

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Desempeño zootécnico de dos líneas genéticas de *Oreochromis* spp. en un sistema de recirculación convencional ¹

Esteban Zúñiga-Vargas², Alejandro Chacón-Villalobos³, Felipe Vaquerano-Pineda⁴, Juan Ignacio Herrera-Muñoz⁵

RESUMEN

El estudio evaluó el desempeño de *Oreochromis aureus* y *Oreochromis niloticus* × *aureus* (Rocky Mountain White) durante 90 días de desarrollo, en un sistema cerrado de recirculación ubicado en La Unión, Cartago, Costa Rica. Se utilizaron individuos de *Oreochromis aureus* (30 ± 1 g) y *Oreochromis sp. var.* Rocky Mountain White (45 ± 1 g). Se seleccionaron 60 tilapias por especie, integrando seis unidades experimentales de 10 individuos en un diseño experimental unifactorial completamente aleatorizado con las especies como tratamientos. El sistema contó con un tanque sumidero tricapa y biofiltrado mecánico de lecho móvil. Se monitoreó la mortalidad y la calidad del agua (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto instrumentalmente; alcalinidad, pH, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal total mediante colorimetría), ajustando la temperatura parcialmente con termostatos. Por medio del control estadístico de procesos, se estimaron parámetros poblacionales y límites de estabilidad del biosistema. Se evaluaron a través del tiempo las variables de crecimiento, conversión alimenticia, coeficiente térmico de crecimiento, índice viscerosomático, relación cabeza cuerpo y rendimiento a canal. Además, se

¹Este trabajo formó parte del proyecto de investigación: 737-C3169 Desempeño de tres líneas de tilapia (*Oreochromis spp.*) bajo sistemas acuícolas de recirculación.

²Instituto Tecnológico. Escuela de Agronegocios. Dulce Nombre, Cartago. Correo: estebanzv0297@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-2234-8510>

³Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia. Estación Experimental Alfredo Volio Mata. La Unión, Cartago. alejandro.chacon@ucr.ac.cr. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8454-9505>

⁴Instituto Tecnológico. Escuela de Agronegocios. Dulce Nombre, Cartago. Correo: fvaquerano@itcr.ac.cr. Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-5299-1463>

⁵Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia. San Pedro, San José. juanignacio.herrera@ucr.ac.cr. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5004-0826>. Autor de correspondencia.

Recibido: 21 de mayo, 2025 Aceptado: 23 de abril, 2026

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas 4.0.



estimaron modelos de predicción lineales y exponenciales de peso en función del ancho y el largo. *Oreochromis aureus* mostró mayor crecimiento y eficiencia que el híbrido, con menor mortalidad inicial por nitritos. El rendimiento fue superior en los machos de ambas líneas genéticas. Se concluye que *Oreochromis aureus* crece más y de una manera más eficiente que el híbrido, según las variables de crecimiento y eficiencia estudiadas.

Palabras Clave: parámetros zootécnicos, tilapia aurea, Rocky Mountain, acuicultura, sistema RAS.

ABSTRACT

Performance of two genetic lines of *Oreochromis* spp. in a conventional recirculating system. The study evaluated the performance of *Oreochromis aureus* and *Oreochromis niloticus* × *aureus* (Rocky Mountain White), during 90 days of development in a closed recirculating system located in La Unión, Cartago, Costa Rica. Individuals of *Oreochromis aureus* (30 ± 1 g) and *Oreochromis* sp. var. Rocky Mountain White (45 ± 1 g) were used. Sixty tilapias per species were selected, forming six experimental units of 10 individuals in a completely randomized unifactorial experimental design with species as treatments. The system featured a three-layer sump tank and a mechanically biofiltered moving bed. Mortality and water quality were monitored (temperature, salinity, and dissolved oxygen instrumentally; alkalinity, pH, nitrites, nitrates, and total ammonia nitrogen through colorimetry), with temperature partially adjusted using thermostats. Population parameters and biosystem stability limits were estimated through statistical process control. Growth variables, feed conversion, thermal growth coefficient, viscerosomatic index, head-body ratio, and carcass yield were evaluated over time in the fish. Additionally, linear and exponential weight prediction models based on width and length were estimated. *Oreochromis aureus* exhibited greater growth and efficiency than the hybrid, with lower initial mortality due to nitrites. Yield was higher in males of both genetic lines. It is concluded that *Oreochromis aureus* grows more efficiently than the hybrid, according to the studied growth and efficiency variables.

Keywords: zootechnical parameters, tilapia aurea, Rocky Mountain, aquaculture, RAS system.

INTRODUCCIÓN

El informe del Estado de Pesca y Acuicultura (FAO, 2020), destaca el impacto de la acuicultura como una producción sustentable a nivel mundial, y que, por primera vez en la historia, supera a la pesca de captura en volumen, lo cual está en línea con los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la ONU para 2030, especialmente en lo que respecta a la protección de la vida submarina y la generación de empleo.

En Costa Rica, la producción de tilapia representa el 80% de la producción acuícola actual y está controlada principalmente por la empresa Aquacorporación Internacional S.A., que representa el 76% de la producción total de tilapia (INCOPECA, 2019). Sin embargo, a pesar de ser la especie de mayor distribución y volumen de producción, las investigaciones e información disponible para el público en los últimos 30 años se han enfocado en especies como el camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), el pargo manchado (*Lutjanus guttatus*), la corvina (*Argyrosomus regius*) o especies endémicas como el pez guapote (*Parachromis dovii*) (Zumbado-Salas et al, 2022). La información sobre desempeño zootécnico de *Oreochromis* spp. en condiciones locales se realiza principalmente por empresas privadas y no está disponible para pequeños productores ni técnicos acuícolas.

Los sistemas de recirculación utilizados en acuicultura (RAS) se destacan por un diseño centrado en la pureza del agua y la sostenibilidad ambiental (Brown et al., 2024). Este sistema utiliza hasta un 90% menos de agua que los sistemas tradicionales y minimiza la posibilidad de escapes accidentales de especies invasoras, lo que lo convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente. El tratamiento del agua de cultivo garantiza una mayor calidad para la producción de larvas y el crecimiento, desarrollo y engorde de organismos acuáticos (Zimmermann et al., 2023).

Para desarrollar e implementar metodologías en una industria competitiva de baja huella ecológica, el contar con información confiable sobre los parámetros productivos en diferentes especies de interés es fundamental. El desempeño zootécnico de las líneas genéticas utilizadas en sistemas de recirculación constituye una fuente primaria de información y, a su vez, de impulso para la implementación de estas tecnologías. Sin embargo, a pesar de la presencia de entes de investigación en este campo, la información suele ser limitada o de carácter confidencial, dificultando a su vez la selección genética adecuada para propósitos comerciales (Zumbado-Salas et al., 2022).

El comportamiento de las especies de tilapia seleccionadas para esta investigación ha sido estudiado previamente evaluando su comportamiento en diferentes ubicaciones, regímenes de alimentación y sistemas de recirculación de flujo continuo (Chacón-Palma, 2001). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño productivo de dos líneas genéticas de tilapia (*Oreochromis spp.*) en etapas de desarrollo bajo condiciones controladas en un sistema de recirculación convencional con mínimo recambio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

La presente investigación se realizó durante un periodo experimental de 100 días, en las instalaciones del módulo acuícola de la Estación Experimental de Ganado Lechero Alfredo Volio Mata, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica, y ubicada en el cantón de la Unión, provincia de Cartago. Los peces provinieron de la Estación Acuícola "Los Diamantes", del Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura, ubicada en Guápiles, Cantón de Pococí, en la provincia de Limón.

Entorno experimental y su parametrización

Se involucraron 100 individuos de la línea genética *Oreochromis aureus* (30 ± 1 g) y 100 de la línea *Oreochromis sp.* var. Rocky Mountain White (45 ± 1 g), sexualmente reversados

empleando 17- α -metil-testosterona, garantizando una relación macho/hembra de 19:1. Se realizaron categorizaciones por peso y talla, seleccionando 60 tilapias cercanas al promedio general para cada tratamiento (10 animales por unidad experimental).

Se utilizó un sistema cerrado de recirculación con un tanque sumidero tricapa (108 cm de diámetro y altura; con capacidad de 750 L), y una bomba de agua externa de flujo regulable (Taurus VS, 1.5 HP). El filtrado mecánico empleó un tanque de fibra de vidrio (Arias 6000, 60 GPM) con material filtrante de lecho móvil (piedra y vidrio molido), y una válvula de alivio de 5 vías, la cual reguló el flujo de agua. El biofiltro consistió en un tanque tricapa de 750 L con lecho flotante de piezas plásticas comerciales (SWX Bio-Media, SSA=900 m²/m³). Adicionalmente, se usaron 12 tanques individuales tricapa de 450 L (82 cm de diámetro y 110 cm de altura), con una densidad final de 31 peces/m³ (6,5 kg/m³).

Para la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto (OD), se hicieron tres mediciones diarias: entre 08:00 y 09:00 horas, al mediodía (12:00 a 13:00), y entre 16:00 y 17:00 horas; con un instrumento multiparamétrico (Professional Plus, YSI). La alcalinidad, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal total (TAN) se determinaron con kits colorimétricos (Fresh Master Test Kit, API). Por su parte, el pH se midió con un kit colorimétrico de 10 rangos de color (PRODAC, pH 4,5 a 9,0). El control estadístico de procesos se empleó para estimar los parámetros poblacionales y medir la estabilidad del biosistema, garantizando que se mantuvieran dentro del rango de confort de las líneas genéticas, estratificando muestras semanalmente durante 100 días, ajustadas a 14 semanas. Los límites críticos se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Especificaciones de confort para el género *Oreochromis sp.*

Especificación	T (°C)	pH	O ₂ (mg/L)	NaCl (g/L)	Alcalinidad (mg/L)	TAN (mg/L)	NO ²⁻ (mg/L)
Especificación superior (<i>ES</i>)	29,02	8,01	7,660	6,0	260	1,02	0,29
Especificación inferior (<i>EI</i>)	25,46	6,87	4,610	0,4	0	0,00*	0,00*
Valor objetivo	27,24	7,44	6,135	3,2	130	0,00**	0,00***
Rango (<i>ES – EI</i>)	3,56	1,14	3,050	5,6	260	1,02	0,29

*No existe concentración segura de nitrógeno amoniacal total (NH₃ + NH⁴⁺) ni de ion nitrito (NO²⁻). **La información de las especificaciones *ES* y *EI* se fundamenta en la media aritmética de las fuentes bibliográficas consultadas. ***El valor objetivo es el ideal y se entiende como la mediana de las fuentes bibliográficas consultadas. **** Omweno et al, (2024).

