


## EVALUACIÓN COMPARATIVA DE VARIABLES DE CALIDAD DEL AGUA ANTES Y DESPUÉS DE LA BIOFILTRACIÓN EN UN SISTEMA RAS DE TRUCHA ARCOÍRIS (*Oncorhynchus mykiss*) EN ECUADOR

### COMPARATIVE EVALUATION OF WATER QUALITY VARIABLES BEFORE AND AFTER BIOFILTRATION IN AN ECUADORIAN RAINBOW TROUT (*Oncorhynchus mykiss*) RAS

Jimmy Bladimir Fernández Guarnizo<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador

\* Autor de correspondencia: [jbfernandez2@utpl.edu.ec](mailto:jbfernandez2@utpl.edu.ec)

#### Resumen

En los sistemas de recirculación acuícola (RAS), la biofiltración constituye una unidad crítica para controlar compuestos nitrogenados y sostener condiciones adecuadas de cultivo. En la Estación Agropecuaria de la Universidad Técnica Particular de Loja se evaluó un tren de tratamiento integrado por filtración mecánica, biofiltración y pulido final en un sistema RAS semiintensivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). La valoración se desarrolló mediante seis campañas semanales consecutivas con mediciones emparejadas en dos puntos del sistema: a la salida de la etapa mecánica y a la salida de la unidad de biofiltración. Se analizaron turbidez, sólidos suspendidos totales, nitrógeno amoniacal total, nitrato-nitrógeno, nitrato-nitrógeno y nitrógeno total. La comparación se realizó mediante la prueba t de Student para muestras pareadas, previa verificación del supuesto de normalidad de las diferencias. De manera descriptiva, los valores medios disminuyeron en todas las variables evaluadas después del paso por la biofiltración, con reducciones más marcadas en turbidez, nitrógeno amoniacal total y sólidos suspendidos totales. No obstante, con el tamaño muestral disponible no se detectaron diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ), aunque el nitrógeno amoniacal total mostró una tendencia de reducción. Estos hallazgos sugieren un potencial operativo para mejorar la calidad del agua; sin embargo, se requiere un monitoreo más prolongado y una caracterización más amplia del proceso para confirmar el desempeño del sistema.

**Palabras clave:** Biofiltración; nitrificación; recirculación acuícola; trucha arcoíris; calidad del agua

#### Abstract

In recirculating aquaculture systems (RAS), biofiltration constitutes a critical unit for controlling nitrogenous compounds and sustaining adequate culture conditions. An integrated treatment train comprising mechanical filtration, biofiltration and final polishing was evaluated in a semi-intensive rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) RAS at the Agricultural Station of the Universidad Técnica Particular de Loja. The assessment was carried out through six consecutive weekly campaigns with paired measurements at two points in the system: at the outlet of the mechanical stage and at the outlet of the biofiltration unit. Turbidity, total suspended solids, total ammonia nitrogen, nitrite-nitrogen, nitrate-nitrogen and total nitrogen were analyzed. The comparison was performed using Student's t-test for paired samples, following verification of the assumption of normality of the differences. Descriptively, mean values decreased across all evaluated variables after passing through biofiltration, with more pronounced reductions in turbidity, total ammonia nitrogen and total suspended solids. However, with the available sample size, no statistically significant differences were detected ( $p > 0.05$ ), although total ammonia nitrogen exhibited a downward trend. These findings suggest operational potential to improve water quality; however, longer monitoring and a broader characterisation of the process are required to confirm system performance.

**Keywords:** Biofiltration; nitrification; recirculating aquaculture; rainbow trout; water quality

Recibido: 2026-03-27 Aceptado: 2026-05-20 Publicado: 2026-06-26

## 1. Introducción

Los sistemas de recirculación acuícola (RAS) reutilizan el agua de cultivo mediante una secuencia de operaciones físicas, químicas y biológicas destinadas a conservar condiciones apropiadas para la producción de peces. Su adopción aumenta por la necesidad de reducir el consumo hídrico, intensificar la producción en espacios limitados y ejercer mayor control sobre el ambiente de cultivo; sin embargo, ese desempeño depende de una gestión estricta de la calidad del agua y del tratamiento continuo de los residuos generados dentro del sistema (Gupta et al., 2024; Li et al., 2023a; Grandez-Yoplac et al., 2025).

