RAPA Revista Argentina de Producción Animal

CULTIVO DE BOGA (*Megaleporinus obtusidens*) EN SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN CON BAJA HUELLA HÍDRICA: EVALUACIÓN DE UN NUEVO BIOFILTRO INTEGRAL

Boga (Megaleporinus obtusidens) farming in recirculating systems with a low water footprint: evaluation of the new integral biofilter

Collins PA[1,2], Ducommun MP[3*], Belavi AM[1]
[1]COE Ángel Gallardo-INTA EEA Rafaela, Monte Vera, Santa Fe
[2]Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas (UNL), Santa Fe, Santa Fe
[3]IDICAL(CONICET-INTA), Rafaela, Santa Fe
*E-mail de contacto: ducommunpaz@yahoo.com.ar

RESUMEN

Los cultivos acuáticos requieren tradicionalmente abundante agua para mantener en valores bajos los elementos tóxicos excretados, como amonio y nitrito. Los sistemas de recirculación (RAS) mantienen con baja huella hídrica las condiciones óptimas transformando amonio y nitrito en nitrato. El objetivo del trabajo fue evaluar en un cultivo RAS de *Megaleporinus obtusidens* (Boga) la capacidad de un nuevo filtro biológico de diseño integrado para transformar elementos tóxicos en inocuos. Se realizó cultivos de Boga en RAS a dos densidades con dos repeticiones (D1: 17 peces/m^3; D2: 27 peces/m^3) registrando parámetros fisicoquímicos (conductividad, pH, oxígeno disuelto, sólidos disueltos, amonio, nitrato y fosfato) junto con valores de crecimiento (biomasa y longitud estándar). Durante el experimento no se recambió el agua y solo se agregó cada 15 días el volumen perdido por evaporación y 100 L usado en limpieza del decantador. La supervivencia en todos los sistemas RAS fue del 100%, habiendo aumentado en 200 días de 5 g a 652 g como máximo. Las concentraciones de amonio y fosfato fueron similares entre ambas densidades (P>0,05). Mientras que las concentraciones de nitrato tuvieron diferencias estadísticas (P<0,05) aunque con baja relevancia (d: 0,13), siendo mayor en el cultivo D2. Esto es importante ya que el nitrato afecta negativamente en concentraciones muy altas (>100 mg/L). Los otros parámetros fueron similares entre las densidades (P>0,05). Los cambios de temperatura correspondieron a diferencias estacionales. Un RAS con filtro integrado permite la recuperación de la calidad del agua logrando retener sólidos particulados y transformar el amonio en nitratos con una huella hídrica baja en cultivos de peces a altas densidades. Esta baja huella hídrica se afirmó por no recambiar agua y solo reponer lo perdido por evaporación y procedimiento de limpieza.

Palabras claves: RAS, acuicultura, piscicultura, calidad del agua, tasa de crecimiento

ABSTRACT

Aquaculture traditionally requires abundant water to maintain low levels of excreted elements such as ammonium and nitrite. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) maintain optimal conditions with low water footprint by transforming ammonium and nitrite into nitrate. The objective of this study was to evaluate the capacity of a new integrated biological filter to transform toxic elements into harmless ones in a RAS culture of *Megaleporinus obtusidens* (Boga). Boga cultures were carried out in RAS at two densities with two replicates each one (D1: 17 fish/m^3; D2: 27 fish/m^3), recording the physicochemical parameters (conductivity, pH, dissolved oxygen, dissolved solids, ammonium, nitrate, and phosphate) along with the growth values (biomass and standard length). Throughout the culture, the water was not changed and only the water that had evaporated was added every 15 days to maintain the volume in the systems, and 100 L to clean the decanter. Survival in all RAS systems was 100%, with specimens growing in 200 days from 5 g to a maximum of 652 g. Ammonium and phosphate concentrations were similar between the two densities (P<0.05). While nitrate concentrations showed statistical differences (P<0.05) although with low relevance (d: 0.13), being higher in D2. This is important due to the nitrate can also negatively affect fish in very high concentrations (> 100 mg/L). The other parameters showed similarity between the two densities (P<0.05). Temperature changes corresponded to seasonal variations. An RAS with integrated filter allows for the recovery of water quality by retaining solid particles and transforming ammonium into nitrates with a low water footprint in high-density fish cultures. The low water footprint is achieved by not changing water and only replacing what is lost through evaporation and the solids cleaning process.

Key words: RAS, aquaculture, fish culture, water quality, growth rate

Recibido: enero de 2026
Aceptado: junio de 2026

Introducción

La acuicultura ha crecido intensamente en los últimos años (Muñoz Gutiérrez 2012; FAO 2024) debido a la demanda de carne blanca y la disminución de poblaciones naturales de las que se abastecen las pesquerías. Esto ha convertido a la acuicultura en una solución a la obtención de este tipo de proteína animal (Naylor *et al*. 2000; Meyer 2004; Yogev y Gross 2019; Wambua *et al.* 2021).

En una acuicultura tradicional se requiere abundante agua para mantener baja las concentraciones de productos de excreción que causan estrés, daños en órganos y muerte de los organismos (Meyer 2004; Jiménez Sáenz 2018; Edwards *et al*. 2024). Entre los productos tóxicos, los nitrogenados (amonio y nitrito) y el anhídrido carbónico son los principales, además de materia fecal y desperdicios de alimento (Ingle de la Mora *et al*. 2003; Jiménez Sáenz 2018; Carciofi y Rossi 2021).

El sistema de recirculación acuícola (RAS) es un cultivo cerrado que utiliza un filtro biológico y no requiere grandes volúmenes de agua. Ésta se reutiliza continuamente disminuyendo la dependencia hídrica y la contaminación ambiental (Gutiérrez-Wing y Malone 2006; Sánchez *et al.* 2016; Roy *et al.* 2025). Diferentes experiencias exitosas se han realizado en distintas especies y etapas del cultivo (Schulz *et al.* 2003; Lymbery *et al*. 2006; Zachritz *et al*. 2008; Domínguez Castanedo y Martínez Espinosa 2012; Kunwong *et al*. 2024; González-Ramírez *et al*. 2025; Wu *et al.* 2025). En Argentina este modelo de producción es incipiente (Merino y Sal 2007).

