

Capítulo 5

Evaluación de la eficiencia en remoción de nitrógeno amoniacal total de distintos biofiltros en sistemas acuapónicos como alternativa sustentable

Jesús Paul Camacho Rodelo¹

Dinora Galindo Espinoza²

David Valdez Martínez³

Pedro Hernández Sandoval⁴

<https://doi.org/10.61728/AE20254056>



¹ Universidad Autónoma de Occidente, Los Mochis-Sinaloa-México. paulc5590@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0970-3959>

² Universidad Autónoma de Occidente, Los Mochis-Sinaloa-México. dino.espinosa12@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8503-6691>

³ Universidad Autónoma de Occidente, Los Mochis-Sinaloa-México. david.martinez@uadeo.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9471-4001>

⁴ Universidad Autónoma de Occidente, Los Mochis-Sinaloa-México. Pedro.hernandez@uadeo.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7005-4555>

Introducción

Existen gran variedad de impactos ambientales que están relacionados con las actividades convencionales de producción de alimentos, para la actividad acuícola se pueden destacar aquellos relacionados con el alimento y las heces de los peces, cuyas descargas de agua pueden generar un enriquecimiento de nutrientes en cuerpos naturales provocando la acumulación de sedimentos anoxicos, gases tóxicos, cambios en la biodiversidad, entre otros efectos negativos, este fenómeno también llamado eutrofización, está asociado a las actividades agrícolas tradicionales, cuyo uso excesivo de fertilizantes químicos junto con un mal manejo, puede derivar en un potencial daño al entorno natural (Rabasso, 2006; Martínez-Cruz, 2015).

Una alternativa es la acuaponía, que consiste en la combinación de la acuicultura y la hidroponía y se presenta como una solución debido a sus múltiples ventajas sobre los sistemas de producción acuícolas y agrícolas convencionales, ya que tiene la finalidad de producir alimentos frescos, inocuos y nutritivos de manera controlada, así como obtener dos productos mediante una única fuente de nitrógeno (alimentos y heces de peces). Entre sus ventajas está la reutilización del agua, lo que resulta muy útil en zonas donde la disponibilidad de esta es escasa; también la fertilización es orgánica, ya que se realiza con la emulsión natural de los peces y el impacto ambiental es bajo, pues se reducen las tierras de cultivo necesarias para la producción de plantas (Rural, 2019).

Se han realizado muchos trabajos con sistemas de acuaponía, cuyos objetivos varían entre producir alimentos con distintas especies de animales y vegetales, aumentar su eficiencia y ahorro, entre otros, sin embargo un proceso clave en muchos de ellos es la eficiencia de los biofiltros en torno a la calidad del agua, algunos trabajos basan sus resultados en el efecto que tiene su diseño y componentes, tal como lo reporta Rodríguez-González et al. (2015), quienes tuvieron como objetivo la

evaluación de la producción semi intensiva de tilapia y lechuga en dos sistemas acuapónicos para comparar si el sistema de tratamiento de agua con bacterias en biofiltros es mejor que un sistema de recambios, como resultados obtuvieron que los sistemas de biofiltros provocaran mayor producción en cuanto al cultivo de tilapia en comparación con el sistema de recambios, sin embargo, la producción de lechuga fue a la inversa. Otro trabajo reportado por Castañeda (2019) demostró que, a través de un sistema acuapónico de recirculación para el tratamiento de agua bajo la influencia de tres cultivos (lechuga, albahaca y acelgas), se mejora en los parámetros de calidad de agua para ser reutilizada en la crianza de tilapias, incrementando su peso y tamaño, al igual que fue posible demostrar en los cultivos un crecimiento óptimo, atribuyendo este beneficio al sistema de recirculación. Por otro lado, Gallego y García (2017) realizaron un proyecto cuyo objetivo fue evaluar la eficiencia del proceso de remoción de nitrógeno a través de la Tasa Volumétrica de Conversión de Nitrógeno Amoniacal Total (TVC NAT) en un filtro biológico, bajo el entendido de que la biofiltración forma parte de los procesos claves en acuaponía. Este filtro combinó un medio de percolación con otro de arena con 418 organismos en la parte acuícola, durante un periodo de 62 días. Al analizar por separado, obtuvieron que la combinación de percolador-columna de arena tuvo un desarrollo especializado en la remoción de compuestos nitrogenados con una eficiencia de remoción de NAT mayor a 70 %.

Otro aspecto importante es la contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, que invitan a la suma de esfuerzos para contribuir con las metas de los 17 ODS, siendo cinco elementos fundamentales, personas, planeta, prosperidad, paz y alianzas, en donde los proyectos deben tener incidencia (ONU, 2023). La acuaponía tiene un impacto de forma directa e indirecta en muchos de ellos, documentado hasta 11 objetivos de la agenda a través de distintas metas, siendo para el tema del agua un impacto directo al evitar el desperdicio e incrementar el ahorro, así como la disminución de la contaminación, relacionando este proyecto al ODS 6: Agua limpia y saneamiento Valdez-Martínez et al. (2023). El objetivo del presente proyecto de investigación fue evaluar la eficiencia del tratamiento de agua en recirculación por filtro biológico con diferentes sustratos, dentro de un sistema productivo de acuaponía.