En los RAS, la filtración mecánica y la biofiltración constituyen unidades críticas del tren de tratamiento. La primera reduce la acumulación, resuspensión y fragmentación de sólidos, mientras que la segunda favorece la oxidación del nitrógeno amoniacal total (TAN, por sus siglas en inglés: total ammonia nitrogen) a nitrito-nitrógeno ( $\text{NO}_2^-$ -N) y posteriormente a nitrato-nitrógeno ( $\text{NO}_3^-$ -N) por acción de comunidades nitrificantes adheridas a medios con alta superficie específica (Fernandes et al., 2015; Preena et al., 2021; Li et al., 2023b). La interacción entre ambos procesos condiciona la estabilidad hidráulica y microbiológica del sistema, así como la protección de los peces frente a compuestos nitrogenados potencialmente tóxicos.

En salmonídeos, y particularmente en trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), la calidad del agua influye de forma directa sobre el bienestar, el crecimiento y la eficiencia operativa del sistema. Estudios recientes en RAS para esta especie resaltan la necesidad de monitorear de manera continua sólidos suspendidos, TAN, nitrito y nitrato, así como de integrar esquemas de tratamiento capaces de sostener la nitrificación bajo condiciones reales de operación y carga orgánica variable (Pulkkinen et al., 2019; Pepe-Victoriano et al., 2025; Grandez-Yoplac et al., 2025).

Además de la selección del medio filtrante, la estabilidad del biofiltro depende del régimen hidráulico, de la carga de sólidos, de la relación entre microorganismos nitrificantes y heterótrofos y del tiempo de maduración del lecho. La evidencia reciente indica que la abundancia y diversidad de comunidades nitrificantes varían según el tipo de portador y las condiciones de operación, mientras que el incremento sostenido de sólidos suspendidos puede comprometer simultáneamente el rendimiento del biofiltro, la calidad del agua y la dinámica microbiana del RAS (Li et al., 2022; Li et al., 2023a; Fernandes et al., 2026).

En la Estación Agropecuaria de la Universidad Técnica Particular de Loja opera un módulo RAS de trucha arcoíris con fines académicos y de evaluación técnica. Documentar el comportamiento del tren de tratamiento instalado resulta pertinente porque aporta evidencia aplicada en un contexto altoandino y en una infraestructura que combina materiales localmente disponibles con un sistema de recirculación de escala intermedia. En este marco, el objetivo del presente estudio fue describir el tren de tratamiento implementado y comparar el comportamiento de variables fisicoquímicas de calidad del agua entre dos puntos del sistema, ubicados antes y después de la unidad de biofiltración, en un RAS semiintensivo de trucha arcoíris.