Para lograr la eficacia y eficiencia de un sistema RAS en la reutilización del agua es necesario que algunas variables físicas y químicas, que determinan la calidad del agua, se mantengan estables. Entre los parámetros físicos a tener en cuenta se incluye la temperatura y entre los químicos el pH, oxígeno disuelto y salinidad (Sánchez *et al*. 2016). Estos factores afectan las condiciones para que se desarrollen los microorganismos del filtro biológico, principal componente del RAS, que van a transformar el amonio y nitrito (tóxicos a bajas concentraciones) en nitrato (considerado no tóxico hasta en concentraciones superiores a 100 mg/L) (Ingle de la Mora *et al*. 2003; Jiménez Sáenz 2018; Kunwong *et al*. 2024). Además, la mezcla simbiótica de microorganismos (bacterias y algas) producidas en el biofiltro y tanque de cultivo complementa la alimentación considerándolos probióticos, prebióticos y antioxidantes lo que mejora la calidad nutricional del cultivo (Martinez Cruz *et al*. 2024; Rahayu *et al*. 2024). Otro factor crítico es la densidad del cultivo, esta afecta el rendimiento del RAS y la sostenibilidad económica de la producción (Liu *et al*. 2014; Abe *et al*. 2019; Li *et al*. 2021; Zhu *et al*. 2024).

Entre los peces de agua dulce, la Boga (*Megaleporinus obtusidens*) es una especie omnívora del Orden Characiformes (Anostomidae) que se encuentra en los ríos de la cuenca del Plata y es reconocida por su pesca comercial y deportiva siendo su carne apreciada comercialmente (Andrian *et al*. 1994). Esta especie es de interés para su acuicultura en la región Pampeana debido a su tolerancia a menores temperaturas que otras como, por ejemplo, el Pacú (*Piaractus mesopotamicus*) (Milstein *et al*. 2000; Ducommun *et al*. 2024). Su cultivo en Argentina es incipiente, aunque en Brasil se encuentra con mayor desarrollo (Reynalte-Tataje y Zaniboni-Filho 2010). Los trabajos con esta especie son escasos pudiendo encontrarse algunos sobre evaluaciones de densidad de cultivo y requerimientos nutricionales (Copatti *et al*. 2008; Sulis-Costa 2012; Galli Merino *et al*. 2014; Santana de Almeida *et al*. 2022; Marchão *et al*. 2025).

El objetivo del trabajo fue evaluar, en cultivos a dos densidades de *Megaleporinus obtusidens* realizados en un sistema de recirculación acuícola, el funcionamiento de un biofiltro integral de nuevo diseño analizando su capacidad para mantener compuestos nitrogenados en rangos seguros y su efecto sobre la calidad del agua y el crecimiento de la especie.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en las instalaciones del COE Ángel Gallardo-INTA EEA Rafaela (Monte Vera, Santa Fe, Argentina), en donde se construyeron cuatro sistemas de recirculación acuícola en un invernadero de 20 m x 5m.

Los componentes para cada uno de los sistemas construidos y ensamblados *in situ* incluyeron un tanque de cultivo, un biofiltro, conexiones de tuberías y sus accesorios, una bomba de agua centrífuga de funcionamiento continuo de 0,5 hp y un soplador.

El tanque de cultivo se realizó en PVC y poliéster con un volumen de 6,5 m^3 al cual se adosó un biofiltro integral (Figura 1) y por el cual circuló el agua del cultivo de manera constante. Este se construyó a partir de un contenedor de 1,0 m^3 de polietileno de alta densidad destinando el 20% del volumen para el área de retención y decantación de sólidos particulados con una descarga independiente para ellos, 50% del contenedor funcionó como filtro biológico (área de filtrado) a partir de una malla de polietileno con poros de 5 mm de diámetro para la fijación de bacterias y 20% del área fue denominada de recupero.

El flujo de agua hacia el filtro fue de 25 L/min, atravesando un sistema Venturi para la incorporación y mezcla de aire en el agua. La captación del agua se realizó a partir de caños de pvc de 1'' ubicado en el fondo del estanque de cultivo (Figura 1). El volumen de agua se mantuvo constante durante toda la experiencia sin realizar recambio. Solo se agregó cada quince días el volumen correspondiente a lo evaporado y a la limpieza del decantador (100 L aproximadamente).

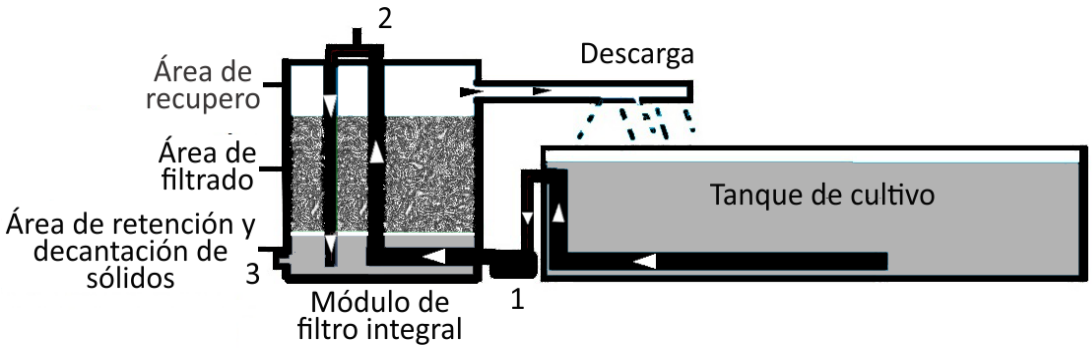


Figura 1. Esquema del diseño del sistema RAS de baja huella hídrica incluyendo el tanque de cultivo de peces, módulo integral de filtro y los accesorios de cañerías y bomba de agua. 1- bomba periférica de 0,5HP, 2- sistema de aireación por Venturi, 3- descarga de sólidos particulados retenidos. Las flechas indican la dirección del flujo de agua.

Figure 1. *Schematic of the low water footprint RAS system design, including the fish culture tank, integrated filter module, and piping and water pump accessories. 1- 0.5 HP peripheral pump, 2- Venturi aeration system, 3- discharge of retained particulate solids. Arrows indicate water flow direction.*

Una vez finalizada la instalación de los componentes del RAS, los tanques de producción se sembraron con alevines de *Megaleporinus obtusidens* (Boga) en dos densidades diferentes teniendo cada una de ellas dos repeticiones por tratamiento (dos tanques con Densidad 1: 17 peces/m^3 y dos tanques con Densidad 2: 27 peces/m^3). La biomasa inicial media de los alevines de todos los sistemas RAS fue de 5,1 ± 1,83 g y la longitud estándar inicial media de 3,0 ± 0,98 cm.

