Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

Ingeniería Agronómica

Proyecto Especial de Graduación

Comparación de diferentes materiales para la elaboración de biofiltros para acuacultura

Estudiantes

Walter Lizandro Ponce Ponce

Carlos Antonio Ramos Padilla

Asesores

Patricio E. Paz, Ph.D.

Rogel Castillo, M.Sc.

Honduras, septiembre 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

JULIO NAVARRO

Secretaría General

Contenido

Índice de Cuadros.....5

Índice de Figuras 6

Índice de Anexos 7

Resumen 8

Abstract.....9

Introducción.....10

Metodología.....13

Ubicación 13

Materiales 13

Tratamientos.....14

Bio-Beads 14

Carbón Activado.....15

Teja.....17

Sistema de Filtraje.....17

Filtro Mecánico 18

Biofiltros.....18

Maduración de Biofiltros 19

API Test Kit 20

Muestras de Laboratorio 21

Porcentaje de Reducción NAT.....22

Diseño Experimental y Análisis Estadístico.....22

Resultados y Discusión.....23

Maduración de Biofiltros 23

Resultados Parámetros de Calidad de Agua 23

Nitrógeno Amoniacal Total ($NH_3 + NH_4^+$) (mg/L) 24

Eficiencia en Porcentaje de Reducción de Nitrógeno Amoniacal Total 25

Nitritos NO_2 (mg/L) 26

Nitratos (NO_3^-)(mg/L) 27

Conclusiones 33

Recomendaciones 34

Referencias 35

Anexos 33

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Comparación semanal de las concentraciones de nitrógeno amoniacal total (NH_3 + NH_4^+) por tratamiento 24

Cuadro 2. Porcentaje de reducción de nitrógeno amoniacal total (NH_3 + NH_4^+), por cada semana y tratamiento. 25

Cuadro 3. Comparación de promedios semanales de potencial de hidrogeno (pH), del agua de la laguna de Monterendondo y la salida de cada tratamiento. 26

Cuadro 4. Comparación semanal de las concentraciones de nitritos (NO_2^-) por cada tratamiento. ...27

Cuadro 5. Comparación semanal de las concentraciones de nitratos (NO_3^-) por cada tratamiento. ..28

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación satelital del proyecto de investigación, Unidad de Acuacultura Daniel E. Meyer, Zamorano, Honduras. 13

Figura 2. Biofiltro de Bio-Beads, terminado y listo para su instalación. 15

Figura 3. Carbón Activado colocado en bandejas de acero inoxidable dentro del horno, sometido a un proceso de purificación a 150 °C durante un período de 150 minutos. 16

Figura 4. Biofiltro de Carbón Activado, terminado y listo para su instalación. 16

Figura 5. Biofiltro de Teja terminado y listo para su instalación 17

Figura 6. Esquema de diseño 2D sistema de filtración, diseñado en programa AutoCAD versión 2023. 18

Figura 7. Esquema de diseño 3D sistema de filtración, diseñado en programa SketchUp online 19

Figura 8. Medición de Nitrógeno Amoniacal Total (Ammonia NH_3/ NH_4^+) utilizando carta Color Chart del API® Freshwater Master Test kit 21

Figura 9. Recipientes de 500 mL usados para la recolección de muestras de agua identificados con la fecha, tratamiento, repetición y número del muestreo 22

Figura 10. Oxidación de NAT en biofiltros, comprendido del día 1 al 15 en el periodo de maduración, datos tomados con el API® Freshwater Master Test kit. 23

Índice de Anexos

Anexo A Muestreo #1 evaluación de parámetros de calidad de agua con API® Freshwater Master Test Kit.....33

Anexo B Muestre #4 evaluación de parámetros de calidad de agua con API® Freshwater Master Test Kit.....34

Anexo C Sistema de Filtración funcionando, parte superior izquierda filtro mecánico de grava, parte derecha inferior, tratamientos evaluados y canal de desagüe. 35

