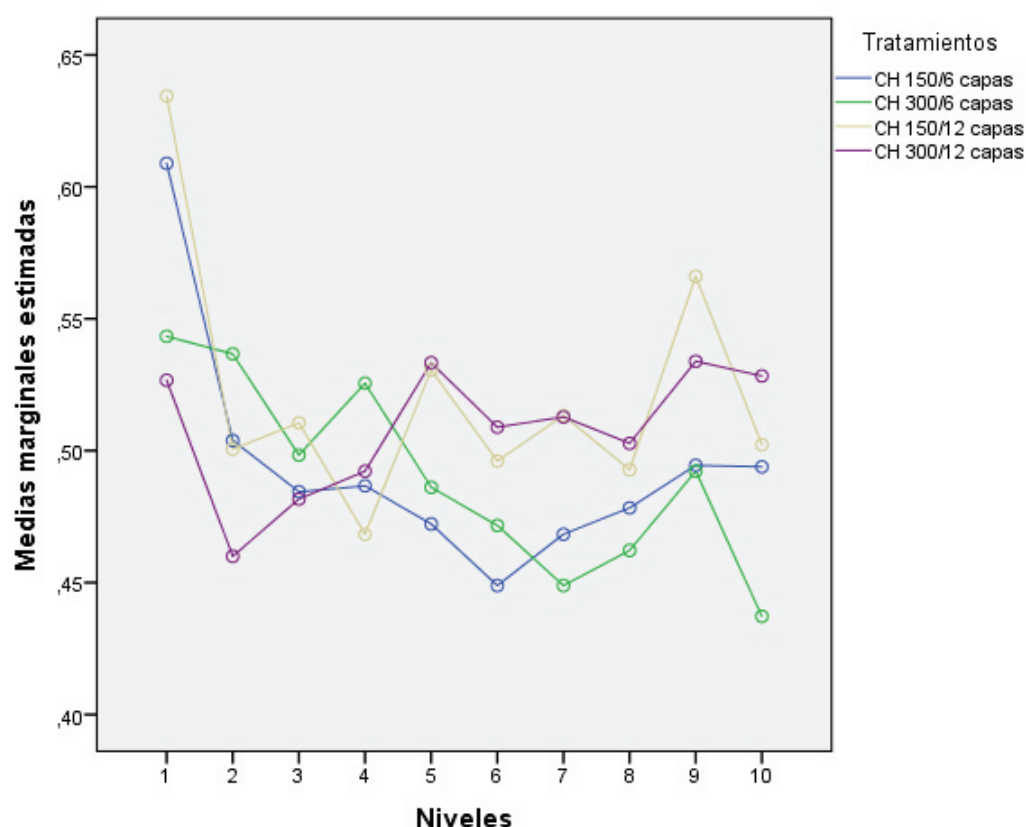
Niveles	T2(150/12)		T1(150/6)		T4(300/12)		T3(300/6)	
	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%
1	3,11(±0,87)	23,78	3,27(±0,88)	30,38	2,84(±0,73)	13,08	3,00(±0,81)	19,44
5	4,16(±0,63)	65,57	4,37(±0,60)	74,25	4,04(±0,62)	61,00	4,22(±0,82)	68,16
10	4,82(±0,92)	92,10	4,82(±0,70)	91,84	4,78(±0,63)	90,41	4,74(±0,67)	88,65

Fuente: elaboración propia.

Comportamiento del amonio (NH₄⁺) en los tratamientos

El análisis de medidas repetidas en el tiempo con factor intersujeto muestra que se encontraron diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % entre las medias de las concentraciones de amonio para los niveles

de las columnas percoladoras, mas no para los tratamientos (aunque sí hay una diferencia observable entre ellos). La figura 3 de medias marginales estimadas señala que el tratamiento que tuvo mayor efecto en la reducción de la concentración de amonio fue T3(300/6), en el nivel número siete de las torres percoladoras.

Figura 3. Medias marginales estimadas para el amonio (NH_4^+) en SPSS

Fuente: elaboración propia.