## 2. Materiales y Métodos

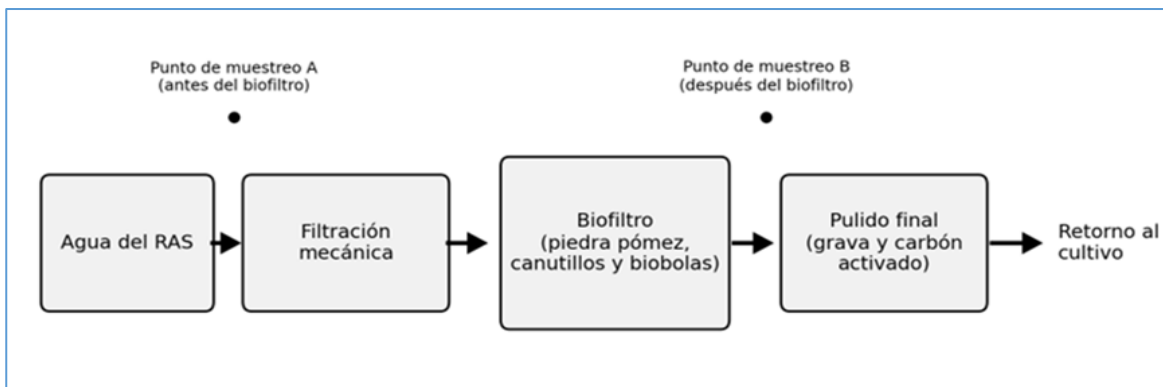
### 2.1 Área de estudio

La investigación se realizó en la Estación Agropecuaria de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), ubicada en el sector Cajanuma, cantón Loja, provincia de Loja, Ecuador, a 2 300 m s. n. m. El sistema evaluado operó bajo una configuración de flujo mixto, con aporte continuo de agua de renovación y recirculación parcial. La unidad productiva estuvo conformada por cuatro estanques de fibra de vidrio de 3.0 m × 1.5 m × 1.20 m, con un volumen útil aproximado de 4.5 m<sup>3</sup> por estanque.

Sobre esta infraestructura se acopló un tren de tratamiento en tres etapas secuenciales: i) filtración mecánica para la remoción primaria de sólidos suspendidos; ii) biofiltración orientada al acondicionamiento biológico del agua y al control de compuestos nitrogenados; y iii) pulido final previo al retorno del agua al sistema de cultivo. La descripción de la infraestructura, del sistema de cultivo y del tren de filtración se sustentó en la documentación técnica del trabajo de integración curricular que originó la presente nota técnica (Barriga Vasquez, 2024).

El biofiltro se construyó dentro de un tanque plástico reutilizable acondicionado con tapas

divisorias internas para mantener mayor estabilidad operativa y proteger el lecho filtrante. En su interior se dispuso una mezcla de piedra pómez, canutillos cerámicos y biobolas plásticas de composición polimérica inerte, materiales seleccionados por su porosidad, rugosidad superficial y área específica para la adhesión microbiana y la formación de biopelículas. Como etapa complementaria de pulido se utilizaron grava y carbón activado granular, orientados a la retención de partículas finas remanentes y a la reducción de compuestos asociados con la fracción orgánica disuelta. La configuración general del tren de tratamiento se presenta en la Figura 1.



**Figura 1.** Secuencia del tren de filtración y ubicación de los puntos de muestreo en el sistema RAS semiintensivo de trucha arcoíris de la UTPL.

Fuente: elaboración propia.

La valoración incluyó una caracterización inicial del agua del sistema y seis campañas semanales consecutivas con mediciones emparejadas en dos puntos del tren de tratamiento. El punto pre correspondió al agua inmediatamente después de la etapa mecánica, mientras que el punto post se estableció a la salida de la unidad de biofiltración, antes del retorno al sistema y del paso final por el pulido. De esta manera, el análisis comparó el comportamiento del agua antes y después del paso por la biofiltración dentro de una misma fecha de muestreo, y no entre periodos históricos previos y posteriores a la instalación del sistema.

Las variables analizadas fueron turbidez (NTU), sólidos suspendidos totales (SST, mg/L), nitrógeno amoniacal total (TAN, mg/L como N),

nitrito-nitrógeno ( $\text{NO}_2^-$ -N, mg/L como N), nitrato-nitrógeno ( $\text{NO}_3^-$ -N, mg/L como N) y nitrógeno total (mg/L como N). Para evitar ambigüedades, en el presente manuscrito TAN se reportó como la fracción de nitrógeno amoniacal total expresada en mg/L como N, mientras que SST correspondió a los sólidos suspendidos totales del agua. Las muestras fueron procesadas por fecha y punto de muestreo, lo que permitió reconstruir pares pre y post para cada campaña semanal.