Los peces de estos dos grupos fueron alimentados con un mismo balanceado pelletizado de 3-5 mm de diámetro para peces omnívoros (26% de proteína, 6% de grasa y 3% de fibra) de la marca comercial Avigan (Cooperativa Humboldt). La alimentación se realizó una vez al día, a las 12 pm., esparciendo el alimento manualmente sobre la superficie del agua. Los peces recibieron aproximadamente el 5% de la biomasa total.

En ambas densidades de cultivo se midieron, cada 24 h durante 200 días, parámetros fisicoquímicos como temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica, pH y sólidos disueltos (SD) mediante sondas multiparamétricas (Luthron DO-5510 y EZ-9908) y amonio total (NH_3/NH_4^+), nitrato (NO_3^-) y fosfato (PO_4^-) mediante métodos colorimétricos (Hanna Cheker HI713). Las mediciones de cationes (calcio, sodio, magnesio y potasio) y aniones (carbonatos y sulfatos) se hicieron del agua de cultivo mediante los métodos estandarizados descriptos en APHA (1998).

La evaluación del cultivo se hizo bajo un seguimiento diario de mortalidad y cada 15-20 días se realizaron controles de biomasa con una balanza digital (± 0,01 g) y longitud estándar con un ictiómetro (± 0,1 cm). Estas mediciones biométricas se realizaron a partir de un muestreo aleatorio simple obteniendo los ejemplares con una red de 1 cm de diámetro de poro.

Las variables biométricas se analizaron a través de la tasa de crecimiento y eficiencia alimentaria mediante las siguientes fórmulas:

- Ganancia de peso (GP) o de talla (GT) = variable biométrica final – variable biométrica inicial.
- Tasa de crecimiento específico % diario para biomasa, TCEb = (ln $Biomasa_{final}$ – ln $Biomasa_{inicial}$) / (número de días) x 100
- Tasa de crecimiento específico % diario para longitud estándar, TCEle = (ln le_{final} – ln $le_{inicial}$) / (número de días) x 100
- Tasa de eficiencia proteica (TEP) = GP / proteína total suministrada
- Tasa de conversión de alimento (TCA) = alimento total suministrado / GP

Luego de verificar los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los datos fisicoquímicos y biológicos obtenidos de las dos densidades de cultivos de Boga con los test Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente, se compararon los valores medios obtenidos de cada tanque, considerando a estos como la unidad experimental, mediante pruebas *t* de Student (Zar 1996). Estos valores correspondieron a la media de los datos fisicoquímicos obtenidos diariamente y los biométricos a los medidos al inicio y fin de la experiencia. Las diferencias en las medias entre ambas densidades fueron además evaluadas por la medida estandarizada *d* de Cohen (Zar 1996).

Resultados y discusión

El cultivo se desarrolló desde fines de otoño a fines de primavera en una región de clima templado con inviernos que pueden alcanzar temperaturas atmosféricas menores a los 0 °C (mínimo histórico: -7,0 °C) y veranos con registros mayores a los 40 °C (máximo histórico: 45,6 °C) (https://www.smn.gob.ar/estadisticas). En la experiencia, la temperatura del agua varió de 14,1 °C a 31,7 °C (Figura 2), siendo similar en todos los sistemas evaluados y en ambas densidades (P>0,05). Crojethovich (2012a y 2012b) recomienda para cultivos de especies del género *Leporinus* (*Megaleporinus*) temperaturas entre 22°C y 29°C; con estos

valores los ejemplares alcanzarían tamaños de mercado (entre 0,6 y 1,2 kg) en aproximadamente un año. Si bien este es el rango de temperatura óptima, se ha observado que ejemplares de *M.* (*Leporinus*) *obtusidens* siguen alimentándose hasta los 10 °C, lo que permitiría ampliar/extender la posibilidad de su cultivo en un mayor rango latitudinal y temporal (Ducommun *et al*. 2024).

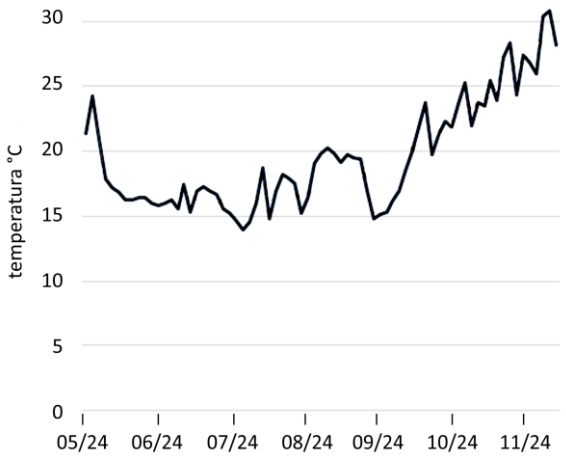


Figura 2. Variación de la temperatura del agua durante el experimento de evaluación del sistema RAS de baja huella hídrica bajo invernadero. Valor promedio diario de los cuatro sistemas RAS en el invernadero.

Figure 2. *Variation of water temperature during the evaluation trial of the low water footprint RAS system in a greenhouse. Daily average value of the four RAS systems in the greenhouse.*

Los peces al ser ectotérmicos y poiquilotérmicos tienen un crecimiento ajustado a los cambios térmicos (Sokolova 2021). Por ello, la temperatura es un factor que afecta tanto el metabolismo de los individuos como el desarrollo de los cultivos, teniendo cada especie sus valores óptimos (Frederich y Portner 2000). En esta experiencia, las condiciones permitieron el crecimiento de los alevines de Boga en 200 días desde los 2 g (valor mínimo) a 652 g (valor máximo) y longitudes estándar de 3,7 cm (valor mínimo) a 32,6 cm (valor máximo) con ganancia de peso (GP) de 440,1 g (D1) y 638,7 g (D2) y de talla (GT) de 26,0 cm (D1) y 31,3 cm (D2), teniendo los coeficientes de variación mayor en los RAS con mayor densidad (D2) (Tabla 1). Estos valores fueron similares entre ambas densidades (P>0,05), excepto la ganancia en peso en donde la D2 fue mayor estadísticamente (P<0,05) y con valores del efecto d de Cohen muy altos (d: 4,32). La tasa de crecimiento específico diaria porcentual (TCEb y TCEle) tuvieron valores que no fueron afectados por las densidades evaluadas (P>0,05) como tampoco la eficiencia proteica del alimento (TEP, P>0,05) y la tasa de conversión de alimento (TCA, P>0,05). Por otra parte, los coeficientes de variación de todas las variables de crecimiento fueron más altos en la D2 (Tabla 1) debido a una dispersión de datos más alta. Al aumentar la densidad, las interacciones entre los individuos deben de haber sido más intensas, utilizando más eficientemente el alimento suministrado por parte de un grupo de la población cultivada en detrimento de los ejemplares más pequeños. Aunque el cultivo se inició con similar longitud estándar y biomasa cuando la densidad aumentó la expresión de los parámetros de crecimiento favorecieron a aquellos que se diferenciaban con una mayor talla.