El comportamiento del amonio NH_4^+ para los cuatro tratamientos se sostuvo en el rango de $0,634 \pm 0,14$ a $0,437 \pm 0,11$ mg/L de NH_4^+ disuelto en el agua (tabla 4), valores menores a los máximos admisibles de 1 mg/L. Para [3] en un SRA la producción de componentes nitrogenados depende de la tasa de alimentación que necesitan los peces para crecer. Parte del alimento consumido y metabolizado se transforma en tejido, y otro porcentaje genera desechos metabólicos como el amonio y las heces, que se depositan en el medio acuoso afectando la calidad del agua. En los sistemas convencionales, este ciclo se mitiga por medio de la descarga y renovación de agua, que permite la restauración de la calidad fisicoquímica y biológica a niveles tolerables por la especie.

En los SRA no existe descarga, por lo que se cuenta con dispositivos de tratamiento de efluentes con el objetivo de reducir los contaminantes,

como sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno amoniacal total (NAT), dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2) a límites tolerables y permisibles para el desarrollo de la variedad. En la ecuación de balance de masa para la construcción de un SRA, [3] propone un caudal de circulación del agua que permita tener en niveles adecuados los anteriores parámetros, si los sistemas de tratamiento contemplan conversiones en los rangos de 75 % de SST, 35 % de NAT, 70 % de CO_2 y 70 % de O_2 .

Las concentraciones obtenidas de amonio equivalen en términos de NAT a 0,53 y 0,72 mg/L, que correspondieron a una tasa superficial de conversión de NAT entre 6 y 87,2 g/m²/día, (tabla 6), y a una tasa volumétrica de conversión de NAT entre 837,9 y 6061,1 g/m³/día (tabla 7). El mayor desempeño en esta fase se alcanzó en los tratamientos tres y nivel siete de la torre percoladora, es decir, registró una capacidad superior a la reportada

por [3], en biofiltros percoladores con medios de soporte convencional, en ambientes con temperatura de 25 a 30 °C, con tasas superficiales de conversión de NAT de 1 a 2 g/m²/día, y en biofiltros con gránulos de arena flotantes, con tasa volumétrica de conversión de NAT entre 1000 y 1500 g/m³/día.

En otros estudios en sistemas a escala piloto, [31] emplearon tanques de 28 m³ para la producción de tilapia, con un biofiltro de arena fluidizada de 0,92 m³ de volumen total y 0,28 m³ de material filtrante, y manejaron conversiones de NAT entre 200 y 244 g/m³/día; [32] evaluaron tres tipos de biofiltro disponibles comercialmente instalados

en SRA para tilapia y determinaron que las tasas de transformación fueron de 267 ± 123, 586 ± 284, 667 ± 344 g/m³/día, para biorreactor de lecho móvil, filtros de perlas flotantes y de arena fluidizada, respectivamente; [2] valoraron un biofiltro percolador combinado con columna de arena en la transformación de NAT para la producción de trucha con carga de 13,3 kg/m³ obteniendo tasas de conversión de 147,12 ± 59,6 g/m³/día; [33] lograron transformaciones de 110,67, 62,34 y 53,05 g/m³/día NAT para biofiltros sumergido, percolador y combinado, respectivamente, instalados en un sistema acuapónico para la producción de tilapia y lechuga.

Tabla 5. Concentración promedio en mg/L de amonio (NH₄⁺) disuelto en el agua en los tratamientos del SRA estudiados