Se utilizaron tres calentadores con termostato de 500W, 300W y 200W para ajustar la temperatura del agua a un nivel óptimo. Para el control de temperatura se utilizó una carta de media-desviación con subgrupos de 24 muestras. La salinidad, el oxígeno y la alcalinidad se supervisaron con una carta media-rango con subgrupos de 6 muestras. Los compuestos nitrogenados y el pH requirieron de un control de atributos, dado que los kits colorimétricos carecían de sensibilidad suficiente para determinar con precisión su valor numérico. Por ello, no se consideraron variables cuantitativas continuas o discretas, sino discretas dicotómicas, según lo detallado en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Especificaciones de muestreo estratificado del sistema de control estadístico de procesos (SPC) para el monitoreo de parámetros de calidad del agua.

Tipo de Variable	Aleatoria Continua		Aleatoria Discreta	Dicotómica
Tipo de Carta control	X-S	X-R	X-R	p
Parámetros	T(°C)	O ₂ (mg/L); NaCl (ppt)	Alcalinidad (mg/L)	TAN; NO ₂ ⁻ pH
Estimador para variación ($\pm 3\sigma$)	$\frac{3\bar{\sigma}}{0,98\sqrt{m}}$		$0,235 \cdot \bar{R}$	$z_m = \frac{p_m - \bar{p}}{\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_m}}}$ *
Métrica de capacidad		$C_p = \frac{ES-EI}{6\sigma}$; $\sigma = \frac{\bar{R}}{5,693}$		No aplica

*Proporción de defectos estandarizada, con media aritmética igual a cero y desviación estándar igual a 1. n : Número de muestras por semana; m : Número de semanas (14, al ser 100 días, son 14,2 semanas, sin embargo, se redondea a 14 debido al teorema del límite central).

El pH se delimitó a un rango de 6,5 a 8,0 según la guía del Kit PRODAC. Valores fuera de este límite se calificaron como "no conforme"; tras la estratificación semanal, se construyó la serie de tiempo y su carta de control \bar{p} -estandarizada (Acuña-Acuña, 2012). Para el TAN, se aplicó el método clásico de Emerson et al. (1975), clasificando como "defectuosas" concentraciones de 1,0 ppm. Se siguió el mismo procedimiento con el NO₂⁻, fijando el umbral en 0,2 ppm. En cuanto al nitrato, si la concentración superaba 160 ppm, se midió con soluciones en serie para sortear la limitante de sensibilidad del análisis. No se aplicó el modelo SPC, ya que incluso a niveles superiores a 300 ppm no representaba un riesgo para la salud ni el bienestar de los especímenes.

Se inspeccionaron sistemáticamente termómetros y caudales para garantizar una turbulencia y oxigenación adecuadas, verificando mortalidades y ajustando la ración según la disponibilidad de peces por tanque.

Con respecto a la alimentación, se utilizaron dos alimentos comerciales formulados específicamente para *Oreochromis* spp., el primero con una granulometría de 1,5 mm y un contenido de PC de 45%, y el segundo con 3 mm y 36% PC. Durante los días 25 al 31 del ensayo, se realizó una transición gradual de alimentos de 1,5 a 3,0 mm. La tasa de alimentación diaria fue de 7% de PV inicial, y se disminuyó en un 1% cada 2 semanas, ofreciéndose en tres

raciones por día: 30% a las 7-8 am, 30% a las 12-1 pm y 40% a las 4-5 pm. Al ofrecer el alimento, se admitió un lapso de 30 minutos para la ingesta; monitoreando la calidad del agua. El remanente alimenticio se pesó para estimar el desperdicio. Para calcular la oferta inicial rechazada, se realizó una estimación inicial de peso seco del alimento, cuantificando el peso de una muestra de 100 pellets de cada alimento por triplicado, para obtener un peso promedio de pellet y extrapolarlo a la cantidad de pellets húmedos no consumidos y recuperados, posteriormente al período de cada alimentación.

La medición de las variables morfológicas y de peso requirieron del uso de un protocolo de insensibilización con eugenol como anestésico (40 ppm). Finalizado el proceso, los peces se regresaron a su respectiva pecera, recuperándose después de 5 minutos.

La Figura 1 resume el proceso y árboles de decisión asociados al control operativo del entorno experimental.

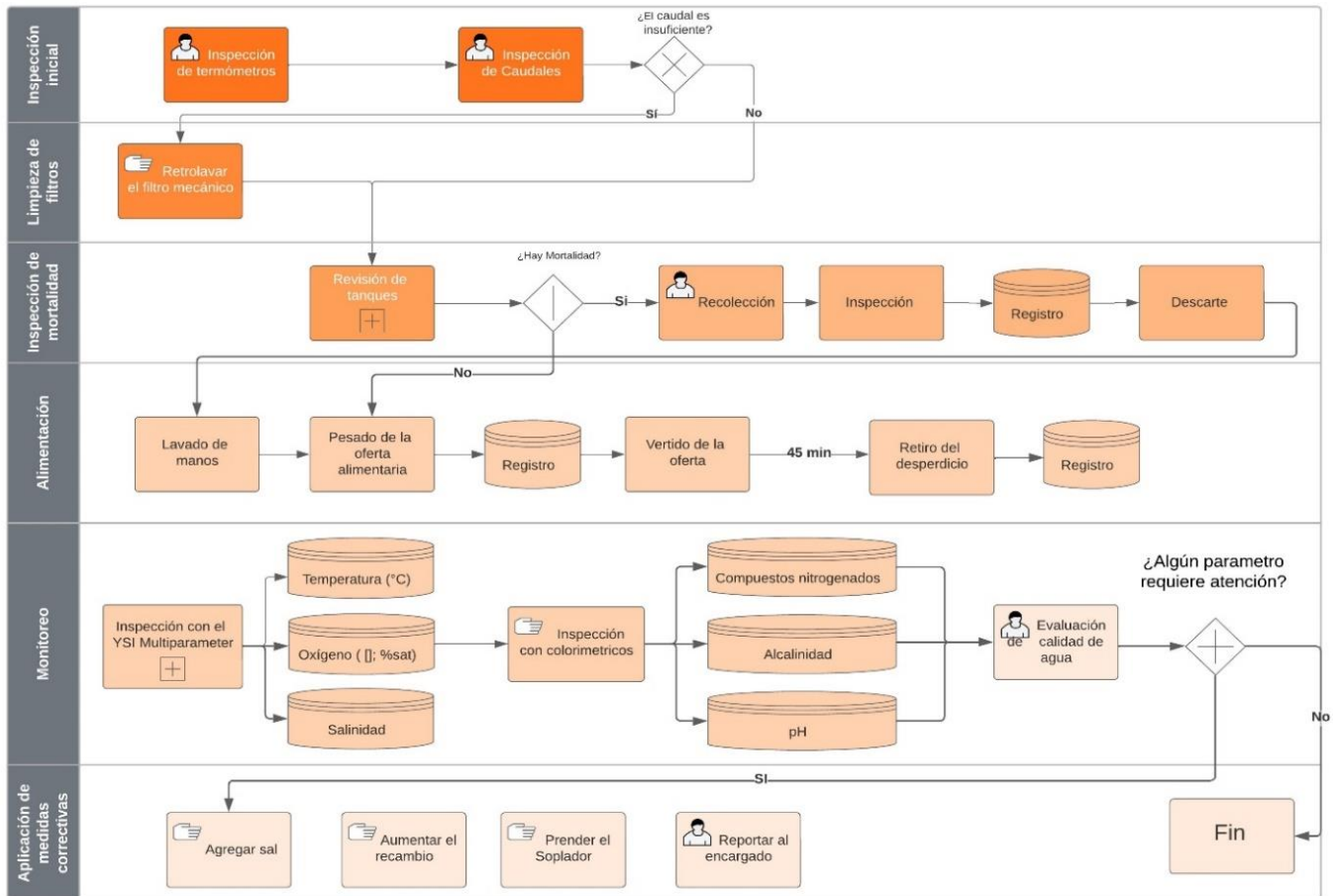


Figura 1. Proceso y árboles de decisión asociados al control operativo del entorno experimental.

VARIABLES EVALUADAS

Se estudiaron las variables de crecimiento: ganancia de peso total (GPT), incremento en longitud estándar (iSL) e incremento en longitud de ancho (iSW). Asimismo, también fueron estudiadas variables de eficiencia y rendimiento, tales como: consumo diario en función del peso vivo (BWD), mortalidad, relación macho:hembra, tasa específica de crecimiento (SGR), índice de Fulton (k-Fulton), factor de conversión alimenticia (FCR), coeficiente térmico de crecimiento (CTC), índice viscerosomático (iVS), relación cabeza cuerpo (RCC) y rendimiento a canal (RC).

Las ecuaciones utilizadas en la estimación de cada parámetro pueden visualizarse en el Cuadro 3. La GPT, iSL y iSW se estimaron quincenalmente por diferencia, utilizando una balanza granataria ($\pm 0,1$ g) y una regla T (mm). La ración diaria ofrecida se calculó a partir de la capacidad máxima de consumo de MS de los alevines, como porcentaje de la biomasa en las distintas fases de crecimiento. Esta ración se dividió en tres porciones: a las 07:00 h (30% del total), a las 13:00 h (30%), y finalmente, a las 17:00 h (40%). El consumo de alimento se estimó por diferencia, pesando la oferta y el rechazo después de un tiempo medio de espera de 30 minutos, posteriormente a cada ofrecimiento. La SGR se calculó al comparar el crecimiento promedio respecto al pesaje anterior. La mortalidad se registró en caso de encontrar algún cadáver durante las prácticas diarias.