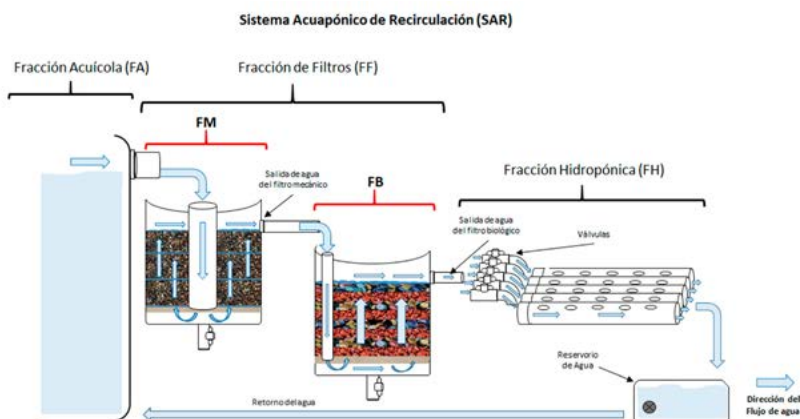
Metodología

El lugar donde se llevó a cabo el experimento fue en la Unidad Acuapónica Experimental (UAE) que se encuentra en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Occidente (UAdeO), Unidad Regional Los Mochis. El diseño experimental consistió en la instalación de tres Sistemas Acuapónicos de Recirculación (SAR), cuya fracción hidropónica fue la técnica NFT (Nutrient Film Technique) y la parte acuícola un contenedor de 1000 L. El experimento tuvo una duración de 22 semanas.

Para la remoción de sólidos en el tratamiento de agua, se diseñaron y construyeron Filtros Mecánicos (FM) y Filtros Biológicos (FB) para la conversión de Nitrógeno Amoniacal Total (NAT), uno de cada uno para cada sistema. Los filtros fueron elaborados con cubetas de plástico de 20 L de capacidad. Para los FM se utilizó piedra de río y tres capas de tela fieltro. Por la parte del centro se colocó un tubo de PVC de 4" de diámetro para la entrada del agua proveniente del tanque de peces. Ambos filtros contaban con un falso fondo, que consistió en una malla de plástico de 5mm, reteniendo así la materia orgánica. La salida del agua filtrada por FM pasaba a través de una conexión de tubo PVC de 1" de diámetro hacia los FB; estos contaban con dos tipos de sustratos y una combinación entre ellos, siendo como resultado el primer sistema (SAR1) con una mezcla entre el 50 % de tapas PET y 50 % de piedra Tezontle, el SAR2 con 100 % de tapas PET y el SAR3 con el 100 % de piedra Tezontle. La salida del agua se conectó a las válvulas de entrada a la fracción hidropónica (Figura 1).

Figura 1.

Diseño del sistema acuapónico. Filtro Mecánico (FM) y Filtro Biológico (FB), las flechas azules muestran la dirección del flujo del agua (Valdez, 2024).



La cantidad de peces fue de 60 tilapias por SAR y cada uno contó con tres variedades de lechuga, siendo un total de 45 plantas. Las variedades fueron Lechuga Orejona (LO), Lechuga Francesa (LF) y Lechuga Baby Sucrine (LBS).

Para conocer la maduración de los filtros biológicos, se evaluó la concentración de Nitrógeno Amoniacal Total (Amonio y Amoniaco) generado por los peces dentro de los tanques. La primera medición se realizó en un periodo de 40 días después de iniciada la recirculación del agua, ya que, según las recomendaciones de Somerville et al. (2022) es el tiempo requerido para la incubación natural de bacterias en FB, para ello, se taparon los filtros para limitar la entrada de luz.

Para determinar las condiciones físicas y químicas del agua, se midió la temperatura (T; °C), el Oxígeno Disuelto (OD; mg/l) y el pH, de forma diaria. Para T y OD fueron monitoreados con un oxímetro portátil (HANNA®, modelo HI98193) y el pH se midió con un potenciómetro (HANNA®, modelo HI98127).

Para la determinación de la concentración de Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Amoniaco (NH_3) y Amonio (NH_4^+), se utilizaron los métodos de diazotización (0-0.30 mg/l); reducción de cadmio (0-30 mg/l) y Nessler 0-2.50 mg/l respectivamente con los reactivos específicos para el equi-

po utilizado (espectrofotómetro de luz visible) marca HACH® modelo DR-2010, disponible en el laboratorio IBC Analytics de la UAdeO, posteriormente se calculó el NAT con una sumatoria de NH_3 y NH_4^+ por medio de la ecuación 1. Las muestras se tomaron de la Fracción Acuicola y a la salida de los filtros biológicos.

Para determinar la tasa volumétrica de conversión de nitrógeno amoniacal total (TVC-NAT), la cual indica la carga de nutrientes que puede soportar un filtro biológico, se utilizó la siguiente ecuación empleada por Gallego y García (2017):

Ecuación 1:

$$TVC\ NAT\left(\frac{g-N}{m^3\ d}\right) = \left(CAI\left(\frac{g-N}{m^3}\right) - CAE\left(\frac{g-N}{m^3}\right)\right) \cdot \frac{Q\left(\frac{m^3}{d}\right)}{Vb(m^3)}$$

Dónde:

TVC NAT = Tasa Volumétrica de Conversión de Nitrógeno Amoniacal Total;

CAI = Concentración de Nitrógeno Amoniacal en el Influyente del filtro biológico;

CAE = Concentración de nitrógeno Amoniacal en el Efluente del filtro biológico;

Q = Caudal que pasa a través del filtro biológico

Vb = Volumen de Empaque en el filtro biológico

Los grupos de datos obtenidos de la lectura de las variables ambientales fueron sometidos a prueba de normalidad de Shapiro Wilk ($P > 0.05$) y homocedasticidad de Levene ($P < 0.05$), posteriormente a prueba pareada (t de student, $P < 0.05$) o ANOVA ($P < 0.05$) según fue el caso para identificar diferencias significativas entre los filtros, se utilizó el software SigmaPlot v.12.5z.