Nivel	Tratamientos (carga hidráulica/n.º de capas de GNT)											
	T2(150/12)			T1(150/6)			T4(300/12)			T3(300/6)		
	mg/L	Desv. est.		mg/L	Desv. est.		mg/L	Desv. est.		mg/L	Desv. est.	
1	0,63	±	0,14	0,61	±	0,10	0,53	±	0,14	0,54	±	0,10
2	0,50	±	0,13	0,50	±	0,12	0,46	±	0,13	0,54	±	0,14
3	0,51	±	0,15	0,48	±	0,10	0,48	±	0,14	0,52	±	0,15
4	0,47	±	0,12	0,49	±	0,12	0,49	±	0,15	0,51	±	0,14
5	0,53	±	0,16	0,47	±	0,10	0,53	±	0,16	0,49	±	0,14
6	0,50	±	0,08	0,45	±	0,11	0,51	±	0,14	0,47	±	0,12
7	0,51	±	0,14	0,47	±	0,08	0,51	±	0,15	0,43	±	0,11
8	0,49	±	0,15	0,48	±	0,14	0,50	±	0,14	0,45	±	0,12
9	0,57	±	0,15	0,49	±	0,13	0,53	±	0,15	0,48	±	0,13
10	0,50	±	0,10	0,49	±	0,15	0,53	±	0,16	0,44	±	0,13

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Tasa superficial de conversión de amonio (NH₄⁺) y NAT en los tratamientos (g NAT/m²/día)

Nivel	Tratamientos por parámetro (carga hidráulica/n.º de capas de GNT)							
	Amonio		NAT		Amonio		NAT	
	T2 (150/12)	T1 (150/6)	T2 (150/12)	T1 (150/6)	T4 (300/12)	T3 (300/6)	T4 (300/12)	T3 (300/6)
1	4,48	7,42	6,03	10,00	39,42	34,94	53,09	47,06
2	19,90	19,52	26,80	26,29	57,34	36,74	77,23	49,47
3	18,75	21,76	25,25	29,30	51,52	42,56	69,38	57,32

4	23,62	21,50	31,80	28,96	48,68	44,20	65,56	59,53
5	16,45	23,17	22,15	31,20	37,63	50,33	50,68	67,77
6	20,42	25,86	27,49	34,82	44,20	55,25	59,53	74,41
7	18,43	23,62	24,82	31,80	43,16	64,81	58,12	87,28
8	20,80	22,46	28,01	30,25	45,85	59,73	61,74	80,44
9	12,35	20,61	16,63	27,75	37,48	51,67	50,48	69,58
10	19,71	20,67	26,55	27,84	38,98	63,47	52,49	85,47

Nota: ecuación propuesta por [31].

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Tasa volumétrica de conversión de NAT en los tratamientos (g NAT/m³/día)

Nivel	Tratamientos por parámetro (carga hidráulica/n.º de capas de GNT)							
	Amonio		NAT		Amonio		NAT	
	T2 (150/12)	T1 (150/6)	T2 (150/12)	T1 (150/6)	T4 (300/12)	T3 (300/6)	T4 (300/12)	T3 (300/6)
1	622,2	1031,1	837,9	1388,6	2737,8	2426,7	3687,0	3268,0
2	2764,4	2711,1	3722,9	3651,1	3982,2	2551,1	5362,9	3435,6
3	2604,4	3022,2	3507,4	4070,0	3577,8	2955,6	4818,2	3980,2
4	3280,0	2986,7	4417,2	4022,1	3380,7	3069,6	4552,8	4133,9
5	2284,4	3217,8	3076,5	4333,4	2613,3	3494,8	3519,4	4706,5
6	2835,6	3591,1	3818,6	4836,1	3069,6	3837,0	4133,9	5167,3
7	2560,0	3280,0	3447,6	4417,2	2997,0	4500,7	4036,1	6061,1
8	2888,9	3120,0	3890,5	4201,7	3183,7	4148,1	4287,5	5586,3
9	1715,6	2862,2	2310,3	3854,6	2603,0	3588,1	3505,4	4832,2
10	2737,8	2871,1	3687,0	3866,5	2706,7	4407,4	3645,1	5935,5

Nota: Ecuación propuesta por [31].

Fuente: elaboración propia.

Comportamiento del nitrito (NO₂⁻) en los tratamientos

El análisis de medidas repetidas en el tiempo con factor intersujeto revela que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de confianza del 95 %, entre las medias de las concentraciones de nitrito para los niveles de las columnas percoladoras, pero sí se observa una diferencia entre los tratamientos. La concentración promedio del NO₂⁻ para los cuatro tratamientos se mantuvo en los rangos de 0,014(±0,040) a 0,021(±0,048) mg/L de NO₂⁻ disuelto en el agua (tabla 8 y figura 4). No

se advirtieron contrastes relacionados con la CH y el número de capas de GNT.