Cuadro 3. Variables de desempeño zootécnico analizadas durante el estudio.

Parámetro	Ecuación utilizada
Ganancia de peso total	$GPT = \text{Peso}_{Final} - \text{Peso}_{Inicial}$
Incremento de longitud estándar	$iSL = SL_{Final} - SL_{Inicial}$
Incremento en longitud de ancho	$iSW = SW_{Final} - SW_{Inicial}$
Tasa específica de crecimiento (SGR)	$SGR = \left(\frac{\ln \text{peso final} - \ln \text{peso inicial}}{\text{tiempo (días)}} \right) * 100$
índice de Fulton (k-Fulton)	$K = \frac{\text{Peso}_{Final}}{LE_{Final}^3}$
Coefficiente térmico de crecimiento (CTC)	$CTC = \left(\frac{(\text{Peso final})^{1/3} - (\text{Peso inicial})^{1/3}}{\sum \text{Temp } (^{\circ}C)} \right) 1000$
Consumo diario en función del peso vivo (BWD)	$\% BWD = \frac{\text{consumo medio real}}{\text{peso}}$
Mortalidad	$\% Mortalidad = \frac{\text{Peces Iniciales} - \text{Peces finales}}{\text{Peces Iniciales}} * 100$
Factor de conversión alimenticia	$FCR = \frac{\text{Gramos consumidos de alimento}}{\text{Gramos producidos de biomasa}}$
Relación macho:hembra	$M:H = 10 \left[\frac{M}{n} \right] : 10 \left[1 - \frac{n}{n} \right]$
Índice viscerosomático (iVS)	$iVS = \frac{\text{Peso de las vísceras}}{\text{Peso final del pez}} * 100$
Relación cabeza-cuerpo (RCC)	$RCC = \frac{\text{Peso de cabeza}}{\text{Peso final}} * 100$
Rendimiento en canal (RC)	$RC = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso vísceras} - \text{Peso de cabeza}}{\text{Peso final}} * 100$

Al requerir el sacrificio de los animales, 18 horas posterior a su última alimentación, se insensibilizaron por inmersión en agua fría (≤ 10 °C) durante al menos 5 minutos. Seguidamente, se seccionó la médula espinal en la región cervical y se continuó con el descabezado, la extracción de los órganos internos, la clasificación y el pesaje por categoría (vísceras, cabeza y peso en canal) para determinar el iVS, RCC y RC de cada unidad experimental. Todos los procedimientos se realizaron con autorización del Comité Institucional para el Cuidado y Uso de los Animales (CICUA-053-2022) de la Universidad de Costa Rica.

Análisis estadístico

Los animales se distribuyeron bajo un diseño experimental completamente aleatorizado y unifactorial, con dos tratamientos y seis unidades experimentales por tratamiento. Se utilizó el peso inicial como covariable. El tanque se consideró como unidad experimental y, para el análisis, se empleó el valor promedio de cada variable por tanque. Se realizaron 4 repeticiones por tratamiento, para un total de 12 unidades experimentales.

Los análisis estadísticos y las gráficas de control de variables para los parámetros de calidad del agua se realizaron con el software SPSS Statistics 26 (IBM, 2017). Las variables respuesta se evaluaron con la prueba de Shapiro-Wilk para normalidad y la prueba de Levene para homocedasticidad. Cumplidos los supuestos de normalidad, la comparación de medias se efectuó con la prueba de T-Student (5 grados de libertad). En caso contrario (heterocedasticidad), se usó la prueba T-Student con el corrector de Welch. La variable discreta relación macho:hembra se evaluó con la prueba de bondad de ajuste de chi-cuadrado. Si no se encontraban diferencias significativas, se aplicó la prueba de máxima verosimilitud para determinar cuál proporción observada era más probable.

Para las variables de crecimiento influenciadas por el peso inicial, modelo estadístico general fue:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta X_{ij} + \epsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} : valor observado de la variable respuesta en el j-ésimo tanque correspondiente a la i-ésima línea genética.

μ : media general.

τ_i : efecto fijo de la i-ésima línea genética.

X_{ij} : peso inicial promedio de los peces en el j-ésimo tanque de la i-ésima línea genética.

B: coeficiente de regresión

ϵ_{ij} : error aleatorio asociado al j-ésimo tanque dentro de la i-ésima línea genética.

RESULTADOS

Aspectos de control

En la Figura 2 se detallan las variables cuantitativas, resultantes del control estadístico a través de todo el período experimental. Las temperaturas fluctuaron entre 23,3 °C y 25,0 °C, con un índice de capacidad de 0,532 (la variabilidad de $\pm 3\sigma$ fue dos veces mayor que el rango de confort), mostrando un patrón inestable y fuera de las especificaciones en todos los días de ensayo.

Alrededor del día 75 se registró una caída drástica en el oxígeno disuelto, el cual ya se mantenía por debajo de las 5 ppm desde el día 50. El aumento observado en la salinidad fue intencional, como parte de un tratamiento terapéutico externo ante posibles afectaciones cutáneas y lesiones. Por su parte, la alcalinidad se mantuvo en un rango de 72 a 108 ppm, con una media de 87 mg/L, un índice de capacidad de 4,738 y una inestabilidad de 42,800%, sin superar en ningún momento los límites de confort.

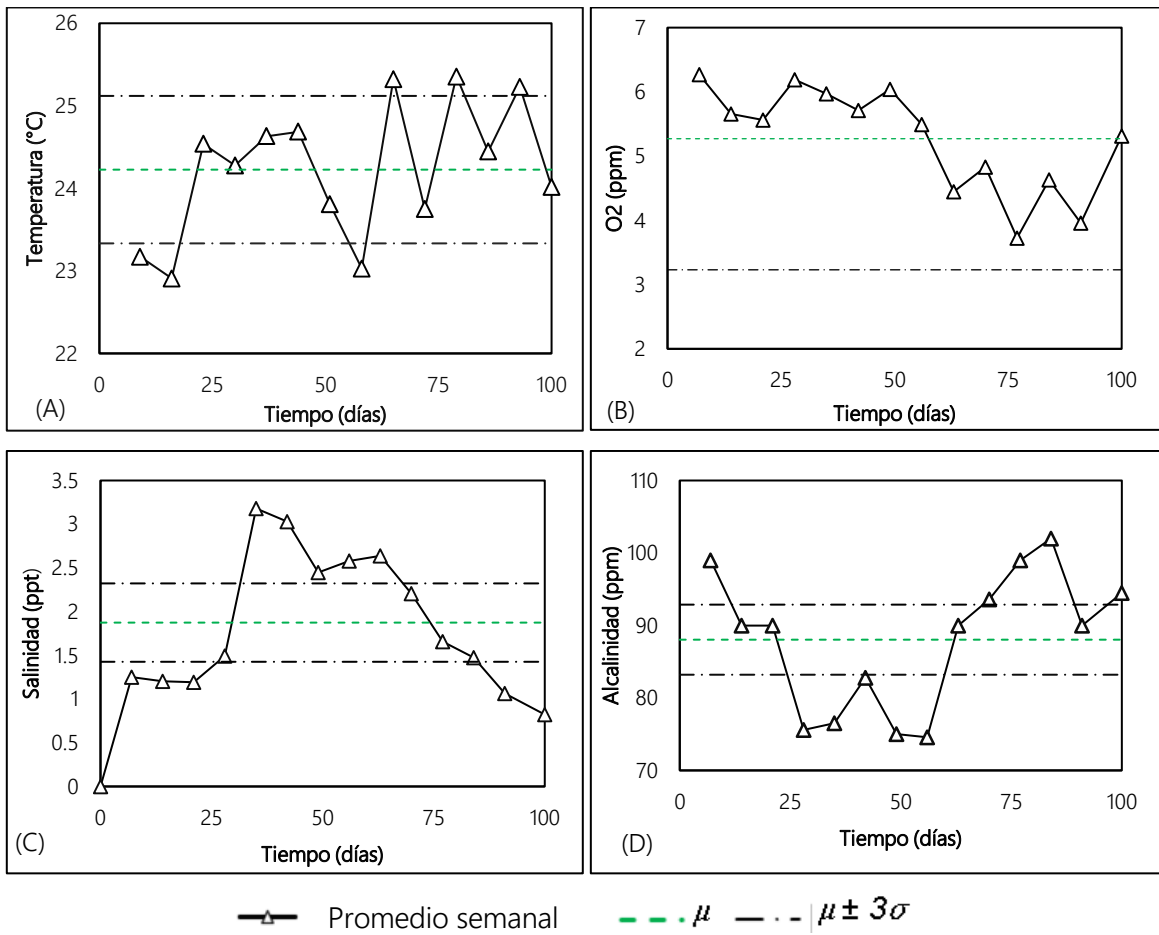


Figura 2. Cartas de control de las variables cuantitativas; (A) temperatura, (B) oxígeno disuelto, (C) salinidad, y (D) alcalinidad para el sistema RAS.

*La línea verde denota el valor medio esperado en la distribución normal. Líneas punteadas negras marcan límites de ajuste (99,73% de las observaciones en función de la desviación estándar poblacional estimada).

La Figura 3 muestra que el pH se comportó sin incidencias considerables, solamente se dio una excepción hacia el día 60 que se estabilizó con prontitud.