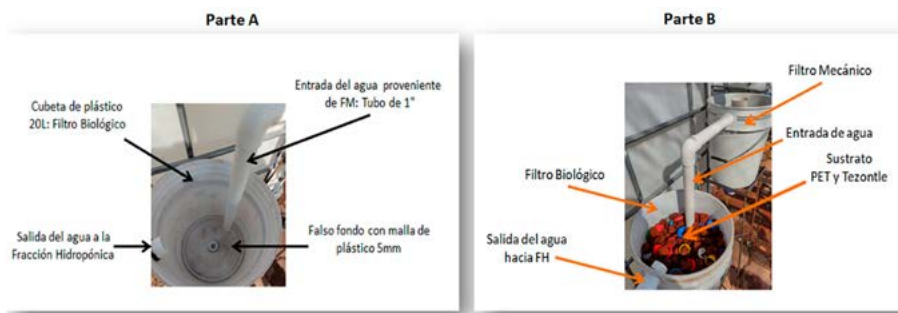
Resultados

Diseño y construcción de filtros

Una vez que el agua pasó por el primer filtro (FM), entró al filtro biológico desde el fondo, ya que la salida del agua se encontraba en contacto con la malla del falso fondo; por lo tanto, el flujo de agua pasaba toda la columna de sustrato. Este diseño se muestra en la figura 2, parte A. Para permitir un flujo por gravedad, la posición de los filtros mantenía distinto nivel; esta apreciación se puede notar en la figura 2, parte B, donde se muestra el filtro mecánico, la conexión de agua como entrada al filtro biológico, el sustrato y la salida del filtro biológico que posteriormente se conectaba con la fracción hidropónica.

Figura 2.

Diseño y componentes de los filtros, en la parte A se muestra los componentes de FB, el tubo de entrada del agua proveniente de FM y el contacto con la malla del falso fondo. Parte B muestra el diseño final de los filtros dentro del sistema acuapónico, el FB de la imagen contiene la mezcla de 50 % tapas PET y 50 % piedra tezontle



Fuente: Elaboración propia.

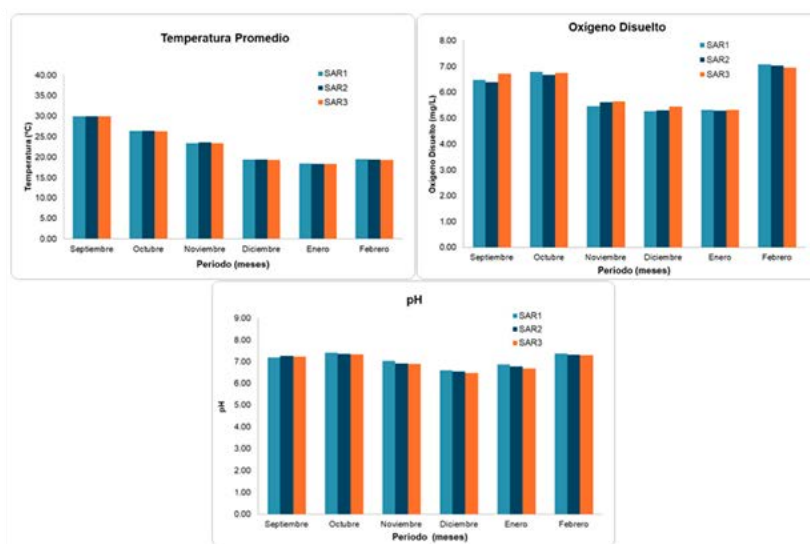
Calidad del agua

Los datos correspondientes al seguimiento de la concentración de oxígeno disuelto (OD), pH y la temperatura (T) se observan en la figura 3; estas mediciones se realizaron en el agua del contenedor con los peces, antes de pasar por ambos filtros.

Para el caso de la temperatura, se registraron valores máximos promedio de 29.93 °C correspondientes al mes de septiembre y las mínimas promedio de 18.38 °C para el mes de enero, siendo estos dos meses los que presentaron mayor diferencia entre ellos, y no hubo diferencias estadísticas significativas entre los sistemas. Para el pH, el valor más elevado se presentó en octubre con un promedio de 7.37 y para diciembre el valor más bajo con 6.55. En cuanto a OD, el promedio más elevado se presentó en febrero con un valor de 7.02 mg/L y el valor más bajo se observó un mes antes, siendo enero con un valor promedio mínimo de 5.3 mg/L.

Figura 3.

Resultados del valor promedio mensual de Temperatura, pH y Oxígeno Disuelto durante un periodo comprendido de septiembre a febrero, para los tres sistemas (SAR1, SAR2 y SAR3)



Para la medición de las concentraciones de Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Amoníaco (NH_3) y Amonio (NH_4^+), se tomaron tres muestras por duplicado en cada una de las fracciones (FA y FH), siendo los periodos de octubre, diciembre y febrero, cuyos valores promedio más error típico se muestran en la tabla 1 y la tabla 2.