Los valores obtenidos dan cuenta de que los sistemas de biofiltración desarrollaron procesos aerobios que contribuyen a realizar la nitrificación, logrando la transformación del amonio a nitrito. Los niveles de este parámetro están en los rangos adecuados para la producción de la especie piscícola [6], [34], [25]. El adecuado funcionamiento se puede atribuir a la presencia de bacterias nitrificantes (Nitrobacter) que oxidaron el nitrito a nitrato, fase que en condiciones anóxicas contribuye a la desnitrificación; sin embargo, concentraciones

mayores a 2 mg/L de oxígeno evitan este tipo de proceso [9], [35], condición que se dio dentro de los sistemas de biofiltración en estudio y pudo ser un factor determinante para las bajas concentraciones de nitrito.

De igual forma, hay que tener en cuenta que el material de soporte contó con rasgos especiales,

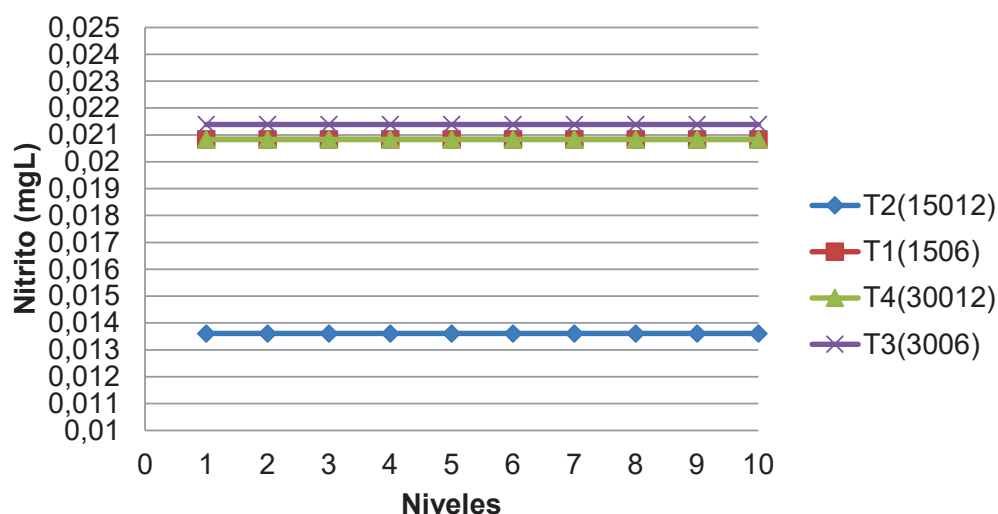
como alta superficie específica (14000-16000 m²/m³) y porosidad (> 95 %), que pudo generar un ambiente propicio para la fijación de los microorganismos [26], [7], [26]. Este conjunto de características de diseño del sistema y del material de soporte y el manejo permitió una alta eficiencia en la transformación del componente nitrogenado [36].

Tabla 8. Concentración promedio en mg/L para nitrito (NO₂-) en los tratamientos

Nivel	Tratamientos (carga hidráulica/n.º de capas de GNT)											
	T2(150/12)			T1(150/6)			T4(300/12)			T3(300/6)		
	mg/L		Desv. est.	mg/L		Desv. est.	mg/L		Desv. est.	mg/L		Desv. est.
1	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
2	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
3	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
4	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
5	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
6	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
7	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
8	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
9	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049
10	0,014	±	0,040	0,021	±	0,048	0,021	±	0,048	0,021	±	0,049

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Comportamiento del nitrito (NO₂-) en los niveles de las torres percoladoras por tratamiento