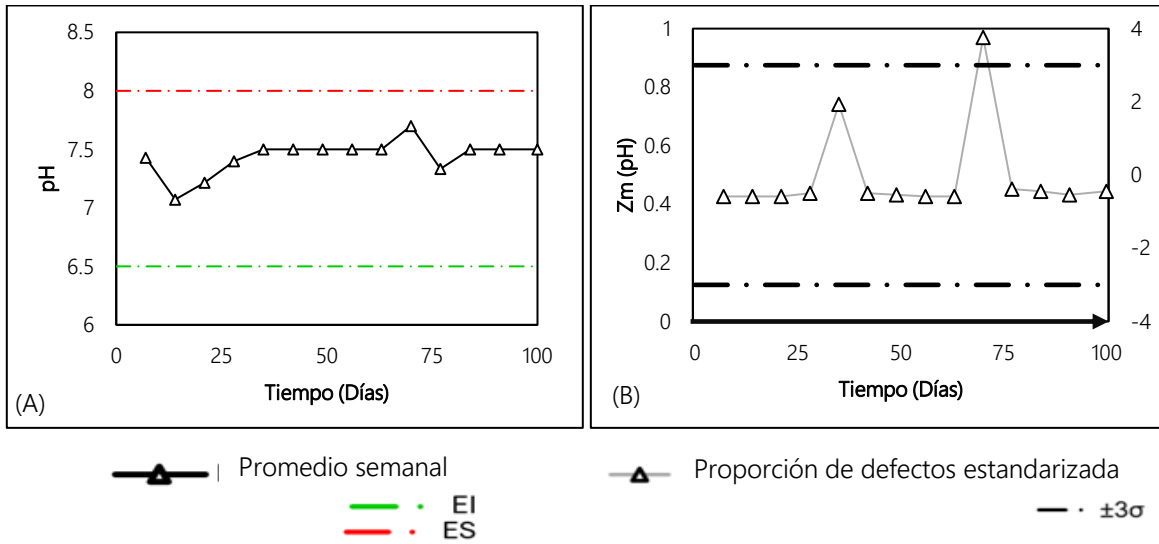
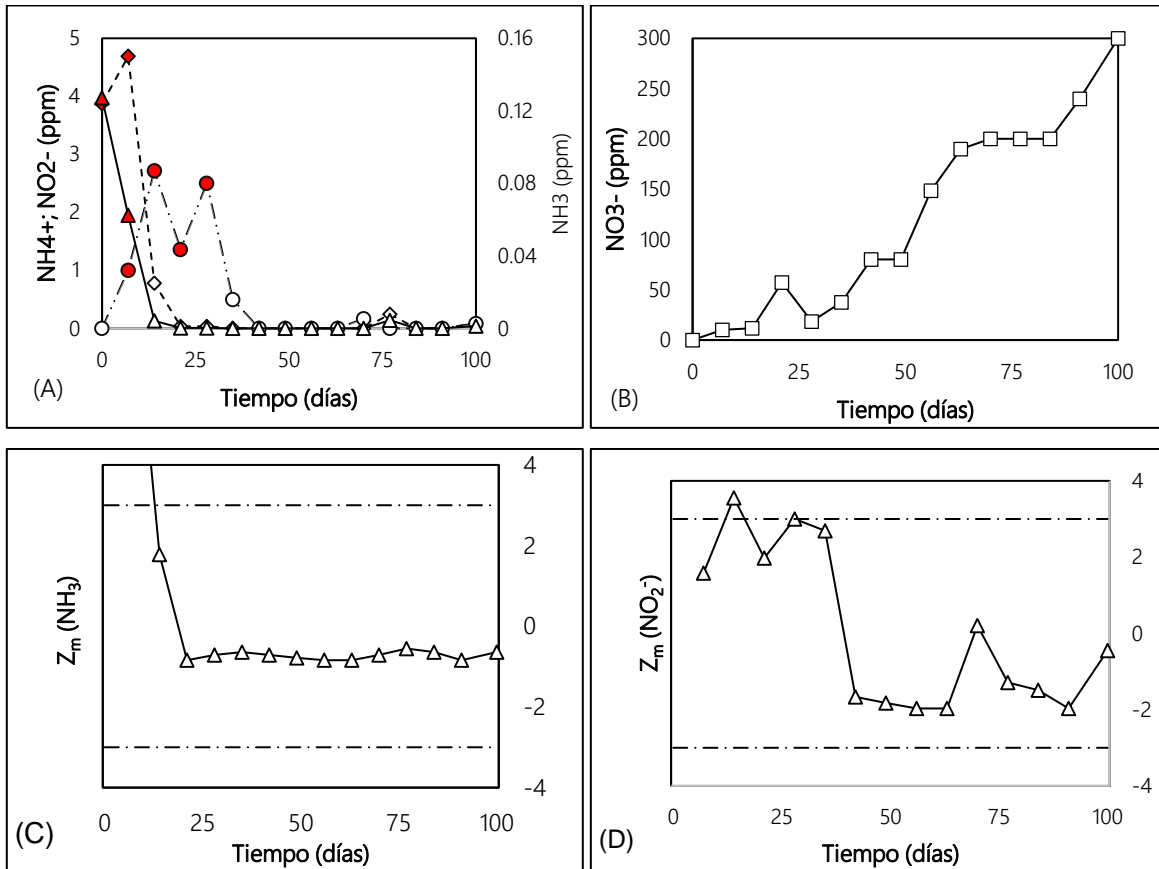


Figura 3. Parámetros de control del pH: (A) serie temporal, (B) Carta p-estándar.

* Z_m es la proporción de defectos estandarizada. En (B), la media tiene un valor de cero y la desviación estándar es igual a 1.

La dinámica de los compuestos nitrogenados es expuesta en la Figura 4. El TAN ($\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$) presentó concentraciones iniciales elevadas que disminuyeron marcadamente en los primeros 25 días, manteniéndose bajas el resto del periodo. La concentración de NO_2^- mostró una tendencia similar al principio, aumentando hasta el día 15 y estabilizándose el día 28, desde donde decae y no vuelve a elevarse. En cuanto al nitrato, su prevalencia fue alta. El nitrito alcanzó el límite crítico entre los días 8 y 28, superando el límite especificado en el 100% de las ocasiones durante este periodo. Los valores elevados iniciales de nitrógeno amoniacal y nitritos fueron consistentes con una maduración incompleta del biofiltro al inicio del ensayo, condición asociada a limitaciones temporales y logísticas, la cual se mitigó mediante recambios de agua más frecuentes y de mayor volumen hasta su estabilización. La Figura 5 permite visualizar la mortalidad y dinámica de los nitritos respecto al tiempo para ambos tratamientos.



▲ Proporción de defectos estandarizada ◆- NH_4^+ ▲- NH_3 ○- NO_2^- □- NO_3^- - · ±3σ

Figura 4. Control de compuestos nitrogenados: (A) ion amonio, amoniaco, nitrito, (B) nitrato, (C) y (D), cartas de control \bar{p} -estandarizada para el amoniaco y el nitrito, respectivamente.

*En (A) se muestran los valores medios por semana para cada compuesto, el punto rojo indica una concentración potencialmente letal. ** Z_m es la proporción semanal de defectos estandarizada. ***El amoniaco se lee en eje secundario, esto por la diferencia en escala respecto a las demás concentraciones.

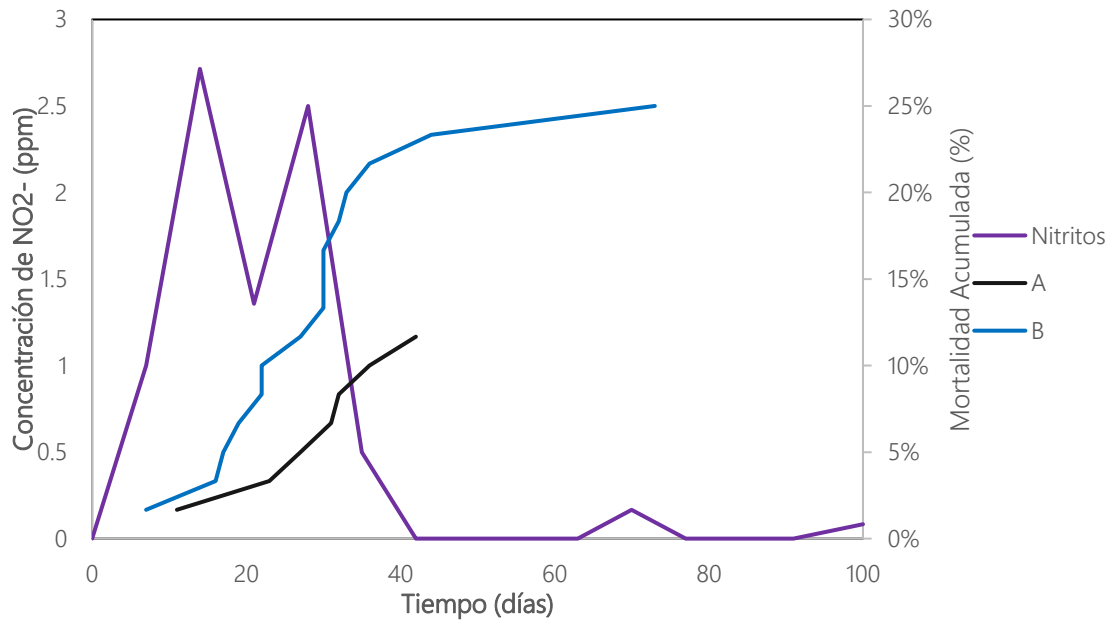


Figura 5. Mortalidad y dinámica de los nitritos respecto al tiempo para ambos tratamientos. *La mortalidad se lee en eje secundario y es un porcentaje. A: *Oreochromis aureus*. B: *Oreochromis nilóticus* x *Oreochromis áureus* var. Rocky Mountain White.

Parámetros de crecimiento

En el Cuadro 4 se presenta el efecto de la línea genética sobre los indicadores de crecimiento de tilapia después de un periodo experimental de 100 días, comparando a *Oreochromis aureus* y *Oreochromis* "Rocky Mountain White" en cuanto a peso, tallas y tasas de crecimiento.