Resumen

El crecimiento de la acuacultura ha aumentado la demanda de soluciones sostenibles como los biofiltros para tratar el agua afectada por residuos orgánicos, asegurando su calidad y la viabilidad del sector. El objetivo de este estudio fue evaluar y comparar la eficiencia de tres materiales en el proceso de nitrificación de amoniaco a nitrato, en aguas de uso acuícola aplicando el diseño de biofiltros percoladores. El T1-Control fue elaborado con bio-beads y grava, el T2 consistió en carbón activado y grava, y el T3 se estructuró con teja y grava. Las variables de calidad de agua evaluadas fueron pH, nitrógeno amoniacal total (NAT), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). Los datos de campo fueron analizados con una prueba de Kruskal-Wallis y los datos de laboratorio fueron analizados con un análisis de varianza. Durante la primera semana, el tratamiento con carbón activado fue el más eficiente, logrando una reducción del 95.74% del NAT. Sin embargo, en las semanas posteriores, la eficiencia de los biofiltros disminuyó drásticamente, con reducciones negativas, especialmente en la tercera semana. Esta disminución se relacionó con la presencia elevada de materia orgánica y sólidos suspendidos en el agua, lo que afectó el rendimiento de las bacterias nitrificantes. El pH también jugó un papel clave, ya que los valores ácidos dificultaron la nitrificación. Finalmente, hacia la cuarta semana, las concentraciones de NAT se estabilizaron, aunque sin diferencias significativas entre los tratamientos.

Palabras clave: Biofiltros, calidad de agua, nitrificación, nitritos, nitratos, pH.

Abstract

The growth of aquaculture has increased the demand for sustainable solutions such as biofilters to treat water affected by organic waste, ensuring its quality and the viability of the sector. The objective of this study was to evaluate and compare the efficiency of three materials in the process of nitrification of ammonia to nitrate in aquaculture water by applying the design of trickling filter biofilters. T1-Control was made with bio beads and gravel, T2 consisted of activated carbon and gravel, and T3 was structured with shingle and gravel. The variables for water quality evaluated were pH, total ammonia nitrogen (NAT), nitrite (NO2-) and nitrate (NO3-), Field data were analyzed with a Kruskal-Wallis test and laboratory data were analyzed with an analysis of variance. During the first week, the activated charcoal treatment was the most efficient, achieving a 95.74% reduction of NAT. However, in the subsequent weeks, the efficiency of the biofilters decreased drastically, with negative reductions, especially in the third week. This decrease was related to the high presence of organic matter and suspended solids in the water, which affected the performance of nitrifying bacteria. The pH also played a key role, as acidic values hindered nitrification. Finally, by the fourth week, NAT concentrations stabilized, although without significant differences between treatments.

Keywords: Biofilters, water quality, nitrification, nitrites, nitrates, pH.

Introducción

En los últimos años, la producción acuícola ha experimentado un crecimiento significativo. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2024), esta alcanzó un récord de 130.9 millones de toneladas en 2022, con un valor estimado en 313,000 millones de USD. Desde sus inicios, la acuacultura se ha destacado por ofrecer a los consumidores proteínas accesibles y de buena calidad, contribuyendo así a la seguridad alimentaria. Además, las nuevas tendencias alimenticias en las sociedades modernas, como la preferencia a alimentos más saludables, han dado paso al incremento en la demanda de productos de origen acuícola.

Sin embargo, la acuacultura, al igual que otras áreas de producción de alimentos, enfrenta múltiples desafíos en la actualidad. Entre ellos, el crecimiento de la población mundial, cifra que según el Fondo de Población de las Naciones Unidas (2023), a finales de 2022, alcanzó los 8,000 millones de personas. Esto sumado a la escasez de recursos naturales por malas prácticas en la producción. La FAO (2023), señala que cada vez hay menos agua para sustentar los ecosistemas de los que dependemos, por lo que se debe encontrar una manera de producir más con menos agua. Factores como la contaminación, la extracción excesiva y el cambio climático, ponen en detrimento el futuro de esta actividad productiva.

El agua, como recurso esencial para la acuacultura, desempeña un papel crucial, ya que su calidad determina el éxito o fracaso de la unidad de producción. Boyd (1998) señala que la calidad del agua abarca todos los factores físicos, químicos y biológicos que impactan cualquier aspecto relacionado con la supervivencia, reproducción y manejo de los animales acuícolas. Si el agua es de buena calidad, los animales acuáticos serán más productivos y saludables. Meyer (2004) menciona, que para lograr una producción óptima, es necesario mantener las condiciones ambientales del agua dentro de los límites de tolerancia para la especie cultivada. Los parámetros clave que deben gestionarse incluyen la temperatura, el pH, la concentración de oxígeno disuelto, la salinidad, la turbidez, la dureza, los nutrientes y los contaminantes.