Tabla 1. Valores promedio, desvío estándar (DE) y coeficiente de variación (CV) de las tasas evaluadas de rendimiento del cultivo de 200 días en sistemas RAS de baja huella hídrica en dos densidades de la especie *Megaleporinus obtusidens* (Boga) (Densidad 1: 17 peces/m^3 (D1) y Densidad 2: 27 peces/m^3 (D2)). Ganancia en peso (GP) y talla (GT), tasa de crecimiento específico de biomasa % diario (TCEb), tasa de crecimiento específico de longitud estándar % diario (TCEle), tasa de eficiencia proteica (TEP) y tasa de conversión de alimento (TCA). Letras iguales indican valores similares entre las densidades evaluadas (P>0,05).

Table 1. *Mean values, standard deviation (DE) and coefficient of variation (CV) of the evaluated yield rates of 200 days in low water footprint RAS systems at two densities of the species* Megaleporinus obtusidens *(Boga) (Density 1: 17 fish/m^3 (D1) y Density 2: 27 fish/m^3 (D2)). Weight gain (GP) and length gain (GT), specific daily % growth rate in biomass (TECb), specific daily % growth rate in standart length (TECle), protein efficiency ratio (TEP), and feed conversion ratio (TCA). Identical letters indicate similarities values between evaluated densities (P>0.05).*

	Densidad 1			Densidad 2		
	Promedio	DE	CV	Promedio	DE	CV
GP (g)	440,1 [a]	16,77	3,81	638,7 [b]	43,38	6,79
GT (cm)	26,0 [a]	0,28	1,08	31,3 [a]	4,73	15,11
TCE b (%)	1,7 [a]	0,05	2,80	1,8 [a]	0,22	11,98
TCE le (%)	0,6 [a]	0,01	1,55	0,6 [a]	0,08	12,86
TEP	1,54 [a]	0,004	0,26	1,82 [a]	0,094	5,16
TCA	1,82 [a]	0,023	1,26	1,61 [a]	0,085	5,28

Las concentraciones de cationes (Na^+, Ca^{+2}, Mg^{+2} y K^+) en el agua fueron 79 mg/L, 70 mg/L, 18 mg/L y 23 mg/L, respectivamente. Mientras que los aniones (CO_3^{-2} y SO_4^{-2}) tuvieron valores 18 mg/L y 225 mg/L respectivamente. Estos valores son óptimos para el desarrollo de cultivos acuáticos manteniendo el equilibrio osmótico en los peces de cultivo.

El oxígeno disuelto durante la experiencia varió entre 6,2 mg/L y 15,6 mg/L. Esto es superior a la sugerida como requerimiento mínimo para esta especie según Crojethovich (2012a; 2012b). Los cultivos, de acuerdo con este autor, deben tener concentraciones de OD mayores a 3 mg/L. Por otra parte, las densidades ensayadas en la experiencia no

afectaron el OD (D1: 11,3 mg/L; D2: 11,4 mg/L) (Tabla 2). Sin embargo, García-Trejo *et al*. (2016) y Wambua *et al*. (2021) indican que el OD disminuye al aumentar la biomasa en los cultivos RAS. En este sentido, posiblemente la densidad máxima no ha sido tan significativa como para afectar el OD del sistema.

Tanto la temperatura como el OD tuvieron los mayores valores de CV en ambas densidades (mayor a 20) (Tabla 2), mostrando la influencia ejercida por la estacionalidad de la zona en la que se realizó el experimento.

El área de decantación del biofiltro integral permitió eliminar los sólidos particulados captados del sistema de manera rutinaria sin afectar el funcionamiento del filtro ni del cultivo. En cada proceso de limpieza realizado cada 15 días se eliminó 100 L de agua del área de decantación. Esto favoreció que los sólidos disueltos tuvieran registros con baja variación de concentración a lo largo de la experiencia (Tabla 2), teniendo valores mínimos y máximos entre 448 ppm y 597 ppm sin diferenciarse entre las densidades evaluadas (P>0,05). Los sólidos residuales que quedan en el sistema producto del alimento no consumido y las heces pueden causar efectos negativos obstruyendo el biofiltro, aumentando la carga orgánica, provocando alto consumo de oxígeno con producción de patógenos y posible aparición de enfermedades en los peces (Yan *et al*. 2008).

Tabla 2. Promedio, desvío estándar (DE), mínimos (Min), máximos (Max) y coeficiente de variación (CV) de las variables medidas durante 200 días en el sistema RAS de baja huella hídrica utilizando dos densidades de *Megaleporinus obtusidens* (Boga) (Densidad 1: 17 peces/m^3 (D1) y Densidad 2: 27 peces/m^3 (D2)). Letras iguales indican valores similares entre las densidades evaluadas (P>0,05).
Table 2. *Mean, standard deviation (DE), minimums (Min), maximums (Max) and coefficient of variation (CV) of the variables measured during 200 days in the low water footprint RAS system using two densities (Density 1: 17 fish/m^3 (D1) and Density 2: 27 fish/m^3 (D2)) of* Megaleporinus obtusidens *(Boga). Identical letters indicate similarities values between evaluated densities (P>0.05).*

		Promedio	DE	Min	Max	CV
Temperatura	D1	22,7 [a]	5,02	14,1	31,7	22,14
	D2	21,8 [a]	4,44	14,1	31,7	20,36
Oxígeno disuelto (mg/L)	D1	11,3 [a]	2,95	6,2	15,6	26,12
	D2	11,4 [a]	2,67	7,0	15,0	23,43
Sólido disuelto (ppm)	D1	541 [a]	30,3	448	597	5,61
	D2	534 [a]	33,3	448	588	6,24
Conductividad (µS/cm)	D1	1107 [a]	92,6	980	1354	8,37
	D2	1095 [a]	79,1	1006	1259	7,22
pH	D1	7,6 [a]	0,26	7,2	7,9	3,41
	D2	7,5 [a]	0,23	7,2	7,9	3,41

La conductividad tuvo registros entre 980 µS/cm y 1354 µS/cm (Tabla 2), sin diferencias entre las dos densidades (P>0,05), aunque Wambua *et al*. (2021) indican que la conductividad eléctrica aumenta con la biomasa en el cultivo, las densidades utilizadas posiblemente no hayan afectado las concentraciones de iones y cationes en el agua.