Las determinaciones fisicoquímicas se realizaron a partir de los reportes analíticos emitidos por CIESA - ONEA Test Lab (Centro de Investigación, Estudios y Servicios Analíticos; Laboratorios de Aguas, Suelos y Alimentos),

correspondientes a muestras recolectadas en envase plástico estéril y diferenciadas por punto de muestreo (CIESA - ONEA Test Lab, 2023). De acuerdo con dichos informes, la turbidez se determinó mediante método AWWA; los sólidos suspendidos totales mediante AOAC 920.193; el nitrógeno amoniacal total mediante método Nessler; el nitrato mediante reducción de cadmio; el nitrito mediante diazotización; y el nitrógeno total mediante método Nessler. Las referencias normativas consignadas en los informes correspondieron a TULSMA e INEN para turbidez, TULSMA para amonio, TULSMA-USPHS para nitrato, INEN-TULSMA para nitrito y BID para nitrógeno total. La turbidez se expresó en NTU o FTU, los SST en mg/L y las especies nitrogenadas en mg/L como N. Los informes no consignaron la marca ni el modelo de los equipos utilizados; por tanto, este elemento se reconoce como una restricción de reproducibilidad instrumental, sin modificar los valores analíticos reportados.

Durante el periodo de evaluación, el sistema se mantuvo bajo operación semiintensiva de flujo mixto, con recirculación parcial y aporte continuo de agua de renovación. La infraestructura documentada incluyó cuatro estanques de fibra de vidrio, reservorios de agua, sistema de bombeo, aireación auxiliar y mantenimiento de los filtros. Como información operativa complementaria del mismo módulo RAS de la Estación Agropecuaria, se registró el manejo de 600 alevines distribuidos en cuatro estanques, con 150 peces por estanque, así como un esquema de alimentación calculado a partir de la biomasa del tanque y la temperatura media del agua (Enríquez Prado, 2024). No obstante, para las seis campañas analíticas específicas de esta nota técnica no se dispuso de una serie completa y trazable de temperatura, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad, biomasa por fecha, densidad efectiva, carga alimenticia diaria, caudal de recirculación, porcentaje de recambio, tiempo hidráulico de retención ni tiempo de maduración del biofiltro. En consecuencia, estas variables se describen como condiciones operativas

relevantes, pero no se incorporaron como covariables cuantitativas en el análisis estadístico.

Para el análisis estadístico se construyeron pares de observación pre y post en cada fecha de muestreo. La prueba t de Student para muestras pareadas se utilizó porque el diseño comparó dos mediciones dependientes tomadas en el mismo sistema y en la misma campaña semanal, antes y después del paso por la unidad de biofiltración. Debido al tamaño muestral reducido ( $n = 6$  pares), se evaluó previamente la normalidad de las diferencias mediante la prueba de Shapiro-Wilk. En caso de no cumplirse el supuesto de normalidad, se consideró como alternativa no paramétrica la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras pareadas. Los resultados se expresaron mediante media  $\pm$  error estándar, diferencia media, intervalo de confianza al 95 %, porcentaje de variación y valor de p, con un nivel de significancia de 0.05. Dado el alcance observacional del estudio y el bajo número de campañas, la interpretación se mantuvo en un plano descriptivo y preliminar.

### 3. Resultados

La caracterización inicial del agua mostró un pH cercano a la neutralidad (7.052), conductividad eléctrica de 63.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , turbidez de 26.4 NTU, sólidos suspendidos de 53 mg/L, TAN de 0.31 mg/L como N,  $\text{NO}_3^-$ -N de 5.1 mg/L como N,  $\text{NO}_2^-$ -N de 0.010 mg/L como N y nitrógeno total de 3.67 mg/L como N. Estos valores permitieron contextualizar la condición inicial del agua y la necesidad operativa de contar con un tren de tratamiento antes del retorno al cultivo.