Cuadro 4. Efecto de la línea genética sobre los indicadores de crecimiento para 100 días del período experimental*.

Parámetro	<i>Oreochromis aureus</i>			<i>Oreochromis</i> "Rocky Mountain White"			p**
	Inicial	Final	Δ	Inicial	Final	Δ	
Peso (g)	31,25±0,86	145,81±11,97	114,55±0,91	46,45±0,91	131,35±8,41	84,90±7,83	0.01
Long. estándar (mm)	96,00±0,95	155,76±3,87	59,76±3,33	110,54±0,80	152,61±2,81	42,07±2,55	0.05
Ancho estándar (mm)	36,06±0,49	60,88±2,10	24,82±1,62	40,78±0,48	56,60±1,68	15,81±1,27	0.00
SGR-(%PV/día)		1,52±0,17			1,03±0,13		0.00
Factor K-Fulton		3,80±0,07			3,67±0,05		0.05
CTC (x10 ³)		1,04±0,16			0,74±0,11		0.00

*Formato: $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$ (\bar{x} : media aritmética; $\sigma_{\bar{x}}$: error estándar de la media). **Valor de p sobre Δ Final e Inicial para peso, longitud estándar y longitud de ancho.

Los peces *Oreochromis aureus* presentaron un incremento promedio de peso significativamente mayor ($p = 0.01$; $\Delta GPT = 114,55 \pm 0,91$ g) en comparación con *Oreochromis* "Rocky Mountain White" ($\Delta GPT = 84,90 \pm 7,83$ g). De manera consistente, también se observó un mayor aumento en la longitud estándar en *O. aureus* ($59,76 \pm 3,33$ cm; $p = 0.05$) frente a la otra línea ($42,07 \pm 2,55$ cm).

En cuanto al ancho estándar, *O. aureus* alcanzó valores superiores ($\Delta iSW = 24,82 \pm 1,62$ cm; $p < 0.01$), mientras que *O.* "Rocky Mountain White" registró $15,81 \pm 1,27$ cm. No obstante, la tasa de crecimiento lineal no mostró diferencias significativas entre grupos ($p = 0.56$).

Por su parte, la tasa de crecimiento específico fue mayor en *O. aureus* ($1,52 \pm 0,17$ %PV/día) en comparación con *O.* "Rocky Mountain White" ($1,03 \pm 0,13$ %PV/día), con diferencias significativas ($p < 0.01$). Asimismo, el índice de Fulton (k-Fulton) difirió entre ambos grupos ($p \leq 0.05$), con valores de $3,80 \pm 0,07$ para *O. aureus* y $3,67 \pm 0,05$ para la otra línea.

Finalmente, el coeficiente térmico de crecimiento (CTC) fue superior en *O. aureus* ($1,04 \pm 0,16 \times 10^3$), en contraste con *O. "Rocky Mountain White"* ($0,74 \pm 0,11 \times 10^3$), mostrando también diferencias significativas ($p < 0.01$). En conjunto, estos resultados indican que *Oreochromis aureus* presenta una ventaja en términos de crecimiento y condición corporal general bajo las condiciones evaluadas.

Parámetros de eficiencia y rendimiento

En el Cuadro 5, se muestra el efecto de la línea genética sobre los indicadores de eficiencia a lo largo de un periodo experimental de 100 días. Un mayor porcentaje de biomasa consumida diariamente se presentó ($p < 0.001$) para *Oreochromis aureus* (%BWD, $2,17 \pm 0,42$), en comparación con *Oreochromis "Rocky Mountain White"* ($1,2 \pm 0,24$), asociado a una tasa de crecimiento superior. Esto sugiere una mayor eficiencia en la utilización de recursos proteicos y energéticos, lo que se evidencia en el índice de conversión alimenticia, *Oreochromis aureus* exhibió un FCR significativamente menor ($1,31 \pm 0,08$; $p = 0.009$) que *Oreochromis "Rocky Mountain White"* ($1,81 \pm 0,13$).

Cuadro 5. Efecto de la línea genética en el consumo respecto al peso corporal (%BWD) y la conversión alimenticia (FCR) en función del tiempo.

Tiempo (días)	%BWD			FCR		
	<i>O. aureus</i>	H. Rocky	Probabilidad	<i>O. aureus</i>	H. Rocky	Probabilidad
0-16	2,50±0,60	1,81±0,35	<0001	1,12±0,03	1,37±0,08	0.019
17-30	2,28±0,41	1,27±0,26	<0.001	1,31±0,06	2,63±0,64	0.068
31-44	2,42±0,28	1,49±0,15	0.004*	1,43±0,20	1,74±0,16	0.238
45-58	2,23±0,36	1,22±0,14	0.005*	1,44±0,14	1,91±0,28	0.159
59-73	2,04±0,37	0,90±0,15	<0.001	1,23±0,08	1,73±0,11	0.005
74-86	1,81±0,38	0,86±0,17	0.005	1,08±0,13	1,78±1,50	0.207
87-100	1,81±0,39	0,70±0,15	0.004*	1,65±0,20	1,83±0,90	0.435*
Global	2,17±0,42	1,20±0,24	<0.001**	1,31±0,08	1,81±0,13	0.009

* No se cumple el supuesto de homocedasticidad **Formato de $\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}}$ (\bar{x} : media aritmética; $\sigma_{\bar{x}}$: error estándar de la media). *O. aureus* abrevia a *Oreochromis aureus*, H. Rocky abrevia a *Oreochromis* "Rocky Mountain White".

En cada intervalo evaluado, *Oreochromis aureus* mostró un mayor %BWD que *Oreochromis* "Rocky Mountain White" ($p < 0.05$), incluso cuando no se cumplió el supuesto de homocedasticidad. Los valores de FCR fueron menores en *O. aureus* en la mayoría de los períodos, aunque en algunos intervalos, la diferencia no fue significativa ($p > 0.05$). Durante los días 0-16 ($p = 0.019$) y 59-73 ($p = 0.005$), *O. aureus* mostró una conversión más eficiente, coincidiendo con los períodos de mayor crecimiento relativo. Mientras que en las fases intermedias (días 31-44 y 45-58) y finales (días 87-100) no se dieron diferencias en FCR ($p > 0.05$).

El Cuadro 6 muestra cómo no se identificaron diferencias significativas atribuibles a la línea genética ($p > 0.05$) en términos del rendimiento. Los valores se encontraron entre un $68 \pm 3\%$ para el rendimiento en canal, una relación cabeza-cuerpo del 20% y un índice viscerosomático

de 8%, lo cual es lo esperado según la literatura (Torres-Castillo, 2019; Khanjani et al., 2022; Triana-García et al. 2013). La mortalidad fue significativamente menor en *Oreochromis aureus* ($12,0 \pm 0,4\%$; $p=0.046$), comparativamente con *Oreochromis* "Rocky Mountain White" ($25,0 \pm 0,4\%$).

Cuadro 6. Efecto de la línea genética sobre el rendimiento.

Parámetro	<i>O. aureus</i>	H. Rocky	Probabilidad
Relación Macho:Hembra*	2,3:1	1,5:1	0.220
iVS (%)	$7,85 \pm 0,52$	$7,70 \pm 0,62$	0.660
RCC (%)	$19,98 \pm 1,07$	$20,01 \pm 0,98$	0.960
%RC	$68,60 \pm 0,79$	$67,89 \pm 3,25$	0.620
Mortalidad (%)	$12,00 \pm 0,40$	$25,00 \pm 0,40$	0.046

O. aureus abrevia a *Oreochromis aureus*, H. Rocky abrevia a *Oreochromis* "Rocky Mountain White".

La Figura 6 ilustra el efecto del sexo sobre el rendimiento, donde los diagramas de caja evidencian las diferencias de rendimiento entre machos y hembras.

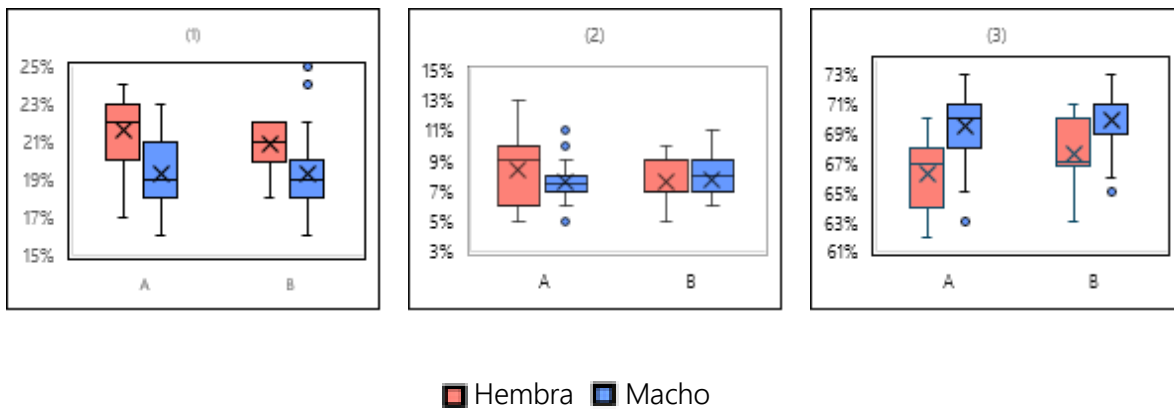


Figura 6. Efecto del sexo en el rendimiento: Relación cabeza cuerpo (1), índice viscerosomático (2), rendimiento en canal (3). *Oreochromis aureus* (A) y *Oreochromis niloticus* x *Oreochromis aureus* var. Rocky Mountain White (B).

A pesar de las similitudes, los machos tienden a presentar valores más bajos y mayor uniformidad en la relación cabeza-cuerpo. Estas métricas tienden a ser menores en *Oreochromis* "Rocky Mountain White".