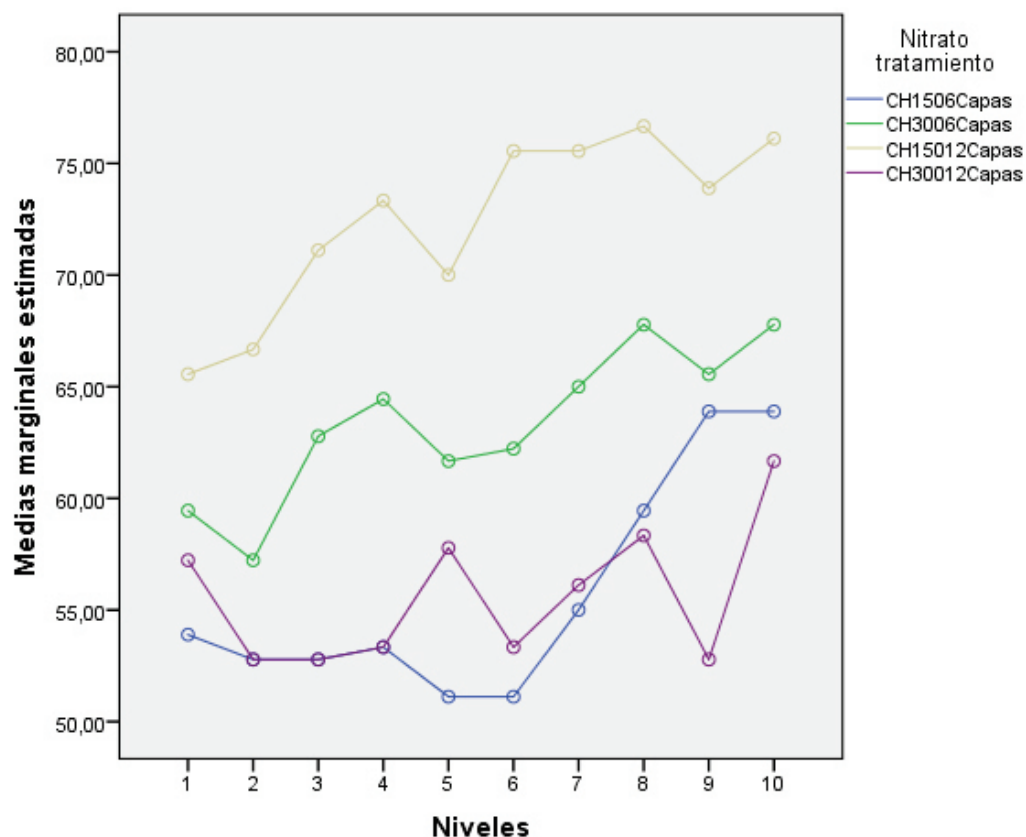
Fuente: elaboración propia.

Comportamiento del nitrato (NO_3^-) en los tratamientos

Del análisis de medidas repetidas en el tiempo con factor intersujeto se deducen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de

confianza del 95 %, entre las medias de las concentraciones de nitrato (NO_3^-) para los niveles de las columnas percoladoras y para los tratamientos. En la figura 5 de Medias marginales estimadas se observa el comportamiento de cada tratamiento.

Figura 5. Medias marginales estimadas para el nitrato (NO_3^-) en SPSS



Fuente: elaboración propia.

La concentración promedio del (NO_3^-) para los cuatro tratamientos se mantuvo en los rangos de $51,1(\pm 14,51)$ a $76,7(\pm 20,86)$ mg/L de NO_2^- disuelto en el agua (tabla 9), no se advirtieron diferencias relacionadas con la CH y con el número de capas de GNT; no obstante, estos valores tienden a aumentar, a medida que el número de niveles recorridos es mayor, es decir, que a mayor número de

niveles, mayor concentración. El comportamiento del parámetro se orienta al desarrollo de actividad aerobia de los microorganismos transformadores de nitrógeno, de bacterias nitrificantes y heterótrofas [37], favorecida por la mayor presencia de oxígeno derivado de la incorporación atmosférica al paso del agua por cada nivel. Esto se describió en el análisis para el oxígeno [10] [6].