Tabla 1. Concentración promedio ($\pm$ error típico) de Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Amoniac (NH_3) y Amonio (NH_4^+) tomados en la fracción acuícola en tres periodos distintos

Sistemas Acuapónicos	Fracción acuícola			
	Nitritos (NO_2^-) mg/L	Nitratos (NO_3^-) mg/L	Amoniac (NH_3) mg/L	Amonio (NH_4^+) mg/L
SAR1	0.25 $\pm$ 0.08 A	30.27 $\pm$ 7.13	0.38 $\pm$ 0.08	0.45 $\pm$ 0.06
SAR2	0.40 $\pm$ 0.04 A	33.06 $\pm$ 5.82	0.47 $\pm$ 0.06	0.57 $\pm$ 0.41
SAR3	0.44 $\pm$ 0.03 A	30.49 $\pm$ 0.95	0.45 $\pm$ 0.11	0.54 $\pm$ 0.04

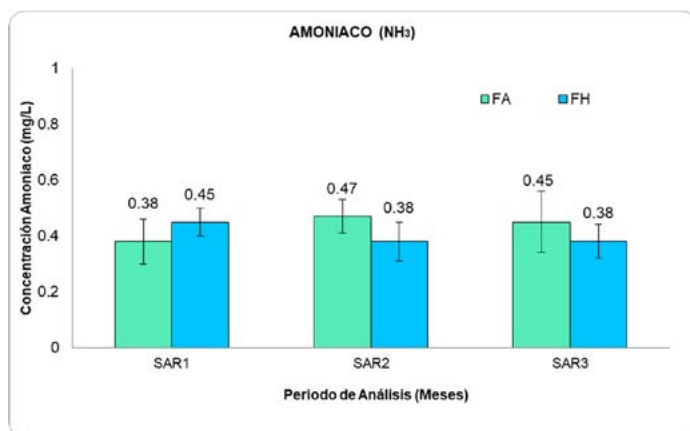
Tabla 2. Concentración promedio (más error típico) de Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Amoniac (NH_3) y Amonio (NH_4^+) donde las muestras fueron tomadas después de pasar por los filtros.

Sistemas Acuapónicos	Fracción hidropónica			
	Nitritos ($\text{NO}_2^{-\text{N}}$) mg/L	Nitratos ($\text{NO}_3^{-\text{N}}$) mg/L	Amoniac (NH_3) mg/L	Amonio (NH_4^+) mg/L
SAR1	0.10 $\pm$ 0.02 A	31.68 $\pm$ 1.68	0.45 $\pm$ 0.05	0.54 $\pm$ 0.06
SAR2	0.13 $\pm$ 0.02 B	35.22 $\pm$ 2.36	0.37 $\pm$ 0.07	0.46 $\pm$ 0.06
SAR3	0.14 $\pm$ 0.03 B	32.35 $\pm$ 1.10	0.38 $\pm$ 0.06	0.46 $\pm$ 0.06

El comportamiento expresado en ambas fracciones se aprecia en las siguientes figuras. Para el caso del amoniac (Figura 4), no hubo diferencias significativas entre las fracciones, siendo prácticamente la misma concentración en todo el sistema; sin embargo, se puede observar una ligera tendencia entre cada punto de muestreo. Para el caso del SAR1, el promedio general se encuentra con un valor más elevado en FH contra FA.

Figura 4.

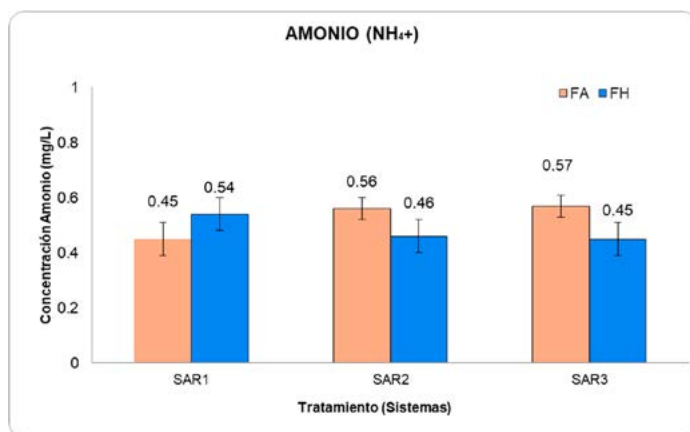
Concentraciones medias ($\pm$ error típico) de Amoníaco (NH_3), por fracción (FA y FH) y por Sistema Acupónico de Recirculación (SAR). No existen diferencias significativas entre las medias de FA vs FH (t -test, $P > 0.05$)



El amonio (figura 5), suele ser inerte para los peces y su formación se ve influenciada directamente por la temperatura y el pH del agua, para los tres SAR, la concentración fue similar al no existir diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las fracciones, sin embargo, se observó un comportamiento similar al del amoníaco con el SAR1 (figura 4), esto tiene sentido ya que el amonio y el amoníaco están relacionados y la tendencia fue que en FH hay una concentración promedio mayor con respecto a FA.

Figura 5.

Concentraciones medias ($\pm$ error típico) de Amonio (NH_4^+), por fracción (FA y FH) y por Sistema Acuapónico de Recirculación (SAR). No existen diferencias significativas entre las medias de FA vs FH (t-test, $P > 0.05$)



Los nitritos fueron el único valor que mostró diferencias significativas entre las fracciones, siendo notoriamente mayor la concentración en el contenedor con los peces (FA). Esta tendencia del comportamiento respecto a la concentración promedio en las fracciones del sistema se observa en la figura 6, y los tres SAR tuvieron el mismo comportamiento.

Figura 6.