Los valores de pH variaron entre 7,2 y 7,9 siendo similares en ambas densidades (D1 pH=7,6; D2 pH=7,5) (Tabla 2). Estos valores se encuentran dentro del rango indicado como tolerable (5,0 – 9,0) para el género por Crojethovich (2012a; 2012b). La estabilidad de este parámetro es relevante ya que cambios en sus valores puede afectar la ionización del amonio y la actividad de los microorganismos (Yun *et al*. 2026).

Estos tres parámetros (sólidos disueltos, conductividad y pH) tuvieron CV bajos (Tabla 2), mostrando independencia de la estacionalidad de la región con inviernos de temperatura ambiental baja y temporalidad en días reducida.

Por otra parte, la concentración de fosfatos fue similar entre ambas densidades, aunque algo mayor en la Densidad 2 (Figura 3) al igual que lo observado por Rahman *et al*. (2008) quienes indican que el aumento en la concentración de fósforo en el agua ocurre al incrementar la densidad en un cultivo RAS de Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus L*.).

Luego de 15 días de haber iniciado el cultivo, los valores de amonio (NH_3/NH_4^+ total) se estabilizaron con concentraciones menores a 0,02 mg/L lo cual constituye un aspecto importante ya que la implementación del nuevo diseño de biofiltro tuvo como objetivo mantener bajo los niveles de amonio como recomiendan Badiola *et al*. (2012). Esto se logró aún en la densidad de cultivo más alta (Figura 3). Si bien es de esperar que en altas biomasas de peces se genere mayor cantidad de amonio en comparación con menores biomasas (Wambua *et al*. 2021), en este estudio las concentraciones de este compuesto no difirieron entre las densidades (P>0,05).

Mientras que las concentraciones de nitrato variaron entre 5 y 40 mg/L con valores mayores en la Densidad 2 (P<0,05) (Figura 3), la diferencia estadísticamente significativa entre las densidades no tuvo relevancia debido al bajo valor de la relación de Cohen (d = 0,13). Esto posiblemente se deba a la alta dispersión de los datos de las mediciones de nitrato entre las réplicas. Estos valores, sumado a los máximos obtenidos puntualmente, estuvieron por debajo de las concentraciones consideradas tóxicas.

La concentración promedio de nitrato en D1 fue de 15 mg/L en tanto que en D2 fue de 20 mg/L lo cual es importante considerando que nitrato también puede afectar negativamente a los peces, pero solo en concentraciones altas (> 100 mg/L) (Yogev y Gross 2019).

El alimento no consumido y la excreción primaria a partir de las branquias son las fuentes primarias de nitrógeno que ocurren en el cultivo, como por ejemplo el amonio que en determinadas concentraciones resulta tóxico y degrada la calidad del agua (Benli *et al*. 2008). Su toxicidad va a depender del pH y la temperatura del agua y en menor medida de la composición de minerales del agua (Durborow *et al*. 1997; Edwards *et al*. 2024). El nitrógeno está presente de manera reactiva e incluye amoníaco no ionizado (NH_3), amonio (NH_4^+), urea (CH_4N_2O), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), diversos componentes en fase gaseosa y las formas orgánicas del nitrógeno correspondientes a proteínas, pigmentos, ácidos nucleicos y otras moléculas bioquímicas. Desde la perspectiva del ciclo del nitrógeno, el NH_3 es tanto precursor como producto de los procesos biogeoquímicos y del metabolismo biológico (Ciji y Akhtar 2020). El amonio ionizado y el no-ionizado están en equilibrio y la presencia en mayor concentración de uno más que el otro depende de la temperatura y el pH aumentando la fracción del amonio no ionizado al aumentar ambos parámetros (Emerson *et al*. 1975).

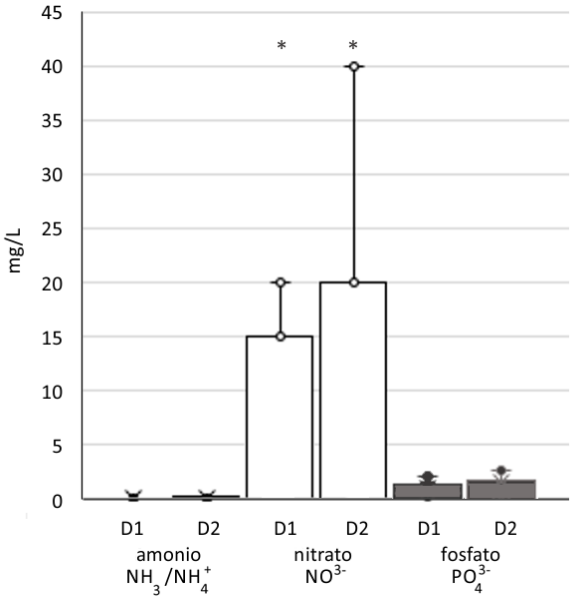


Figura 3. Concentración de amonio, nitrato y fosfato correspondiente a 200 días de cultivo RAS de baja huella hídrica de Boga (*Megaleporinus obtusidens*) usando dos densidades (Densidad 1: 17 peces/m^3 (D1) y Densidad 2: 27 peces/m^3 (D2)) (* diferencia significativa *P*<0,05).

Figure 3. *Ammonium, nitrate, and phosphate concentrations corresponding to 200 days of Boga (*Megaleporinus obtusidens*) RAS culture of low water footprint using two densities (Density 1: 17 fish/m^3 (D1) and Density 2: 27 fish/m^3 (D2)) (* significant difference P<0.05).*

La importancia biológica y de ahí su mayor potencial de toxicidad radica en que el amonio no ionizado atraviesa la mayoría de las membranas generando un desequilibrio interno, mientras que el amonio ionizado requiere de transportadores de membranas (Edwards *et al*. 2024).

La mayoría de los peces e invertebrados acuáticos producen amoníaco (NH_3/NH_4^+) como principal residuo nitrogenado durante el catabolismo proteico. En menor medida, los peces también producen urea ($CO(NH_2)_2$) y aminoácidos, y algunos excretan proteínas directamente en forma de moco corporal (Weihrauch y Allen 2018). La excreción en los peces de NH_3 y NH_4^+ sucede por branquias, piel (de mayor actividad en los embriones) y/o lo liberan en grandes cantidades junto con la orina almacenada en la vejiga urinaria (Curtis y Wood 1991; Evans *et al*. 2005; Shih *et al*. 2008).