Tabla 9. Concentración promedio de nitrato (NO₃-) en mg/L en los tratamientos

Nivel	Tratamientos (carga hidráulica/n.º de capas de GNT)											
	T2(150/12)			T1(150/6)			T4(300/12)			T3(300/6)		
	mg/L		Des. est.	mg/L		Des. est.	mg/L		Des. est.	mg/L		Des. est.
1	65,6	±	12,94	53,9	±	14,91	57,2	±	16,02	59,4	±	17,65
2	66,7	±	14,85	52,8	±	15,65	52,8	±	13,20	57,2	±	16,02
3	71,1	±	16,76	52,8	±	14,87	52,8	±	13,20	62,8	±	18,09
4	73,3	±	17,49	53,3	±	15,72	53,3	±	15,72	64,4	±	17,23
5	70,0	±	19,33	51,1	±	14,51	57,8	±	14,78	61,7	±	16,18
6	75,6	±	21,34	51,1	±	14,51	53,3	±	14,95	62,2	±	17,68
7	75,6	±	14,13	55,0	±	16,18	56,1	±	16,14	65,0	±	16,18
8	76,7	±	20,86	59,4	±	16,26	58,3	±	16,89	67,8	±	17,00
9	73,9	±	21,46	63,9	±	18,19	52,8	±	15,65	65,6	±	17,90
10	76,1	±	20,62	63,9	±	18,19	61,7	±	17,24	67,8	±	18,33

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El GNT, como medio de soporte en un biofiltro percolador utilizado para el tratamiento de efluentes en un SRA en esta investigación, desarrolla un ambiente aerobio atribuido a la incorporación de oxígeno ambiental, propiciado por el flujo descendente por goteo entre los niveles de paredes abiertas que componen el sistema. Esta concentración garantiza un ambiente ideal para el crecimiento y funcionamiento de microorganismos que oxidan el nitrógeno, y al mismo tiempo facilita la desgasificación del CO₂, componente químico que altera el pH, y mantiene la temperatura en los niveles adecuados para que se efectúe la nitrificación.

El mejor comportamiento de T3 se relaciona con el mayor flujo de circulación del agua en el sistema, proporcionado por la CH 300 m/h, que equivale al doble de la CH 150 m/h. Esto quiere decir inicialmente que el líquido pasa dos veces por el sistema de tratamiento. Del mismo modo, una mayor velocidad de paso facilita el trabajo de los microorganismos nitrificantes de forma aerobia, debido a que el agua actúa como un transportador de oxígeno que renueva el ambiente de los microorganismos cada vez que pasa por el medio

de soporte. Tal proceso facilita el desarrollo de la nitrificación y contribuye a mantener los componentes nitrogenados en niveles relativamente bajos y adecuados para la especie en producción.

El número de capas de GNT en relación con la CH se convierte en un limitante de la nitrificación. Por su parte, las características del medio de soporte con fibras entrelazadas sin un diámetro uniforme de poro facilitan el desarrollo de un trabajo físico en acumulación de partículas pequeñas de materia orgánica (MO), y generan un hábitat adecuado para microorganismos aerobios, como bacterias nitrificantes y heterótrofas. Estas últimas crecen cinco veces más rápido que las primeras en mayor presencia de MO.

Así, un mayor flujo de agua facilita una mayor acumulación de MO, el mismo flujo utilizado con un número menor de capas consigue una menor acumulación de MO. Esto ayuda a la nitrificación y, en consecuencia, a una mayor presencia de microorganismos nitrificantes generados.

El desarrollo de esta investigación contribuye a establecer que el uso de GNT es viable como medio de soporte en filtros biológicos utilizados en SRA, debido a su alta capacidad para transformar el nitrógeno, en comparación con otros tipos de sustratos

utilizados, en virtud de las características del material como alta superficie específica, porosidad, durabilidad, fácil disponibilidad y economía del medio, acompañado de un diseño simple, pero con gran capacidad de tratamiento biológico. Esto hace que

sea fácilmente replicable, escalable a diferentes tratamientos de agua en acuicultura y eventualmente a otras áreas de producción o a aguas residuales de origen doméstico, para generar un abanico de posibilidades en posteriores investigaciones.