El índice viscerosomático fue similar para ambos sexos en las dos líneas genéticas, con una tendencia a ser ligeramente mayor en hembras *O. aureus* y ligeramente menor en hembras Rocky Mountain, respecto a los machos de la misma línea genética. En cuanto al rendimiento en canal, los machos superaron a las hembras por un 3%-4% en ambas líneas, lo que sugiere que esta diferencia se debe mayormente a las diferencias en RCC, más que a las diferencias en IVS entre sexos.

Modelos de predicción de peso en función del ancho y el largo

En el caso del *Oreochromis aureus*, se obtuvo un modelo lineal para un R^2 ajustado de 0,9809 y un modelo exponencial para un R^2 ajustado 0,9934 expresado por las rectas:

$$Y = -160,1238 - 0,7633LE + 6,8837SW \quad Y = 4,436320744e^{(0,017046267LE + 0,01487705790SW)}$$

(lineal) (exponencial)

Para *Oreochromis* "Rocky Mountain White", se obtuvo un modelo lineal para un R^2 ajustado de 0,9420 y un modelo exponencial para un R^2 ajustado de 0,977 expresado por las ecuaciones:

$$y = -190,6597 + 1,5751LE + 1,3606SW \quad Y = 3,96853509e^{(0,023087055LE + 0,000328206SW)}$$

(lineal) (exponencial)

El error estándar del modelo lineal fue 5,74 para *Oreochromis aureus* y 7,10 para *Oreochromis* "Rocky Mountain White" (CVRMSE de 5,97% y 7,44%, respectivamente). Mientras que el error estándar del modelo exponencial fue 5,49 para *Oreochromis aureus* y 8,399 para *Oreochromis* "Rocky Mountain White" (CVRMSE de 7,07% y 10,43%, respectivamente).

DISCUSIÓN

Parámetros de calidad de agua

El 79,60% de los datos se ubicó por debajo del límite inferior de especificación, lo cual coincide con un índice de capacidad de 0,53 y una inestabilidad del 42,80%. En conjunto, estos resultados sugieren que el biosistema implementado no logró mantener de forma consistente un rango de confort para los parámetros evaluados (Pineda et al, 2023; Espinoza et al, 2024). Estos hallazgos difieren de lo reportado por Salazar-Murillo et al. (2023), quienes, trabajando en la misma ubicación, pero con un biosistema de recirculación tradicional y una configuración distinta, registraron temperaturas entre 23 °C y 28 °C.

Ante esta problemática, considerar a futuro una fuente energética alternativa, como el biogás, para alimentar un sistema de calentamiento controlado mediante dispositivos programables, podría representar una opción viable (Zúñiga-Vargas, 2024). En este contexto, el uso de cartas de control de media-desviación estándar permitió estimar los parámetros poblacionales, ajustando las observaciones a una función de densidad de probabilidad. A partir de este análisis, se determinó que la probabilidad de registrar valores superiores a 25 °C es inferior al 0,27%, por lo que alcanzar temperaturas de 28 °C en este estudio resultó altamente improbable.

Estas diferencias pueden atribuirse, en parte, a modificaciones en la infraestructura del sistema entre experimentos. Mientras que Salazar-Murillo et al. (2023) utilizaron un techado de plástico de polietileno transparente, en el presente estudio se empleó un techo negro-blanco de HDPE, lo cual pudo influir en el calentamiento por radiación solar, generando un incremento térmico diurno más lento. La alcalinidad del proceso, pese a no ser consistente, requirió una variación de al menos 14 desviaciones estándar para romper las especificaciones del parámetro, lo cual es absolutamente improbable dado que la densidad de siembra fue baja (6,5 kg/m³) (Araujo et al, 2022). Se hizo necesario también el recambio diario de agua del 5% para lavar los filtros y no fue necesario agregar carbonatos para estabilizarlo en ningún momento. El agua utilizada,

proveniente del Parque Ambiental Río Loro, y que cumple con la norma técnica ISO 9001:2008, al ser tratada por el municipio de Cartago, no requirió de la adición de carbonatos para mantenerla dentro de las especificaciones de confort de la especie. Esto fue corroborado vía análisis colorimétrico por titulación, que arrojó valores alrededor de 70 mg/L CaCO₃ para el agua utilizada para recambios.

Aunque inicialmente el oxígeno disuelto se mantuvo controlado y estable, a partir del día 50 se observó un deterioro progresivo, con valores que pasaron de un rango entre 5 y 7 ppm hasta alcanzar 3,7 ppm. En consecuencia, el índice de capacidad se redujo a 0,78, con una concentración media de 5,27 ppm y una saturación del 65,8%. Este comportamiento puede explicarse por el aumento en el crecimiento de los peces, lo que incrementa la demanda de oxígeno y se asocia con una tendencia a la disminución del O₂ y al aumento del NO₃⁻, especialmente al no contar el sistema con un módulo de desnitrificación (Galván y Ríos, 2013). Adicionalmente, la maduración del biofiltro favorece el crecimiento de microorganismos saprobiontes y nitrificantes, elevando la demanda bioquímica de oxígeno, lo cual se evidencia en la correlación observada ($R^2 [O_2; NO_3^-] = -0,76$) (Wongkiew et al, 2017). Por otra parte, el filtro mecánico empleó un material con un tamaño de partícula inferior al óptimo, lo que redujo la hidrodinámica del sistema, aumentó su susceptibilidad a la saturación y limitó la difusión de oxígeno entre la atmósfera y el agua, incluso con la implementación de un soplador auxiliar en el biofiltro.

La salinidad experimentó una variación menor que la variación tolerada, lo que indica que se controló adecuadamente en el sistema RAS tradicional. Esto concuerda con los valores mínimos observados en estudios similares de 0,5 g/L por Salazar-Murillo et al. (2023) y por Zumbado-Salas et al. (2022). El valor máximo observado fue similar a los 3 g/L de Zumbado-Salas et al. (2022) y a los 2 g/L de Salazar-Murillo et al. (2023).

El sistema RAS logró estabilizar el pH sin necesidad de intervenciones, gracias a la elevada capacidad tampón conferida por la alcalinidad. En efecto, solo en un 6,2% de las mediciones el pH superó 7,5 y en ningún caso descendió por debajo de 7,0. Estos resultados representan

una mejora respecto a lo reportado por Salazar-Murillo et al. (2023), quienes indican un rango más amplio (6–9). Para el presente estudio, se estableció una tolerancia mínima de 7, en función de la resolución analítica de los equipos de medición utilizados.

En cuanto a los compuestos nitrogenados, se observó que, conforme disminuyeron el amoniaco y el amonio, aumentaron los nitritos y nitratos. Este comportamiento podría atribuirse al incremento de la actividad de microorganismos nitrificantes entre los días 0 y 20, seguido de una posible estabilización del sistema (Wongkiew et al., 2017; Hai et al, 2018)). La ausencia de nitrógeno amoniacal hacia el día 15 coincidió con la presencia de nitritos entre los días 6 y 35. Dado que no se dispone de una concentración aceptable de referencia para nitritos en este contexto, se estableció como criterio su presencia o ausencia, considerando 0,25 ppm como el límite mínimo detectable.

Las concentraciones de nitritos registradas en este periodo superan las 0,52 ppm reportadas por Zumbado-Salas et al. (2022). Cabe destacar que, dentro de los compuestos nitrogenados, el amoniaco constituye el parámetro de mayor criticidad debido a su toxicidad (Wongkiew et al., 2017). Además, su grado de ionización en solución acuosa aumenta de forma directamente proporcional al pH y la temperatura, según lo descrito por Francis-Floyd et al. (2025).

A partir del día 25 se observó un aumento progresivo en la concentración de nitrato, acompañado de una disminución del nitrógeno amoniacal, nitrito y oxígeno. Este patrón concuerda con los procesos de amonificación de la materia orgánica y la posterior nitrificación: oxidación del amonio a nitrito por microorganismos como *Nitrosomonas europaea* y, posteriormente, a nitrato por *Nitrobacter winogradski* (Galván y Ríos, 2013).

Dicho microbioma requiere madurar por al menos 36 días para soportar una carga biológica de 6,5 kg/m³, siendo la siembra anticipada la causa atribuible a la presencia de nitrógeno amoniacal y nitrito. El cumplimiento del ciclo del nitrógeno queda evidenciado por la correlación entre las concentraciones de oxígeno disuelto y nitrato ($R^2 [O_2; NO_3^-] = -0,76$), lo que conduce al aumento en la demanda bioquímica de oxígeno por parte del microbioma (Wongkiew et al., 2017).

Comportamiento de las variables de crecimiento a través del tiempo

A pesar de la ausencia de diferencias en la tasa de crecimiento lineal ($p > 0.05$), *O. aureus* mostró una mayor tasa de crecimiento específico, asociada a una mejor tolerancia a temperaturas subóptimas, consistente con su coeficiente térmico (Pineda et al, 2023; Espinoza et al, 2024). En 100 días, pasó de 15 g por debajo a 15 g por encima de H. Rocky. Los modelos ajustados para predecir el peso en función del longitud estándar (LE) y el ancho del pez (SW), muestran que los modelos exponenciales presentan un mejor ajuste en ambas líneas genéticas, comparados con los modelos lineales. Esto se evidencia en los valores del coeficiente de determinación ajustado (R^2), donde los modelos exponenciales alcanzan 0,9934 y 0,9770, respectivamente para *Oreochromis aureus* y *Oreochromis* "Rocky Mountain White", esto en contraste con los modelos lineales que presentaron valores de 0,9809 y 0,9420.

Los modelos exponenciales presentaron errores estándar menores que los lineales; sin embargo, la variabilidad relativa del error (CVRMSE) fue ligeramente superior. Salazar-Murillo et al. (2023) reportan un R^2 ajustado de 0,991, similar al obtenido para *Oreochromis aureus* en este estudio ($R^2 = 0,9934$), aunque con un error promedio inferior al $\pm 5\%$, lo que indica alta capacidad predictiva. Si bien el modelo exponencial aquí desarrollado mostró un mejor ajuste, la menor magnitud de error del modelo de Salazar-Murillo et al. (2023) sugiere una posible ventaja en términos de aplicabilidad en sistemas de producción comercial.