Concentraciones medias ($\pm$ error típico) de Nitritos (NO_2^-), por fracción (FA y FH) y por Sistema Acuapónico de Recirculación (SAR). Letras distintas (a, b) indican que existen diferencias estadísticas significativas entre las medias de FA vs FH (t-test, $P < 0.05$)

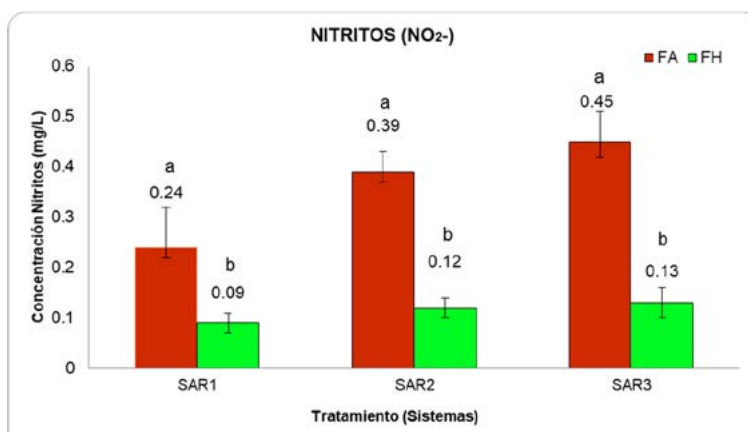
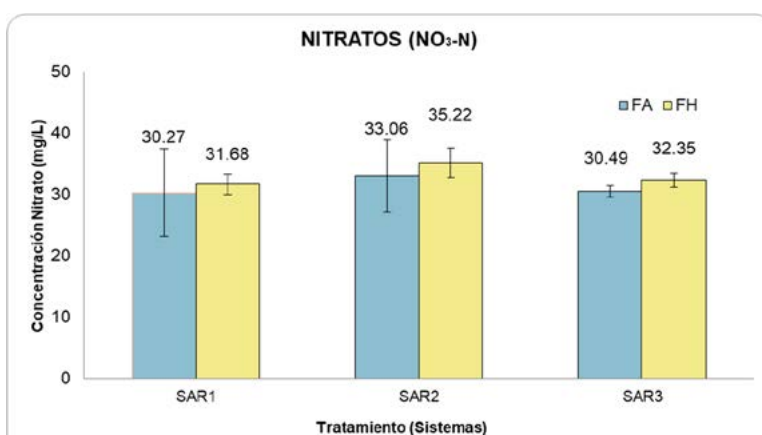


Figura 7.

Concentraciones medias ($\pm$ error típico) de Nitratos (NO_3^-), por fracción (FA y FH) y por Sistema Acuapónico de Recirculación (SAR). No existen diferencias estadísticas entre las medias de FA vs FH (t-test, $P > 0.05$)



Con los nitratos, no hubo diferencias estadísticas entre las fracciones en ningún SAR (figura 7), sin embargo hay valores promedio ligeramente mayores en FH respecto a FA.

Tasa volumétrica de Conversión del Nitrógeno Amoniacal Total (TVC NAT)

Para determinar la capacidad de carga de los nutrientes que podían soportar cada uno de los filtros biológicos, primero se llevó a cabo la sumatoria del amonio y amoniaco, lo que permitió obtener el valor del Nitrógeno Amoniacal Total, para ello se sumaron las concentraciones promedio obtenidas por fracción en cada uno de los SAR (Tabla 1 y 2), siendo el $\text{NAT} = \text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$, posteriormente se aplicó la ecuación 1 donde $Q = 1.728 \text{ m}^3/\text{d}$ y $V_b = 0.016 \text{ m}^3$. Los resultados del NAT se muestran en la tabla 3 y en la tabla 4.

Tabla 3.

Valores promedio obtenidos por fracción (FA y FH), y por sistema acuapónico de recirculación (SAR) para calcular Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)

Sistema	NH_4^+ (mg/L)	NH_3 (mg/L)	NAT
SAR1 FA	0.38	0.45	0.83
SAR1 FH	0.54	0.45	0.99
SAR2 FA	0.57	0.47	1.04
SAR2 FH	0.46	0.37	0.83
SAR3 FA	0.45	0.54	0.99
SAR3 FH	0.46	0.38	0.84

Tabla 4.

Resultados del cálculo de la Tasa de Conversión de Nitrógeno Amoniacal Total (TCV NAT) obtenida del promedio de cada sistema en todo el periodo

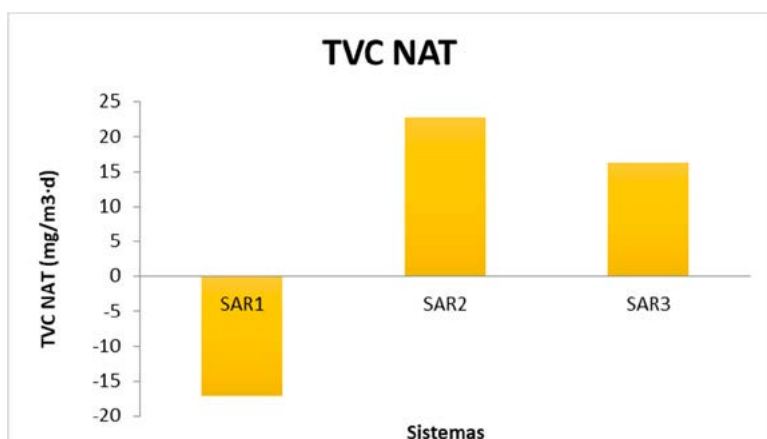
Sistema Acuapónico	TVC NAT
SAR1	-17.28 mg/m ³ ·d
SAR2	22.68 mg/m ³ ·d
SAR3	16.2 mg/m ³ ·d

Una vez aplicada la ecuación del cálculo sobre la TCV NAT, se obtuvieron los resultados presentes en la siguiente tabla.

Dentro de los resultados se puede apreciar que la TVC NAT más elevada se presentó con el SAR2 con 22.68 mg/ m₃·d, cuyo sustrato consiste en 100 % tapas PET, posteriormente fue el SAR3 con 16.2 mg/ m₃·d y el resultado del SAR1 fue un valor negativo (-17.28 mg/m₃·d), lo que indica serios problemas con el filtro biológico para realizar el proceso de conversión.

Figura 8.