Referencias

- [1] FAO, “Versión resumida de El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. La transformación azul en acción”, pp. 1-40, 2024.
- [2] I. Gallego and D. García, “Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador-columna de arena”, *Tecnol. y ciencias del agua*, vol. 08, no. 1, pp. 81-93, 2017.
- [3] Timmons *et al.*, *Sistemas de recirculación para la acuicultura*, 2.a ed. Santiago de Chile, 2002.
- [4] A. E. Ojewole *et al.*, “Aquaculture wastewater management in Nigeria’s fisheries industry for sustainable aquaculture practices”, *Sci. African*, vol. 25, no. 6, jun., 2024. doi:10.1016/j.sciaf.2024.e02283
- [5] R. E. del Río-Rodríguez, “Estrategias y tendencias de la acuicultura en el camino hacia la sustentabilidad y la seguridad alimentaria”, *La Década del Océano en México 2021-2030 La Cienc. que necesitamos*, no. sept., pp. 157-176, 2023.
- [6] I. Gallego-Alarcón and D. García-Pulido, “Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador-columna de arena”, *Tecnol. y ciencias del agua*, vol. 08, no. 1, pp. 81-93, 2017. doi:10.24850/j-tyca-2017-01-06
- [7] M. Von Sperling, *Principios del tratamiento biológico de aguas residuales*, Belo Horizonte-Brasil, 2012.
- [8] M. B. Timmons, J. L. Holder, and J. M. Ebeling, “Application of microbead biological filters”, *Aquac. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 332-343, 2006. doi:10.1016/j.aquaeng.2005.07.003
- [9] Lolmede *et al.*, “Tratamiento de agua residual con elevado contenido de nitratos utilizando reactores biomembrana aireados”, *Ing. del agua*, vol. 7, no. 3, p. 243, 2000. <http://dx.doi.org/10.4995/ia.2000.2847>
- [10] T. Maimun, M. R. Lubis, and P. N. Alam, “Performance analysis of coconut fiber trickle bed filter for municipal wastewater treatment”, *Serambi Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 8860-8868, may. 2024.
- [11] Y. Liu *et al.*, “Bimetallic Ni-Co catalysts for co-production of methane and liquid fuels from syngas”, *Catal. Today*, vol. 369, pp. 167-174, 2021.
- [12] A. Lago *et al.*, “Bacterial biofilm attachment to sustainable carriers as a clean-up strategy for wastewater treatment: A review”, *J. Water Process Eng.*, vol. 63, no. abr., 2024. doi:10.1016/j.jwpe.2024.105368
- [13] J. Silva-Acosta, C. Canales Valenzuela, and S. Rodríguez Leal, “Fitodepuración mixotrófica en sistemas de recirculación acuícola (RAS) para el manejo sustentable de nutrientes contaminantes”, *Aquatech. Rev. Iberoam. Acuic.*, vol. 3, no. 1, p. 37, 2021.
- [14] S. I. Sandu *et al.*, “Factors influencing the nitrification efficiency of fluidized bed filter with a plastic bead medium”, *Aquac. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 41-59, mzo. 2002. doi:10.1016/S0144-8609(02)00003-1
- [15] J. Fernández Mera, M. Luna Imbacuan, and M. García Galindo, “Estudio de la filtración ascendente en gravas en el tratamiento de efluentes de la producción de tilapia roja (*Oreochromis sp.*)”, *Ing. Hoy*, vol. 35-44, no. 31, 2009.
- [16] Ideam, “Tiempo y clima”, 2019.
- [17] NTC, *Ensayo para determinar la granulometría por tamizado. NTC 1522*. Bogotá, D.C, 1999, pp. 1-6.
- [18] NTC, *Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo*, pp. 1-11, 2002.
- [19] Y. Sánchez *et al.*, “Diseño de un equipo de desinfección por luz ultravioleta para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización”, *Tecnocientífica URU*, vol. 2, pp. 11-18, 2012.
- [20] O. O. Melo and C. A. Falla, “Efecto de datos influyentes en el análisis de diseños factoriales de efectos fijos 3 ω”, *Ingeniería y Ciencia*, vol. 11, no. 22, pp. 121-150, 2015. doi:10.17230/ingciencia.11.22.6
- [21] S. Gómez *et al.*, “Procedimiento estadístico para el análisis de experimentos con medidas repetidas en el tiempo en la esfera agropecuaria”, *Cuba. J. Agric. Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 353-360, 2019.