Los métodos de recirculación permiten mantener las condiciones óptimas del cultivo. El filtro de nuevo diseño retiene los sólidos particulados presentes en el agua y puede eliminarlos sin detener la circulación del agua; además, transforma el amonio excretado en nitratos y posee un área de recuperación. La transformación del amonio en nitrato es realizada por las bacterias oxidantes del amonio (Ammonia Oxidizing Bacteria (AOB): *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* y *Nitrosovibrio*) y las bacterias oxidantes del nitrito (Nitrite Oxidizing Bacteria (NOB): *Nitrococcus*, *Nitrospira* y *Nitrospina*) (Ebeling *et al*. 2006). Estos grupos de bacterias se alojaron en el material filtrante que tuvo una superficie de colonización de aproximadamente 0,64 m^2/L, inferior a lo indicado para las perlas ofrecidas comercialmente (1,3 m^2/L) (Bead Filters) y similar a lo ofertado para otros polímeros disponibles en el mercado de diferentes diseños y con destino a biofiltros de lechos móviles (Moving Bed) (0,180 a 0,604 m^2/L) (Elliot *et al*. 2017). La necesidad de eliminar o transformar los elementos nitrogenados de excreción está relacionado con el uso de biofiltros que emplean biopelículas microbianas que crecen adheridas a estos sustratos para metabolizar los contaminantes. En estos reactores, las biopelículas microbianas colonizan el sustrato artificial y capturan o transforman los contaminantes disueltos, haciéndolos menos dañinos o eliminándolos por fugas a la atmósfera. Para ello, las tres vías de eliminación de nitrógeno son diferentes en cuanto a la utilización del sustrato, la biomasa bacteriana generada y los subproductos. Estas vías pueden estar presentes simultáneamente en cierta medida y competir por el mismo sustrato. La capacidad de controlar la relación carbono-nitrógeno puede lograrse mediante la formulación del alimento, la eliminación de sólidos o la adición de carbono orgánico permitiendo al productor acuícola gestionar el tipo de sistema que más requiera. Sin embargo, en última instancia, son las especies cultivadas las que determinan qué sistema es el más adecuado según sus necesidades de calidad del agua (Ebeling *et al*. 2006).

Entre los diferentes tipos de biorreactores que existen en el mercado, se pueden indicar aquellos basados en biopelículas y entre estos se pueden incluir los biofiltros con medios suspendidos (lecho móvil) y biofiltros con medios estáticos (*trickling*). Los medios estáticos tienen la dificultad de que la acumulación de la materia orgánica puede afectar el proceso de nitrificación teniendo que combinarse con otro dispositivo independiente para retener los sólidos,

generando a su vez valores altos de nitrito (Eding *et al*. 2006). En estos medios, el N eliminado por consumo de O_2 pueden tener valores de 4,25 g O_2/g NH_4^+, y 4,34 g O_2/g NO_3^--N formado, calculando el consumo de 4,57 g O_2/g NO^{3-} N formado. La diferencia, 4,34 g O_2/g NO_3^--N frente a 4,57 g O_2/g NO_3^--N, correspondería a la asimilación del carbono inorgánico por las bacterias. En este sentido, la producción de 0,16 g de biomasa bacteriana ($C_5H_7NO_2$) en los sistemas tipo *trickling* tiene en general una constante de rendimiento de 0,22 g DQO/g NH_4^+-N oxidado, lo que provoca una producción de aproximadamente 1 g de NO_3^--N y 8,33 g de H_2CO_3/g NH_4^+-N oxidado. Estos valores van a estar afectados por la temperatura, alcalinidad, pH, salinidad, y flujo de agua, entre otros (Eding et al. 2006).

Mientras que, los sistemas suspendidos de lecho móvil tienen costos altos y requieren un gran consumo de energía para oxigenar y mantener en movimiento las perlas o polímeros (Fadhil *et al*. 2011; Pedersen *et al*. 2017). En estos sistemas se han indicado tasas de eliminación de NH_3 que van de 1,620 y 0,710 ppm/día para las perlas del tipo giroide esférico y Kaldnes K1, respectivamente (Elliot et al. 2017). En otros, la DBO disminuye de 90 mg/L a 48 mg/L en el primer día mientras que en el quinto y sexto día disminuye a 1,5 mg/L. Mientras que los sólidos suspendidos totales indican que baja de 985 mg/L a 115 mg/L en dos días teniendo valores de 5 mg/L al sexto día (Fadhil et al. 2011).

Todas estas consideraciones varían de acuerdo a las especies cultivadas, tipo de alimento, flujo, condiciones fisicoquímicas del lugar del cultivo y los diferentes procedimientos que se ejecutan durante el cultivo.

Conclusión

Con el nuevo biofiltro se logró que las condiciones de cultivo se mantengan estables y con valores que promovieron el crecimiento de los peces sin diferencias en ambas densidades evaluadas.

Un sistema de cultivo acuático con un filtro integrado permite la recuperación de la calidad del agua logrando una huella hídrica baja y altas densidades de cultivo, permitiendo el desarrollo de la acuicultura en áreas con escaso acceso al agua dulce y espacio disponible. Dadas las concentraciones de nitrato y fosfato obtenidas en el agua luego del filtrado, se podría evaluar su utilización, además, como solución nutritiva para el riego de cultivos fruti-hortícolas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Javier G. Junges por su apoyo en las actividades rutinarias de mantenimiento del cultivo y la construcción del sistema RAS. A su vez, el trabajo fue financiado por los programas del INTA 2019-PpC-1-Carnes-001 y 2023-PD-L01-108.

Contribuciones

Los autores contribuyeron en el trabajo de la siguiente manera: Collins PA: contextualización, diseño de la experiencia, construcción de los sistemas RAS, toma, procesamiento y análisis de datos, escritura y revisión de manuscrito final. Ducommun MP: contextualización, diseño de la experiencia, construcción de los sistemas RAS, toma, procesamiento y análisis de datos, escritura y revisión de manuscrito final. Belavi AM: contextualización, diseño de la experiencia, financiamiento, construcción de los sistemas RAS, análisis de datos, revisión del manuscrito.

Consideraciones de ética y bienestar animal

El estudio recibió el aval del Comité Institucional para el Cuidado y Uso de Animales de Laboratorio o Experimentación (Comité de Ética Institucional de la Facultad de Bioquímica y Ciencias Biológicas-UNL (Acta CE2020-75).