El género *Oreochromis* tolera temperaturas inferiores a 25 °C; sin embargo, los coeficientes de ajuste de los modelos estadísticos sugieren una mayor sensibilidad de *O. aureus* durante el presente ensayo. A pesar de ello, esta especie mostró mayores tasas de crecimiento que *Oreochromis* "Rocky Mountain White", lo que se refleja en una mayor variabilidad del peso predicho en comparación con la línea híbrida. En términos relativos, los errores fueron de 50,23% y 78,55% respecto a lo reportado por Arce-Vega (2014) para ambas líneas genéticas, bajo un sistema de circulación continua con temperaturas entre 24,2 °C y 27,11 °C.

Aunque ambas líneas tuvieron en esta investigación rendimientos inferiores entre 23,3 °C y los 25,1 °C, se denotó un error relativo superior para *Oreochromis* "Rocky Mountain White", que presentó mayores dificultades para crecer y desarrollarse. Otros autores han reportado

también tasas de crecimiento muy bajas (SGR < 1%-2%), inclusive en fases iniciales de desarrollo bajo temperaturas de 22-23 °C para esta línea (Espinoza-Quesada et al., 2024); lo que refuerza que este híbrido no presenta un desempeño favorable a bajas temperaturas.

Comportamiento de las variables de eficiencia a través del tiempo

La mayor concentración de TAN y NO_2^- se alcanzó entre los días 7 y 14 (Figura 4A). Aunque la exposición prolongada (especialmente al NO_2^-) incrementó la mortalidad en ambas líneas genéticas, *O. aureus* se mostró más resistente que Rocky Mountain White. Xiao et al. (2020) y Salazar-Murillo et al. (2023) señalan que *Oreochromis aureus* puede sobrellevar mejor las condiciones adversas planteadas, es decir exposición prolongada a compuestos nitrogenados en un medio con rangos de temperatura inferiores al ideal.

El incremento en la mortalidad coincidió con la oxidación del TAN y la consecuente acumulación de NO_2^- , lo que sugiere una mayor letalidad de este compuesto bajo condiciones de pH no elevado (Abakari et al; 2021). Este ion interfiere con el transporte de oxígeno en hemoglobina y mioglobina al actuar como agente redox del grupo hemo, tal como señalan Castrillón-Fernández et al. (2008). Esta alteración se evidenció al inspeccionar las branquias de los individuos fallecidos entre los días 8 y 36, las cuales presentaban una coloración pálida. Adicionalmente, el menor ritmo de crecimiento de *Oreochromis* "Rocky Mountain White" podría implicar un mayor estrés térmico a bajas temperaturas, lo que contribuiría a este escenario y a las diferencias de mortalidad observadas (Nitzan et al, 2019).

En relación con el consumo de alimento, la disminución de la ración diaria respecto al peso corporal observada en ambas líneas coincide con lo reportado en la literatura (Lugert et al., 2014; Vélez et al., 2017) y con lo predicho por el modelo de crecimiento de von Bertalanffy (Arce-Vega, 2014; Lugert et al., 2014). La mayor ingesta relativa en *Oreochromis aureus* sugiere una mejor adaptación a las condiciones del ensayo, mientras que el menor consumo en la línea "Rocky Mountain White" podría estar asociado a su menor desempeño bajo estas condiciones. Esta última mantuvo una ración superior durante los 100 días de ensayo, lo que podría estar

asociado a una mayor eficiencia metabólica o adaptación a las condiciones evaluadas, como ha sido descrito en tilapias bajo condiciones similares (Lugert et al., 2014; Vélez et al., 2017).

Con respecto a la conversión alimenticia, se observaron diferencias significativas entre ambas líneas genéticas ($p < 0.05$), siendo *Oreochromis aureus* más eficiente en la conversión de nutrientes. Algunos autores reportan que esta especie es más rústica y soporta mejor las variaciones térmicas y la exposición a compuestos nitrogenados tóxicos (NH_3 ; NH_4^+ ; NO_2^-) (Pineda et al., 2023), lo que podría explicar parcialmente el comportamiento observado en el presente ensayo. Espinoza et al. (2024) reportaron una tasa específica de crecimiento (SGR) de 4,10% en alevines de *Oreochromis* "Rocky Mountain White" (peso inicial de 0,3 g) a 27 °C, quintuplicando su peso en 59 días. En contraste, a 22 °C la SGR disminuyó a 1,80%, lo que evidencia un menor desempeño del híbrido a temperaturas más bajas y sugiere que no presenta mejores aptitudes de crecimiento que *Oreochromis aureus* en el rango de 23,3 °C a 25,0 °C (Pineda et al, 2023; Espinoza et al, 2024). De forma consistente, en el presente estudio, *O. aureus* no solo mostró una mayor ingesta relativa de alimento, sino también una mejor eficiencia de conversión, con valores de FCR inferiores o, en su defecto, similares a los de la línea híbrida en todos los muestreos.

Resulta relevante analizar la relación temporal entre el pico de mortalidad y la disminución en la aceptación y conversión del alimento, particularmente en la línea híbrida. La menor ingesta relativa observada en *Oreochromis* "Rocky Mountain White" entre los días 17 y 30, junto con una conversión sin diferencias significativas ($p > 0.05$), sugiere que el deterioro productivo no se debió únicamente a la eficiencia alimenticia, sino a factores de estrés subyacentes.

En este sentido, la mortalidad acumulada parece asociarse con la exposición prolongada a compuestos nitrogenados, especialmente nitritos, los cuales son ampliamente reconocidos por su impacto negativo sobre la fisiología de los peces y su capacidad de transporte de oxígeno (Castrillón-Fernández et al., 2008). La presencia de estos compuestos coincide con episodios de inapetencia en ambas líneas, lo que refuerza su efecto adverso sobre el desempeño. Sin embargo, la mayor mortalidad registrada en la línea híbrida sugiere una menor tolerancia o rusticidad frente a estas condiciones de estrés.

El FCR de *Oreochromis aureus* fue superior al 0,75 reportado por Salazar-Murillo et al. (2023). Aunque la exposición a compuestos nitrogenados podría explicar parcialmente esta diferencia, el hecho de que, aun tras su desaparición, no se alcancen dichos valores sugiere la intervención de otros factores. En este sentido, Sarkheil et al. (2024) reportaron FCR similares a los obtenidos en el presente estudio (1,18–1,67) para peces en una fase de desarrollo comparable (82-134 g). Dado que las condiciones de temperatura fueron equivalentes, este factor puede descartarse como la causa principal de las diferencias observadas.

En este contexto, factores adicionales como la iluminación podrían haber influido en el desempeño observado. López-Betancur et al. (2020) señalan que una iluminación insuficiente reduce la respuesta a estímulos, generando inapetencia y, en consecuencia, menores tasas de crecimiento, debido a la alteración de los ritmos circadianos en especies del género *Oreochromis*.

Bajo esta premisa, las diferencias en el material de techado del módulo acuícola entre el estudio de Salazar-Murillo et al. (2023) y el presente trabajo podrían explicar parcialmente la menor ingesta y crecimiento registrados. No obstante, este factor no fue medido directamente, por lo que su efecto no puede establecerse de manera concluyente.

Parámetros de rendimiento

La proporción entre la cantidad de machos y hembras es un determinante elemental del rendimiento, por dos aspectos nada triviales. En primera instancia *Oreochromis aureus* y su homólogo híbrido, alcanzan la madurez sexual 150 días posterior a la eclosión, empezando a crecer con mayor ritmo los machos que las hembras, dado el dimorfismo sexual que presentan (Zafra et al, 2023).

En segunda instancia, al existir convivencia entre ambos sexos, y presentarse conductas reproductivas, no solo hay un gasto energético implícito, sino que también la incubación bucal de los huevos en las hembras interfiere con la alimentación hasta terminada la eclosión y el correspondiente déficit energético que propicia un menor desarrollo tisular, una condición corporal inferior y una mayor heterogeneidad en los pesos y las tallas (Wang et al., 2022).

Para efectos del rendimiento y la relación cabeza/cuerpo hay diferencias significativas entre sexos ($p < 0.05$). Los machos reportan un rendimiento en canal superior del 1,5% al 2%, con un recorrido ligeramente más estrecho, es decir, estos son más uniformes que las hembras. Las diferencias observadas en esta relación probablemente estuvieron asociadas al dimorfismo sexual en el crecimiento; adicionalmente, no puede descartarse que la asignación energética diferencial entre sexos haya contribuido a este patrón (Wang et al., 2022; Zafra et al., 2023).

Dada la diferencia sustancial en el rendimiento entre hembras y machos, y considerando que la determinación del sexo se realizó al final del ensayo, se evidencia la importancia de una adecuada reversión sexual. Montoya-Toapanta (2013) reporta que protocolos basados en 17- α -metiltestosterona pueden alcanzar proporciones de entre 95% y 100% de machos. Sin embargo, en el presente estudio se obtuvo una relación de siete machos por cada tres hembras, lo que representa un error relativo del 83,5% respecto al valor esperado del 5,0%.

Estos resultados resaltan la necesidad de una implementación más rigurosa de los protocolos de reversión sexual por parte de los proveedores de alevines, dado su impacto directo sobre el desempeño productivo.

CONSIDERACIONES FINALES

Según los resultados obtenidos y bajo las condiciones evaluadas, *Oreochromis aureus* presentó un mayor crecimiento y una mejor eficiencia productiva en comparación con el híbrido *Oreochromis niloticus* \times *Oreochromis aureus* var. Rocky Mountain. No obstante, ambas líneas genéticas mostraron un desempeño inferior al esperado, lo cual puede atribuirse principalmente a niveles iniciales elevados de nitritos, una alta proporción de hembras en la población y la imposibilidad de mantener la temperatura del agua dentro de un rango óptimo.