- [22] Pulido *et al.*, “Caracterización fisicoquímica de un efluente salobre de tilapia en acuaponia”, *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, no. 5, pp. 939-950, jun. 2013. doi:10.29312/remexca.v0i5.1300
- [23] S. T. Summerfelt *et al.*, “Effects of alkalinity on ammonia removal, carbon dioxide stripping, and system pH in semi-commercial scale water recirculating aquaculture systems operated with moving bed bioreactors”, *Aquac. Eng.*, vol. 65, pp. 46-54, mzo. 2015. doi:10.1016/j.aquaeng.2014.11.002
- [24] J. Bovendeur, “Fixed-biofilm reactors applied to waste water treatment and aquacultural water recirculating systems.”, 1989.
- [25] Corantioquia, *Manual de producción y consumo sostenible. Gestión del recurso hídrico cultivo de trucha y tilapia*. Medellín, Colombia, 2016.
- [26] Y. Caguasango, P. Arciniegas, J. Enriquez, “Metodos de filtracion biologica en sistemas de recirculacion como una alternativa para el mantenimiento de la calidad de agua: una revision”, *Rev. Investig. Pecu.*, pp. 1-13, 2021. doi:10.22267/revip.2181.26
- [27] Z. Schmutz *et al.*, “Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system”, *Arch. Microbiol.*, vol. 199, pp. 613-620, 2017. doi:10.1007/s00203-016-1334-1
- [28] W. F. Bernal Suárez *et al.*, “Sistema automatizado soportado en IoT para monitoreo de calidad de agua en sistemas acuapónicos”, *Cienc. en Desarro.*, vol. 15, no. 1, 2024. doi:10.19053/01217488.v15.n1.2024.15933
- [29] C. Blanco-Cachafeiro, *La trucha: cría industrial*, Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa, 1995.
- [30] J. P. Carvajal-Echeverri, “Comparación de Parámetros zootécnicos y de calidad de agua de tres sistemas de precría de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) en el Municipio de Puerto Triunfo”, Corporación Universitaria Lasallista, 2014.
- [31] T. Pfeiffer and R. Malone, “Nitrification performance of a propeller-washed bead clarifier supporting a fluidized sand biofilter in a recirculating warmwater fish system”, *Aquac. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 311-321, may. 2006. doi:10.1016/j.aquaeng.2005.09.003
- [32] T. C. Guerdat *et al.*, “An evaluation of commercially available biological filters for recirculating aquaculture systems”, *Aquac. Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 38-49, ene. 2010. doi:10.1016/j.aquaeng.2009.10.002
- [33] R. F. Malone and T. J. Pfeiffer, “Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems”, *Aquac. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 389-402, 2006. doi:10.1016/j.aquaeng.2005.08.007
- [34] I. A. Sánchez *et al.*, “Eficiencia de consorcios microbianos en el tratamiento de aguas residuales en un sistema de recirculación acuícola”, *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 11, no. 1, pp. 245-254, 2013.
- [35] S. Tsukuda *et al.*, “Heterotrophic denitrification of aquaculture effluent using fluidized sand biofilters”, *Aquac. Eng.*, vol. 64, no. 3, pp. 49-59, 2015. doi:10.1016/j.aquaeng.2014.10.010
- [36] R. Omar *et al.*, “Ammonia conversion in an aquaponics system using activated carbon-coated and non-coated bioball in the biological treatment tank”, *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2023. doi:10.1016/j.matpr.2023.03.678
- [37] G. Li *et al.*, “Efficient heterotrophic nitrification by a novel bacterium *Sneathiella aquimaris* 216LB-ZA1-12^T isolated from aquaculture seawater”, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 266, nov. 2023. doi:10.1016/j.ecoenv.2023.115588