Bibliografía

Abe HA, Dias JA, Sousa ND, Couto MV, Reis RG, Paixão PE, Fujimoto RY (2019) Growth of Amazon ornamental fish *Nannostomus beckfordi* larvae (Steindachner, 1876) submitted to different stocking densities and feeding management in captivity conditions. *Aquaculture Research* **50**, 2276-2280.

Andrian IF, Rodriguez Da Costa Dória CR, Torrente G, Ferretti CM (1994) Espectro alimentar e similaridade na composiçao da dieta de quatro espécies de *Leporinus* (Characiformes, Anostomidae) do río Paraná (22º10'-22º50'S/53º10'-53º40'W), Brasil. *Revista Unimar* **16**, 97-106.

APHA (1998) "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, twentieth ed.". (American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington DC)

Badiola M, Mendiola D, Bostock J (2012) Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering* **51**, 26-35.

Benli AC, Köksalb G, Özkul A (2008) Sublethal ammonia exposure of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus L*.): Effects on gill, liver and kidney histology. *Chemosphere* **72**, 1355-1358.

Carciofi I, Rossi L (2021) Acuicultura en Argentina: red de actores, procesos de producción y espacios para el agregado de valor. En ´Búsqueda del impulso exportador para los productos acuícolas´. (Documentos de Trabajo del CCE 13) pp. 1-34. (Consejo para el Cambio Estructural - Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación, Buenos Aires).

Ciji A, Akhtar MS (2020) Nitrite implications and its management strategies in aquaculture: a review. *Reviews in Aquaculture* **12**, 878-908.

Copatti CE, Azzolin dos Santos T, dos Santos Garcia SF (2008) Densidade de estocagem e frequência alimentar de juvenis de piava *Leporinus obtusidens* Valenciennes, 1836 (Characiformes: Anostomidae). *Revista brasileira de agrociência* **14**, 107-111.

Crojethovich AD (2012a) Proyecto: Incremento de actividad de acuicultura en las regiones NEA, NOA y Centro. Informe Formosa, 288 pp. Dirección de Acuicultura Subsecretaria de Pesca y Acuicultura, Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires, Argentina.

Crojethovich AD (2012b) Proyecto: Incremento de actividad de acuicultura en las regiones NEA, NOA y Centro. Informe Chaco, 241 pp. Dirección de Acuicultura Subsecretaria de Pesca y Acuicultura, Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires, Argentina.

Curtis BJ, Wood CM (1991) The function of the urinary bladder in vivo in the freshwater rainbow trout. *Journal of Experimental Biology* **155**, 567–583.

Domínguez Castanedo O, Martínez Espinosa DA (2012) Desempeño de los sistemas acuícolas de recirculación en el cultivo intensivo del Pacú *Piaractus mesopotamicus* (Characiformes: Characidae). *Revista de Biología Tropical* **60** (1), 381-391.

Ducommun MP, Collins PA, Belavi AM (2024). Plasticidad térmica en la tasa de consumo de alimento de especies de peces en acuicultura. *Revista Argentina de Producción Animal* **44** Supl. 1, 235.

Durborow RM, Crosby DM, Brunson MW (1997) Ammonia in Fish Ponds. *SRAC Publication* **463**.

Ebeling JM, Timmons MB, Bisogni JJ (2006) Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* **257**, 346-358.

Eding EH, Kamstra A, Verreth JAJ, Huisman EA, Klapwijk A (2006) Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering* **34**, 234–260.

Edwards TM, Puglis HJ, Kent DB, López Duran J, Bradshaw LM, Farag AM (2024) Ammonia and aquatic ecosystems – A review of global sources, biogeochemical cycling, and effects on fish. *Science of The Total Environment* **907**, 167911.

Elliott O, Gray S, McClay M, Nassief B, Nunnelley A, Vogt E, Ekong J, Kardel K, Khoshkhoo A, Proaño G, Blersch DM, Carrano AL (2017) Design and Manufacturing of High Surface Area3D-Printed Media for Moving Bed Bioreactors for Wastewater Treatment. *Journal of Contemporary Water Research & Education* **160**, 144-156.

Emerson K, Russo RC, Lund RE, Thurston RV (1975) Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations: Effects of pH and Temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **32**, 2379-2383.

Evans DH, Piermarini PM, Choe KP (2005) The multifunctional fish gill: dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base regulation, and excretion of nitrogenous waste. *Physiological Reviews* **85**, 97–177.

Fadhil R, Endan J, Arziman SNBS, Taip FS, Ja'afar MSBH (2001) Effectiveness of Floating Micro-Bead Bio-Filter for Ornamental Fish in a Re-Circulating Aquaculture System. *Fisheries and Aquaculture Journal* 2011, FAJ-28.

FAO (2024) "El estado mundial de la pesca y la acuicultura. La transformación azul en acción". (Ed. FAO, Roma, Italia).

Frederich M, Pörtner HO (2000) Oxygen limitation of thermal tolerance defined by cardiac and ventilatory performance in spider crab, *Maja squinado*. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* **279**, R1531-191 R1538.

Galli Merino O, Wicki G, Sal F, Candarle P (2014) Ensayos preliminares en cultivo de Boga (*Leporinus obtusidens*), desde la reproducción hasta el preengorde, partiendo de reproductores de origen silvestre. *4º Coloquio Internacional Red de Investigación sobre la ictiofauna amazónica* **4**, 63.

García-Trejo JF, Peña-Herrejon GA, Soto-Zarazúa GM, Mercado-Luna A, Alatorre-Jácome, Rico-García E (2016). Effect of stocking density on growth performance and oxygen consumption of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under greenhouse conditions. *Latin American Journal of Aquatic Research* **44**, 177-183.

González-Ramírez V, Estrada-Pérez N, Ruiz-Velazco JMJ (2025) Evaluación de un sistema de recirculación acuapónico y tradicional de tilapia-tomate cherry: una comparación de la producción. *Acta Pesquera* **11**(22), 1-12.

Gutiérrez-Wing MT, Malone RF (2006) Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural Engineering* **34**, 163-171.

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

Jiménez Sáenz J (2018) "Instructivo para el diseño, construcción y manejo de sistemas de recirculación en el cultivo de paco". (Ministerio de la Producción: Lima, Perú).

Kunwong S, Vinitnantharat S, Powtongsook S, Hongsthong A (2024) Removing nutrients in recirculating aquaculture system wastewater from Nile tilapia culture via Spirulina cultivation: Optimizing sodium bicarbonate concentration and micronutrient supplementation. *Aquaculture* **578**, 740110.

Li L., Shen Y, Yang W, Xu X, Li J (2021) Effect of different stocking densities on fish growth performance: A meta-analysis. *Aquaculture* **544**, 737152.