Valores promedio de Tasa Volumétrica de Conversión de Nitrógeno Amoniacal Total (TVC NAT) por sistema de recirculación acuapónico (SAR) en todo el periodo (septiembre - febrero).



Por otro lado, en el cálculo individual del TVC NAT por mes de evaluación, se logra apreciar con más detalle los comportamientos de los filtros biológicos y el efecto del sustrato en el proceso de conversión. La tabla 5 muestra la TVC NAT por muestreo y por sistema, siendo notorio que para el mes de octubre, el más eficiente fue el filtro del SAR2; le sigue el SAR3 con valores negativos (-7.56) y por último el SAR1 con valor de -34.56. Este efecto posiblemente se deba a una acumulación del NAT posterior a FA y los filtros; sin embargo, los valores cambiaron para el mes de diciembre, siendo el más eficiente el SAR3, seguido por el SAR2 y por último el SAR1 con un valor de cero. Para el último mes (febrero), los tres filtros mostraron valores de TVC NAT positivos, siendo el más eficiente el SAR3, seguido por el SAR2 y por último el SAR1.

Tabla 5.

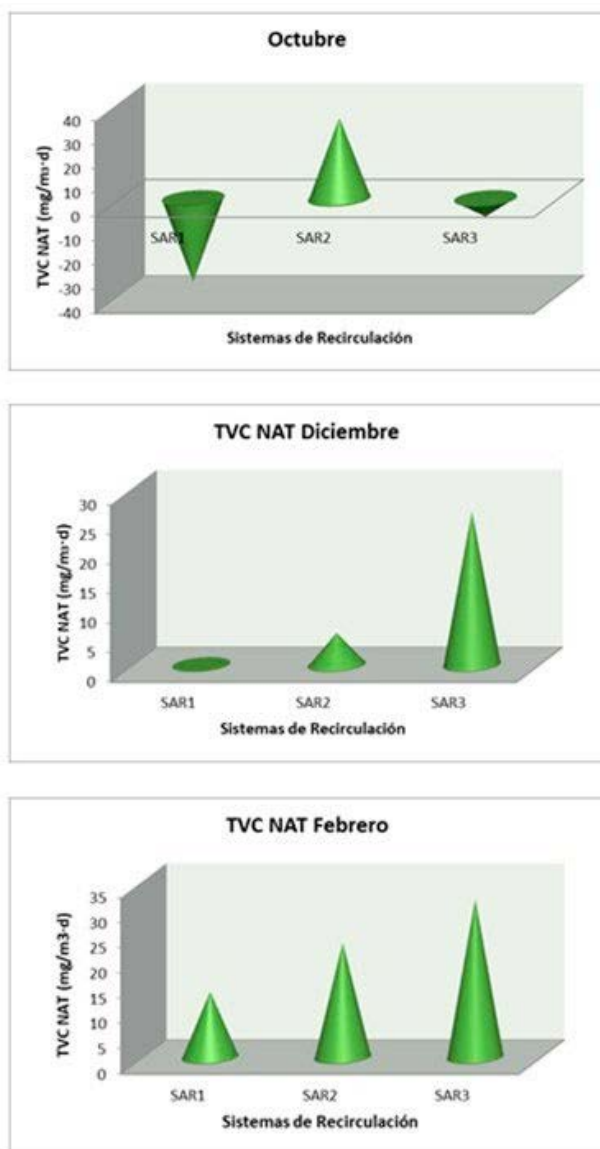
Valores obtenidos con el cálculo de la Tasa Volumétrica de Conversión (TVC) del NAT por Sistema Acuapónico de Recirculación (SAR) y por mes

	TVC NAT mg/m ³ ·d		
	Octubre	Diciembre	Febrero
SAR1	-34.56	0	12.96
SAR2	33.48	5.4	22.68
SAR3	-7.56	25.92	31.32

Las tendencias y el comportamiento de cada uno de los filtros biológicos se aprecian con más detalle en la figura 9, siendo el mes de febrero cuando todos los filtros biológicos tenían un comportamiento adecuado para cada SAR.

Figura 9.

Tasa Volumétrica de Conversión (TVC) de NAT por sistema acuapónico y por periodo de análisis



En la figura 9 se aprecia que cada uno de los filtros biológicos presentó una tendencia de comportamiento diferente y única entre cada uno de ellos. Para el caso del SAR1, empezó con valores elevados y negativos demostrando que, en vez de una conversión de los desechos nitrogenados, existió acumulación del NAT, este comportamiento se revirtió para el mes de diciembre, donde el valor de TVC NAT fue de cero, lo que indica que el sistema de filtros estaba mejorando, posteriormente se generó un valor positivo siendo de $12.96 \text{ mg/m}^3\cdot\text{d}$ para el mes de febrero, cuando el filtro a base de 50% PET y 50% Tezontle, comenzó a funcionar adecuadamente.

Para el caso de la tendencia en el comportamiento del filtro del SAR2, se logra apreciar en la figura 9, que este filtro siempre mostró valores del TVC NAT positivos, sin embargo, el comportamiento fue diferente a los otros dos filtros, ya que empezó con un valor de $33.48 \text{ mg/m}^3\cdot\text{d}$, después disminuyó con un valor de $5.4 \text{ mg/m}^3\cdot\text{d}$ y posteriormente subió a $22.68 \text{ mg/m}^3\cdot\text{d}$. Este comportamiento del filtro posiblemente se deba a otros agentes externos que alteraron el correcto desarrollo de las bacterias nitrificantes, viéndose reflejado en la disminución de la TCV NAT, sin embargo, a diferencia de los filtros de los otros dos sistemas, este funcionó en todo el periodo, siendo más eficiente por más tiempo y mostrando resultados más pronto.