Con base en los reportes analíticos emparejados por fecha, el punto post mostró menores valores medios en todas las variables evaluadas en comparación con el punto pre. La turbidez disminuyó de  $2.000 \pm 0.632$  a  $1.167 \pm 0.167$  NTU; los SST de  $2.167 \pm 0.3792$  a  $1.667 \pm 0.211$  mg/L; el TAN de  $0.183 \pm 0.042$  a  $0.122 \pm 0.054$  mg/L como N; el  $\text{NO}_3^-$ -N de  $5.793 \pm 0.384$  a  $5.427 \pm 0.245$  mg/L como N; el  $\text{NO}_2^-$ -N de  $0.0050 \pm 0.0000$  a  $0.0045 \pm 0.0003$  mg/L como N; y el

nitrógeno total de  $1.490 \pm 0.112$  a  $1.357 \pm 0.098$  mg/L como N.

Las reducciones descriptivas más marcadas correspondieron a turbidez (-41.6 %), TAN (-33.3 %) y SST (-23.1 %). El nitrógeno total disminuyó 8.9 %, el  $\text{NO}_2^-$ -N 10,0 % y el  $\text{NO}_3^-$ -N 6.3 %. En términos de comportamiento general, la disminución del TAN fue la más consistente entre campañas, mientras que el  $\text{NO}_2^-$ -N se mantuvo en un rango estrecho durante toda la evaluación.

La síntesis estadística de las variables nitrogenadas se presenta en la Tabla 1. Ninguna

de las comparaciones alcanzó significancia estadística al nivel de 5 %, aunque el TAN mostró la menor probabilidad asociada al contraste ( $p = 0,066$ ). Los intervalos de confianza de las diferencias medias incluyeron el valor cero para todas las variables analizadas. De forma general, los resultados mostraron una disminución descriptiva de las variables evaluadas en el punto post; sin embargo, la evidencia estadística disponible no permite establecer diferencias concluyentes entre ambos puntos del sistema bajo las condiciones y el periodo de evaluación considerados.

**Tabla 1.** Comparación estadística de las variables nitrogenadas en los puntos pre y post de la biofiltración en un sistema RAS de trucha arcoíris.

Variable	Unidad	Antes (media $\pm$ EE)	Después (media $\pm$ EE)	Dif. media (post - pre)	IC95%	<i>p</i>
TAN	mg/L como N	$0.183 \pm 0.042$	$0.122 \pm 0.054$	-0.062	-0.129 a 0.006	0.066
$\text{NO}_2^-$ -N	mg/L como N	$0.0050 \pm 0.0000$	$0.0045 \pm 0.0003$	-0.0005	-0.00138 a 0.00038	0.203
$\text{NO}_3^-$ -N	mg/L como N	$5.793 \pm 0.384$	$5.427 \pm 0.245$	-0.367	-1.436 a 0.703	0.419
Nitrógeno total	mg/L como N	$1.490 \pm 0.112$	$1.357 \pm 0.098$	-0.133	-0.489 a 0.222	0.379

Nota. EE = error estándar; IC95% = intervalo de confianza al 95 %; TAN = nitrógeno amoniacal total;  $\text{NO}_2^-$ -N = nitrito-nitrógeno;  $\text{NO}_3^-$ -N = nitrato-nitrógeno.

#### 4. Discusión

La reducción descriptiva observada en turbidez, SST y TAN fue coherente con el comportamiento esperado en un tren de tratamiento de RAS, donde la remoción temprana de sólidos puede favorecer el funcionamiento global del sistema y reducir la carga que ingresa a la unidad biológica (Fernandes et al., 2015; Gupta et al., 2024). No obstante, el diseño empleado no permite atribuir de manera exclusiva dichos cambios al proceso de biofiltración nitrificante.