Esta última limitante podría representar una restricción económica importante en sistemas RAS, especialmente cuando se pretende adaptar especies con requerimientos térmicos distintos a las condiciones ambientales del sistema. Asimismo, el sexo se confirmó como un factor determinante en el rendimiento, evidenciando los machos una mayor proporción de canal en ambas líneas, asociada a una menor proporción de vísceras y cabeza en comparación con las hembras. Por otra parte, *Oreochromis aureus* mostró una menor susceptibilidad a la mortalidad por exposición a nitritos durante los primeros 34 días del ensayo. En conjunto, los resultados subrayan que la eficiencia productiva en sistemas RAS depende críticamente de la interacción entre calidad del agua, control térmico y manejo poblacional.

LITERATURA CITADA

- Abakari, G., Luo, G., y Kombat, E. O. (2021). Dynamics of nitrogenous compounds and their control in biofloc technology (BFT) systems: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 6(5), 441–447. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.05.005>
- Acuña-Acuña, J. (2012). *Control de calidad: Un enfoque integral y estadístico* (Cuarta ed.). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9789977662978_A25157742/preview-9789977662978_A25157742.pdf
- Araujo, G.S., Silva, J.W.A.D., Cotas, J. y Pereira, L. (2022). Fish Farming Techniques: Current Situation and Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1598. <https://doi.org/10.3390/jmse10111598>
- Arce-Vega, J. (2014). Determinación de la tasa de alimentación para tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus, 1759) en condiciones comerciales corregida por el coeficiente térmico de crecimiento. Tesis Lic. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/752363dc-befb-4ea2-a361-7128c0766e18>
- Brown, A. R., Wilson, R. W., y Tyler, C. R. (2024). Assessing the Benefits and Challenges of Recirculating Aquaculture Systems (RAS) for Atlantic Salmon Production. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/23308249.2024.2433581>

- Castrillón-Fernández, M., Torres-Rodríguez, G., Cáceres, P., y Peña, E. (2008). Análisis morfométrico de branquia de Tilapia *Oreochromis niloticus* de la Laguna de Sonso (Valle del Cauca) mediante procesamiento digital de imágenes. *Revista AquaTIC*, 28, 16-25. <https://www.redalyc.org/pdf/494/49418026003.pdf>
- Chacón-Palma, E. (2001). Comparación del crecimiento de tres especies de tilapia (*Oreochromis niloticus*, variedad stirling; *Oreochromis aureus* y Rocky Mountain White, cultivadas con dos métodos de alimentación en un sistema de flujo continuo. Tesis Lic. Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica. <https://repositorio.una.ac.cr/items/586d6104-cbca-4100-bcf5-887167067b51>
- Emerson, K., Russo, R., Lund, R., y Thurston, R. (1975). Aqueous Ammonia Equilibrium Calculations: Effect of pH and Temperature. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 32 (12). <https://doi.org/10.1139/f75-274>
- Espinoza-Quesada H.A., Chacón-Villalobos, A., y Herrera-Muñoz, J. (2024). Desempeño zootécnico de alevines de tilapia blanca (*Oreochromis niloticus* x *O. aureus*) a distintas temperaturas. *Nutrición Animal Tropical*, 1 (18), 1-35. <https://doi.org/10.15517/nat.v18i1.60297>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2020). The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. <https://doi.org/10.4060/CA9229EN>
- Francis-Floyd, R., Watson, C., Petty, D., y Pouder, D. B. (2025). Amonio en sistemas acuáticos. UF/IFAS Extension, University of Florida. <https://doi.org/10.32473/edis-FA264-2024>
- Galván A. y Ríos L. (2013). Procesos, bacterias y arqueobacterias involucrados en el ciclo biológico del nitrógeno para la eliminación de compuestos nitrogenados en ecosistemas de agua dulce, una revisión sistemática. *Hechos Microbiológicos*, 4 (1), 34-51. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.20095>
- Hai, F. I., Visvanathan, C., y Boopathy, R. (Eds.). (2018). Sustainable aquaculture. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2>
- IBM (International Business Machines Corporation). 2017. IBM SPSS Statistics (25) (Software). <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>

- INCOPESCA (Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura). (2019). Plan estratégico de la acuicultura en Costa Rica 2019 - 2023. https://www.incopescas.go.cr/acuicultura/plan_estrategico_acuicultura/Plan_Estrategico_Acuicultura_Costa_Rica_2019-2023.pdf
- Khanjani, M. H., Sharifinia, M., y Hajirezaee, S. (2022). Recent progress towards the application of biofloc technology for tilapia farming. *Aquaculture*, 552, 738021. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738021>
- Lopez-Betancur, D., Moreno, I., Guerrero-Mendez, C., Gómez-Meléndez, D., Macias P., M. de J., y Olvera-Olvera, C. (2020). Effects of Colored Light on Growth and Nutritional Composition of Tilapia, and Biofloc as a Food Source. *Applied Sciences*, 10 (1). <https://doi.org/10.3390/app10010362>
- Lugert, V., Thaller, G., Tetens, J., Schulz, C. y Krieter, J. (2014). A review on fish growth calculation: Multiple functions in fish production and their specific application. *Reviews in Aquaculture*, 8 (1), 30-42. <https://doi.org/10.1111/raq.12071>
- Montoya-Toapanta, D. J. (2013). Reversión sexual en tilapias con hormona 17alfa metiltestosterona a diferentes dosis (40-60-80 mg/kg. de alimento). Tesis Grado Latacunga, Ecuador. <https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/2901/1/T-UTC-00425.pdf>
- Nitzan, T., Kokou, F., Doron-Faigenboim, A., Slosman, T., Biran, J., Mizrahi, I., Zak, T., Benet, A., & Cnaani, A. (2019). Transcriptome Analysis Reveals Common and Differential Response to Low Temperature Exposure Between Tolerant and Sensitive Blue Tilapia (*Oreochromis aureus*). *Frontiers in Genetics*, 10, 100. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00100>
- Pineda, I., Escobar, L., Zavala, F., Carachure, P., Álvarez, G. y Rodríguez, C. (2023). La temperatura como un factor de crecimiento en juveniles de tilapia roja en las condiciones climáticas de cd. Altamirano, Guerrero. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9875-9886. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5095
- Omweno, J., Getabu, A., Omondi, R., y Orina, P. (2024). *Water Quality Effects on Growth and Survival of Oreochromis jipe and Oreochromis niloticus Species in Aquaculture*. *Water*

- Quality - New Perspectives. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.106361> Salazar-Murillo, L., Chacón-Villalobos, A., y Herrera-Muñoz, J. (2023). Crecimiento, eficiencia y composición de tilapia (*Oreochromis aureus*) alimentada con lombriz roja (*Eisenia fetida*). *Nutrición Animal Tropical*, 1 (17), 1-35. <https://doi.org/10.15517/nat.v17i1.54085>
- Sarkheil, M., Zahedi, S., Safari, O., y Ahmadniaye Motlagh, H. (2024). Application of humic acid in a water recirculating system: influences on total ammonia nitrogen (TAN) removal efficiency of biofilter and growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture International*, 32, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01556-7>
- Torres-Castillo, H. H. (2019). Evaluación de la inclusión de fuentes proteicas vegetales a la harina de pescado y su efecto en parámetros de crecimiento y eficiencia nutritiva de la tilapia roja (*Oreochromis sp.*). Universidad de Cundinamarca, Cundinamarca, Colombia. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2321?show=full>
- Triana-García, P., Gutierrez-Espinosa, M., y Eslava-Mocha, P. (2013). Rendimiento productivo e hígado graso en tilapia híbrida (*Oreochromis spp*): Influencia de dos fuentes de lípidos. *Orinoquia*, 2 (17), 183-196. <https://doi.org/10.22579/20112629.5>
- Vélez, E. J., Lutfi, E., Azizi, Sh., Perelló, M., Salmerón, C., Riera-Codina, M., Ibarz, A., Fernández-Borràs, J., Blasco, J., Capilla, E., Navarro, I., y Gutiérrez, J. (2017). Understanding fish muscle growth regulation to optimize aquaculture production. *Aquaculture*, 467, 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.07.004>
- Wang, J. Y., Ma, Y. X., Hu, Q. M., Peng, F., Zhou, M., Ji, X. S., y Zhao, Y. (2022). All-male Nile tilapia larvae production using high-temperature and low dose of MT combination treatment. *Aquaculture*, 546, 737311. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737311>
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., y Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- Xiao W, Zou Z, Li D, Zhu J, Yue Y y Yang H. (2020). Effect of dietary phenylalanine level on growth performance, body composition, and biochemical parameters in plasma of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*. *Journal of the*

World Aquaculture Society, 51 (2): 437–451. <https://doi.org/10.1111/jwas.12641>

Zafra, A., Luján, L., y Fernández, R. (2023). Madurez sexual y protocolo de *Oreochromis aureus* en el Módulo La Balsa para la Acuicultura rural. *Arnaldoa*, 30 (1), 89-102. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.301.30106>

Zimmermann, S., Kiessling, A., y Zhang, J. (2023). The future of intensive tilapia production and the circular bioeconomy without effluents: Biofloc technology, recirculation aquaculture systems, bio-RAS, partitioned aquaculture systems and integrated multitrophic aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 15 (S1), 22-31. <https://doi.org/10.1111/raq.12744>

Zumbado-Salas, A., Chacón-Villalobos, A., y Herrera-Muñoz, J. (2022). Efecto sobre parámetros zootécnicos y composición tisular de tilapia aurea (*Oreochromis aureus*) alimentada con lombriz roja (*Eisenia foetida*). *Nutrición Animal Tropical*, 16 (2), 1-34. <https://doi.org/10.15517/nat.v16i2.52231>

Zúñiga-Vargas, E. J. (2024). Evaluación de desempeño zootécnico y de costos de dos líneas genéticas de tilapia (*Oreochromis spp.*) bajo sistemas acuícolas de recirculación. Tesis Lic. Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/15701/TF9945_BIB313855_Esteban_Zu%c3%b1iga-Vargas.pdf?sequence=1&isAllowed=y