El filtro biológico del SAR3 con sustrato de 100% tezontle, mostró un inicio con valores negativos, efecto que se revirtió en diciembre con una TVC NAT de $25.92 \text{ mg/m}^3\cdot\text{d}$ y terminando febrero con un valor de $31.32 \text{ mg/m}^3\cdot\text{d}$. A pesar de tener un comienzo no adecuado, entro en función positiva para el segundo muestreo y se mantuvo similar para febrero, demostrando ser una buena alternativa este sustrato.

Discusión

El diseño de FB elaborado en esta propuesta se puede clasificar como filtro de lecho fijo, que, según Delgado (2024), tiene la funcionalidad de eliminar solidos a través de filtración, siendo aquellos solidos que no fueron retenidos en el filtro anterior. Al contar con un falso fondo y válvula de salida en la parte inferior, se pueden retirar los sólidos por la parte de abajo.

Este diseño, similar al de lecho fijo, tiene como ventaja propiciar la nitrificación y la filtración. Sin embargo, un posible efecto negativo se puede dar al presentarse la degasificación, que para este sistema sería la reducción del oxígeno disuelto. Esto es provocado por obstrucción de partículas y bacterias (Delgado, 2024).

Sobre OD, se puede observar que en ninguno de los meses los valores promedio bajaron de 4 mg/L y el comportamiento entre los sistemas fue similar, no existiendo diferencias significativas ($P > 0.05$), lo que indica que, en todo el periodo, el oxígeno no estuvo en condiciones bajas para representar un riesgo para ningún organismo del sistema, que según Somerville et al. (2022), el mínimo ideal para peces, plantas y bacterias debe ser de 4 mg/L. La correcta saturación de OD en el agua posiblemente se deba al adecuado proceso de aireación en el sistema; además, la temperatura en el periodo fue mayoritariamente baja y cuando esto sucede, los niveles de oxígeno se conservan más fácilmente.

Por otro lado, el pH, como se puede apreciar, el comportamiento entre cada sistema y entre meses fue muy similar, siendo todos los promedios muy cercanos a un valor de 7. Para el caso de los sistemas de acuaponía, algunos autores como Mullins et al. (2016) y Pinho et al. (2017) dicen que lo ideal es un rango entre 6.5 y 7.5; por ello, se puede considerar que esta variable no afectó a los peces y bacterias durante todo el periodo del experimento. Tampoco hubo un factor externo que alterara algún SAR.

Respecto a la temperatura se puede observar un comportamiento con una tendencia a disminuir, siendo los valores más elevados en el mes de septiembre y los menores en enero, esto tiene sentido al considerar que es la época de invierno, por lo tanto, hay un descenso importante cada mes. Estos niveles tan bajos de temperatura (valores promedio menores a 20 °C) que se aprecian a partir de diciembre hasta terminar el periodo en febrero, no son los mejores recomendados para los sistemas de acuaponía, es decir, para peces y bacterias principalmente, esto se ve reflejado en las variables productivas que indican (en este caso) el bajo crecimiento de peces, ya que, al ser ectotermos, no consumen alimento por la disminución de su metabolismo, y cabe destacar que es a través del principal desecho metabólico o desecho nitrogenado (orina = amonio/amoniaco) del pez que se obtiene el nitrógeno para las bacterias y las plantas, por ello, si hay un desequilibrio en el sistema, se puede afectar

la eficiencia de los filtros biológicos (Hsien-Tsang & Quintanilla, 2008; Pérez et al., 2015).

Para el caso de los nitritos, fue la única variable que mostró un valor con diferencias estadísticas significativas entre las fracciones, siendo mayor en FA y esto pasó en los tres SAR, lo que posiblemente se deba a una acumulación en el tanque, ya que en sistemas de acuaponía puede ser común (Somerville et al., 2022).

Para el caso del nitrato, no representa ningún riesgo para los peces y las plantas, que según Somerville et al. (2022) e Inosako et al. (2020), el rango óptimo para acuaponía debe ser de 10 a 150 mg/L, considerando este nivel como tolerable para peces e ideal para plantas.

La figura 8 muestra el comportamiento general de los filtros y el efecto en el sustrato, donde claramente se aprecia que el SAR1 tiene un resultado con un valor negativo ($-17.28 \text{ mg/m}^3\cdot\text{d}$), esto se puede atribuir al cálculo del NAT promedio en todo el periodo experimental, donde el valor del NAT en el SAR1 de la fracción acuícola (0.83) fue menor al resultado obtenido en la fracción hidropónica (0.99). Al ser mayor el NAT en FH que en FA, el resultado arroja valores negativos, lo que indica que el filtro biológico en este periodo no funcionó correctamente, cabe señalar que, si hubo presencia de nitritos y nitratos en el SAR1, sin embargo, el proceso de conversión fue más lento y no se aprecia en esta medición.

Además existen diversos factores que intervienen en la generación del NAT y la eficiencia de los sustratos, una de ellas es la etapa de producción de organismos acuáticos, donde los valores aceptables pueden ser de 140 a 300 g de NAT $\text{m}^3\cdot\text{d}$, valores sumamente elevados si se comparan los resultados del presente estudio (Malone y Beecher, 2000).

Conclusiones

El cálculo de la TVC NAT en un promedio general mostró que uno de los filtros no funcionó en todo el periodo, ya que los valores fueron negativos. Sin embargo, al hacer el cálculo de forma individual por mes de muestreo, se logró observar un comportamiento más detallado de cada FB y, por ende, de cada sustrato, lo que indica que la formación de bacterias es diferente según el material que se emplee para cada filtro biológico.