Las variaciones de  $\text{NO}_2^-$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N y nitrógeno total fueron menores que las observadas para turbidez, SST y TAN. Este comportamiento es compatible con la dinámica de la nitrificación en

RAS, ya que el nitrato constituye el producto final de la oxidación aerobia del amonio y, en ausencia de una etapa específica de desnitrificación, no necesariamente disminuye de forma marcada. En consecuencia, la reducción descriptiva de  $\text{NO}_3^-$ -N y nitrógeno total observada en este estudio debe interpretarse con cautela y no como evidencia concluyente del desempeño nitrificante del biofiltro (Preena et al., 2021; Li et al., 2023b).

En trucha arcoíris, el control de TAN y de sólidos suspendidos resulta especialmente relevante por su relación con el bienestar de los peces, la seguridad biológica del cultivo y la eficiencia del sistema (Pulkkinen et al., 2019; Pepe-Victoriano et al., 2025). En este sentido, la tendencia descendente del TAN adquiere interés técnico aun

cuando no alcanzó significancia estadística con el número de observaciones disponible. En términos operativos, una reducción consistente de la fracción amoniacal puede considerarse una señal favorable de acondicionamiento del agua, pero no una prueba definitiva de eficiencia del biofiltro.

La ausencia de significancia estadística debe interpretarse a la luz de las limitaciones del estudio. El diseño trabajó con seis pares de observaciones, lo que redujo la potencia del contraste para detectar diferencias pequeñas o moderadas. Aunque los informes analíticos permitieron identificar el laboratorio responsable y los métodos empleados para las determinaciones fisicoquímicas, no se contó con un control concurrente ni con una serie completa de variables moduladoras de la nitrificación, como temperatura, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad, caudal de recirculación, carga alimenticia diaria y tiempo de maduración del biofiltro. Estos factores son determinantes para interpretar el comportamiento del biofiltro y la estructura de las comunidades nitrificantes (Li et al., 2022; Li et al., 2023a; Fernandes et al., 2026).

A pesar de estas limitaciones, el estudio aporta información aplicada sobre el comportamiento de un tren de tratamiento en un contexto local de operación real. Desde una perspectiva técnica, los resultados sugieren que la combinación de filtración mecánica, biofiltración y pulido podría contribuir al acondicionamiento del agua en un RAS semiintensivo de trucha; sin embargo, se requiere una evaluación más prolongada, con mayor número de campañas y mejor control de variables operativas, para confirmar el alcance de esta respuesta.

## 5. Conclusiones

El tren de tratamiento evaluado mostró reducciones descriptivas en turbidez, sólidos suspendidos totales, TAN,  $\text{NO}_2^-$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N y nitrógeno total entre los puntos ubicados antes y después de la unidad de biofiltración dentro del RAS de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

Las disminuciones más marcadas correspondieron a turbidez, TAN y SST; sin embargo, con seis pares de observación, las diferencias no alcanzaron significancia estadística.

Bajo las condiciones evaluadas, los resultados sugieren un potencial operativo del tren de tratamiento para contribuir al acondicionamiento del agua del sistema, pero no permiten atribuir de forma concluyente los cambios observados al efecto exclusivo de la biofiltración nitrificante. Por su alcance observacional, el tamaño muestral reducido y la ausencia de registros operativos completos por campaña, los hallazgos deben considerarse evidencia técnica preliminar. Se recomienda ampliar el periodo de monitoreo, incrementar el número de campañas y registrar de forma continua temperatura, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad, caudal, recambio, biomasa, carga alimenticia y tiempo de maduración del biofiltro.