Liu B, Liu Y, Liu Z, Qiu D, Sun G, Li X (2014) Influence of stocking density on growth, body composition and energy budget of Atlantic salmon *Salmo salar* L. in recirculating aquaculture systems. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* **32**, 982–990.

Lymbery AJ, Doupe RG, Bennett T, Starcevich MR (2006) Efficacy of a subsurface flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture. *Aquacultural Engineering* **34**, 1-7.

Marchão RS, Copatti CE, Rocha AS, Silva RC, Santana GA, Pereira GA, Rocha DR, Souza AM, Figueiredo RACR, Melo JFB (2025) Whole guava meal can partially replace corn meal in diets for piava (*Megaleporinus obtusidens*). *Arquivo brasileiro de medicina veterinária e zootecnia* **77**, e13546.

Martínez Cruz P, Ibáñez AL, Monroy O, Aguirre JF, Maya EP, Ramírez-Saad H (2024) Effect of symbiotic administration on growth and intestinal microbiota variation of pacú (*Piaractus mesopotamicus*) in recirculating aquaculture systems. *Hidrobiológica* **34**, 13-25.

Merino OG, Sal FM (2007) Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua. Boletín Técnico, 36pp. CENADAC, Santa Ana, Argentina. (Ed. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos).

Meyer DM (2004) "Introducción a la Acuacultura". (Ed. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras).

Milstein A, Zoran M, Peretz Y, Joseph D (2000) Low Temperature Tolerance of Pacu, *Piaractus mesopotamicus*. *Environmental Biology of Fishes* **58**, 455–460.

Muñoz Gutiérrez ME (2012) Sistemas de recirculación acuapónicos. *Informador Técnico* **76**, 123-129.

Naylor RL, Goldburg RJ, Primavera JH, Kautsky N, Beveridge MC, Clay J, Folke C, Lubchenco J, Mooney H, Troell M (2000) Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* **405**, 1017-1024.

Pedersen PB, von Ahnen M, Fernandes P, Naas C, Pedersen L-F, Dalsgaard J (2017) Particle surface area and bacterial activity in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering* **78**, 18-23.

Rahayu S, Amoah K, Huang Y, Cai J, Wang B, Shija VM, Jin X, Anokyewaa MA and Jiang M (2024) Probiotics application in aquaculture: its potential effects, current status in China and future prospects. *Frontiers in Marine Science* **11**, 1455905.

Rahman MM, Verdegem M, Wahab MA (2008). Effects of tilapia (*Oreochromis niloticus L*.) stocking and artificial feeding on water quality and production in rohu–common carp bi-culture ponds. *Aquaculture Research* **39**, 1579-1587.

Reynalte-Tataje D, Zaniboni-Filho E (2010) Cultivo de piapara, piauçu, piava e piau - Gênero *Leporinus*. En 'Espécies nativas para piscicultura no Brasil'. (Eds. B Baldisserotto, LC Gomes) pp. 73-99. (UFSM: Santa Maria).

Roy SM, Choi H, Kim T (2025) Review of state-of-the-art improvements in recirculating aquaculture systems: Insights into design, operation, and statistical modeling approaches. *Aquaculture* **605**, 742545.

Sánchez IO, Revelo DR, Burbano AM, García RC, Guerrero CR, Beltrán DT, Benavides LM (2016) Performance of different biofilters in a recirculating system for rainbow trout farming. *Revista MVZ Córdoba* **21**, 5426-5440.

Santana de Almeida VN, Castellani Carli G, Mota Sátiro T, Torres do Nascimento TM, Takahashi LS (2022) Digestible protein levels and metabolic responses in juvenile piapara (*Megaleporinus obtusidens*). *Boletim do Instituto de Pesca* **49**, e754.

Schulz C, Gelbrecht J, Rennert B (2003) Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. *Aquaculture* **217**, 207-221.

Shih TH, Horng JL, Hwang PP, Lin LY (2008) Ammonia excretion by the skin of zebrafish (*Danio rerio*) larvae. *American Journal of Physiology-Cell Physiology* **295**, C1625-C1632.

Sokolova I (2021) Bioenergetics in environmental adaptation and stress tolerance of aquatic ectotherms: linking physiology and ecology in a multi-stressor landscape. *Journal of Experimental Biology* **224**, jeb236802.

Sulis-Costa R (2012) 'Criacao de piavas *Leporinus* obtusidens (Valenciennes, 1837), em tanque-redes no reservatorio da usina hidroelétrica de Ita, rio Uruguay, Santa Catarina'. Dissertacao da Mestre em Aquicultura, Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil.

Wambua DM, Home PG, Raude JM, Ondimu S (2021) Environmental and energy requirements for different production biomass of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in recirculating aquaculture systems (RAS) in Kenya. *Aquaculture and Fisheries* **6**, 593–600.

Weihrauch D, Allen GJ (2018) Ammonia excretion in aquatic invertebrates: new insights and questions. *Journal of Experimental Biology* **221**, jeb169219.

Wu Y, Chen J, Gui F, Qi H, Wang Y, Luo Y, Wu Y, Feng D, Zhang Q (2025). Experimental Measurements on the Influence of Inlet Pipe Configuration on Hydrodynamics and Dissolved Oxygen Distribution in Circular Aquaculture Tank. *Water* **17**, 2172.

Yan Z, Liu C, Wang S, He J, Liu Y, Zhang L, Zhang J (2008) Water Treatment and Performance Characteristics Evaluation of a Pilot-Scale Recirculating Aquaculture System. *2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 3300-3303.

Yogev U, Gross A (2019) Reducing environmental impact of recirculating aquaculture systems by introducing a novel microaerophilic assimilation reactor: Modeling and proof of concept. *Journal of Cleaner Production* **226**, 1042-1050.

Yun SC, Jeong H, Lee JS, Kim JH, Kim IC, Maszczyk P, Yang Z, Hagiwara A, Lee JS (2026) A review of ammonia toxicity on aquatic organisms: Species-specific responses, microbial shifts, and environmental interactions. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* **300**, 110388.

Zachritz WH, Hanson AT, Sauceda JA, Fitzsimmons KM (2008) Evaluation of submerged surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production systems. *Aquacultural Engineering* **39**, 16–23.

Zar JH (1996) "Biostatistical Analysis". (Prentice Hall, New York).

Zhu K, Yang X, Yang C, Fu T, Ma P, Hu W (2024) FCFormer: fish density estimation and counting in recirculating aquaculture system. *Frontiers in Marine Science* **11**, 1370786.