En la evaluación de los FB en función de la eficiencia para la conversión de NAT, se determinó que el SAR2 inició en octubre con resultados favorables, el SAR3 y el SAR 1 fueron de manera negativa, sin embargo, en el mes de diciembre hubo una disminución para el SAR2, un aumento favorable para el SAR3 y en el SAR1 se quedó en 0, para febrero todos los filtros mostraron valores positivos. Esto reflejó que el filtro biológico del SAR2 fue más estable al nunca presentar valores negativos y mayor cantidad en el promedio general.

Sobre la composición del sustrato para los FB, tuvo mayor eficiencia el SAR2 compuesto de 100 % PET; le sigue el de 100 % piedra tezontle del SAR3 y, por último, el de la combinación entre tezontle y PET, demostrando que la combinación entre estos dos materiales no es lo más recomendable.

La concentración de nitritos y amoníaco dentro de los SAR no fueron tan elevados para causar mortandad de peces, lo mismo para las variables de OD y pH, no presentaron riesgo para los organismos, no fue el caso de la temperatura, que se considera el factor limitante para el desarrollo de las tilapias dentro del sistema acuapónico presentando valores debajo del promedio ($<20\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante varios meses y esta variable tiene relación directa con el NAT.

La concentración de Nitratos obtenida en los tratamientos, indica que los Sistemas Acuapónicos si generan condiciones de nutrición suficientes para el cultivo de las variedades de *L. sativa* empleadas aquí.

Los valores de OD, pH y temperatura solo fueron evaluados en la FA de todos los sistemas; por lo tanto, se recomienda hacer mediciones en diversos puntos con en FH, FB y FM.

Referencias

Castañeda-Villanueva, D.L. (2019). *Tratamiento de aguas residuales provenientes de la crianza de tilapias (Oreochromis niloticus) a través del sistema acuapónico de recirculación utilizando cultivos de lechuga (Lactuca sativa var. intybacea), albahaca (Ocimum basilicum) y acelga (Beta vulgaris var. cicla)*. (Tesis de licenciatura, Perú). <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/216>

- Delgado-Martínez, R. L. (2024). *Diseño de sistema de acuaponía automatizado para producción agrícola y piscícola a escala comercial*. (Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86030>
- Gallego-Alarcón, I. & García-Pulido, D. (2017). Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador-columna de arena. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 81-93. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-06>
- Hsien-Tsang, L. & Quintanilla, M. (2008). *Manual sobre producción y cultivo de tilapia*. Centro de Desarrollo de la Pesca y la Acuicultura (CENDEPESCA).
- Inosako, K., Troyo-Diéguez, E., Saito, T., & Lucero Vega, G. (2020). *Manual Técnico para Cultivo a Cielo Abierto usando Agua Residual de Acuaponia. Manual Técnico Sobre Acuaponía Combinada con Cultivo Cielo Abierto Adaptado en Zonas Áridas*.
- Malone Ronald, F., & Lance, B. (2000). Use of floating bead filters to recondition recirculating waters in warmwater aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, 22(1-2), 57-73.
- Martínez-Cruz, D. A. (2015). *Impacto ambiental de la agricultura de riego en la calidad del suelo y los recursos hídricos en el Distrito de Riego 038 Río Mayo Navojoa, Sonora México*. (Tesis de doctorado, Colegio de Postgraduados). <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2542>
- Mullins, C., Nerrie, B., Sink, T.D., & Beem, M. (2016). *Principles of small-scale aquaponics*. Oklahoma Cooperative Extension Service. <https://extension.okstate.edu/factsheets/principles-of-small-scale-aquaponics.html>
- Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. OMS. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Pérez, M., Sáenz, M., & Martínez, E. (2015). Crecimiento de las tilapias *Oreochromis niloticus* en cultivo Monosexual y Ambos sexos, en sistemas de producción semiintensivos. Universitat (León). *Revista Científica de la UNAN-León*, 6(1), 66-70.

- Pinho, S.M., Molinari, D., de Mello G.L., Fitzsimmons, K.M., & Emerenciano, M.G.C. (2017). Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecological Engineering*, 103, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.009>
- Rabasso Krohnert, M. S. (2006). Los impactos ambientales de la acuicultura, causas y efectos. *Vector plus*, 28, 89-98.
- Rodríguez-González, H., Rubio-Cabrera, S.G., García-Ulloa, M., Montoya-Mejía, M., & Magallón-Barajas, F.J. (2015). Análisis técnico de la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía. *Agroproductividad* 8 (3), 15-19. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/655>
- Rural, S. D. (2019). *Acuaponía, un sistema sustentable que produce peces y plantas*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuaponia-un-sistema-sustentable-que-produce-peces-y-plantas?>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. (2022). Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala – Cultivo integral de peces y plantas. *FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura No. 589*. FAO. <https://doi.org/10.4060/i4021es>
- Valdez-Martínez, D., Soto-Alcalá, J., y Hernández-Sandoval, P. (2023). Contribución de los sistemas acuapónicos en los objetivos del desarrollo sostenible y su relación con el COVID-19. *Revista Ra Ximhai*, 19 (3 Especial), 83-103. <https://doi.org/10.35197/rx.19.03.2023.04.dv>
- Valdez-Martínez, D. (2024). *Evaluación del desempeño productivo de un policultivo de Tilapia (*Oreochromis niloticus*) y Langostino (*Macrobrachium tenellum*) en un sistema acuapónico de Lechuga (*Lactuca sativa*) como estrategia sustentable de producción a pequeña escala. (Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Occidente)*. <https://uadeo.mx/posgrado/doctorado/sustentabilidad/repositorio-de-tesis/>