## 6. Declaración de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

## 7. Referencias

- Barriga Vásquez, R. E. (2024). *Diseño e implementación de un filtro biológico en sistemas de cultivo semiintensivo de truchas arcoíris, con tecnología de recirculación de agua, en la Estación Agropecuaria de la UTPL* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica Particular de Loja]. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/52543>
- CIESA - ONEA Test Lab. (2023). *Informes de análisis físico-químico de agua del sistema RAS de trucha arcoíris de la Estación Agropecuaria de la UTPL* [Informe de laboratorio no publicado]. Centro de Investigación, Estudios y Servicios Analíticos; Laboratorios de Aguas, Suelos y Alimentos.
- Enríquez Prado, G. A. (2024). *Evaluación del fosfato de ácido ascórbico (vitamina C) como un factor importante en el diseño de dietas, crecimiento y sobrevivencia de trucha arcoíris*

- (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recambio acuícola (RAS) en la Estación Agropecuaria de la UTPL [Trabajo de titulación, Universidad Técnica Particular de Loja].  
<http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/52908>
- Fernandes, P. M., Fiksdal, L. W. F., Rojas-Tirado, P., Stenhaug, S. R., Khadka, S., Calabrese, S., Powell, M. D., Dahle, H., Bakke, I., Hess-Erga, O.-K., & Fredriksen, S. (2026). Biofilter performance, water quality, and microbial dynamics in RAS operated under high or low suspended solids load. *Aquaculture*, 614, 743559.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743559>
- Fernandes, P. M., Pedersen, L.-F., & Pedersen, P. B. (2015). Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 65, 17-26.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.007>
- Grandez-Yoplac, D. E., Pachas-Caycho, M., Cristobal, J., Chapa-Gonza, S., Mori-Zabarburú, R. C., & Guadalupe, G. A. (2025). Recirculating aquaculture systems for cultivating *Oncorhynchus mykiss* and the potential for IoT integration: A systematic review and bibliometric analysis. *Sustainability*, 17(15), 6729.  
<https://doi.org/10.3390/su17156729>
- Gupta, S., Makridis, P., Henry, I., Velle-George, M., Ribicic, D., Bhatnagar, A., Skalska-Tuomi, K., Daneshvar, E., Ciani, E., Persson, D., & Netzer, R. (2024). Recent developments in recirculating aquaculture systems: A review. *Aquaculture Research*.  
<https://doi.org/10.1155/are/6096671>
- Li, H., Cui, Z., Cui, H., Bai, Y., Yin, Z., & Qu, K. (2023a). A review of influencing factors on a recirculating aquaculture system: Environmental conditions, feeding strategies, and disinfection methods. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(3), 566–602.  
<https://doi.org/10.1111/jwas.12976>
- Li, H., Cui, Z., Cui, H., Bai, Y., Yin, Z., & Qu, K. (2023b). Hazardous substances and their removal in recirculating aquaculture systems: A review. *Aquaculture*, 569, 739399.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739399>
- Li, Q., Hasezawa, R., Saito, R., Okano, K., Shimizu, K., & Utsumi, M. (2022). Abundance and diversity of nitrifying microorganisms in marine recirculating aquaculture systems. *Water*, 14(17), 2744.  
<https://doi.org/10.3390/w14172744>
- Pepe-Victoriano, R., Pepe-Vargas, P., Pérez-Aravena, A., Aravena-Ambrosetti, H., Huanacuni, J. I., Méndez-Abarca, F., Olivares-Cantillano, G., Acosta-Angulo, O., & Espinoza-Ramos, L. (2025). Evaluation of water quality in the production of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in a recirculating aquaculture system (RAS) in the precordilleran region of northern Chile. *Water*, 17(11), 1685.  
<https://doi.org/10.3390/w17111685>
- Preena, P. G., Rejish Kumar, V. J., & Singh, I. S. B. (2021). Nitrification and denitrification in recirculating aquaculture systems: The processes and players. *Reviews in Aquaculture*, 13(4), 2053–2075.  
<https://doi.org/10.1111/raq.12558>
- Pulkkinen, J. T., Eriksson-Kallio, A.-M., Aalto, S. L., Tirola, M., Koskela, J., Kiuru, T., & Vielma, J. (2019). The effects of different combinations of fixed and moving bed bioreactors on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growth and health, water quality and nitrification in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 85, 98–105.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.004>