Al llegar al estanque de producción, la calidad del agua es modificada por los residuos (disueltos y suspendidos) de los peces, que se componen de heces fecales, alimento balanceado no consumido y biomasa muerta de bacterias (Timmons et al., 2009). Estos residuos están constituidos principalmente por materia orgánica que, al disolverse en el agua, produce compuestos nitrogenados, como el amoniaco, que puede encontrarse en forma de amoniaco no ionizado (NH_3) que es tóxico y el ion amonio (NH_4^+) que no es tóxico, a menos que la concentración sea demasiada alta. A la suma de estos componentes se le conoce como Nitrógeno Amoniacal Total (Moreno y Arámbulo, 2020).

La concentración de contaminantes en el agua se incrementa cuando no hay un flujo adecuado en los estanques acuícolas. En cualquier sistema de producción, la circulación del agua actúa como un medio para trasladar los contaminantes hacia cuerpos de agua cercanos, por lo que es necesario explorar las alternativas que existen para remover estos contaminantes antes de que las descargas alcancen el medio natural (Aragón Monter, 2014).

Los biofiltros han sido usados como pieza clave en los Sistemas de Recirculación Acuícola (SRA), estos se presentan como una alternativa accesible, económica y de fácil aplicación para el tratamiento de aguas de uso acuícola. Su función se basa en el proceso de nitrificación en donde bacterias del género *Nitrosomas* spp. y *Nitrobacter* spp. se encargan de oxidar el amonio a nitritos y posteriormente a nitratos versión menos toxica para los organismos acuáticos.

Para un funcionamiento eficaz de los biofiltros, es fundamental proporcionar condiciones óptimas para el crecimiento bacteriano. Entre los distintos tipos de biofiltros disponibles, se destacan los biofiltros percoladores porque en su diseño se busca mantener un flujo constante de agua, lo cual es esencial para mantener la película bacteriana húmeda y no sumergida, esto asegura un suministro adecuado de oxígeno, necesario para el proceso de oxidación aeróbica (Merino y Sal, 2007).

Los beads son pequeñas esferas de material plástico poroso que flotan en el agua y se utilizan ampliamente en el tratamiento mecánico y biológico de aguas. Con una superficie específica de 1600 m^2/m^3, estos beads proporcionan un área de alta calidad para el desarrollo del biofilm. Este biofilm es

crucial porque facilita el asentamiento de bacterias nitrificantes que se encargan de consumir amoníaco, nitritos y nitratos de manera eficiente. Gracias a su estructura, los beads optimizan el proceso de nitrificación y mejoran significativamente la calidad del agua tratada (Estanques, 2024).

Por otro lado, el carbón activado granular (CAG) se destaca como un adsorbente altamente eficiente y es uno de los materiales más utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Su capacidad de adsorción se debe a su estructura altamente porosa y a su gran área superficial. Los biofiltros que emplean CAG representan una alternativa eficaz para el tratamiento de efluentes acuícolas, ya que proporcionan un soporte óptimo para poblaciones microbianas que pueden biodegradar o nitrificar compuestos contaminantes. Además, el CAG actúa directamente en la remoción de contaminantes mediante adsorción, ofreciendo una solución integral para mejorar la calidad del agua tratada (Aragón Monter et al., 2013).

Por último, la teja de barro se presenta como un material valioso en la construcción de biofiltros debido a su porosidad, que proporciona una superficie ideal para el crecimiento del biofilm necesario para la biodegradación de contaminantes en el agua. Su bajo costo y disponibilidad la hacen una opción atractiva, especialmente en áreas con recursos limitados. Además, es una alternativa ecológica al estar hecha de materiales naturales. Una implementación efectiva de los biofiltros puede ser una solución valiosa para abordar los retos actuales en acuacultura y asegurar una producción sostenible.

Por esta razón se propuso como objetivo principal, comparar la eficiencia de estos tres materiales en el proceso de nitrificación, evaluando parámetros de calidad de agua como: Nitrógeno amoniacal total, nitritos, nitratos y pH, en aguas de uso acuícola aplicando el diseño de biofiltros percoladores.

Metodología

Ubicación

El estudio se realizó en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano (EAP) en la unidad de Acuacultura Daniel E. Meyer, ubicada en el Valle del Yegüare, del departamento de Francisco Morazán, a una elevación de 800 msnm; temperatura promedio de 26 °C y una precipitación anual promedio de 1100 mm (Figura 1). El experimento se realizó entre los meses de junio hasta agosto de 2024; los datos fueron tomados durante un periodo de seis semanas.

Figura 1

Ubicación satelital del proyecto de investigación, Unidad de Acuacultura Daniel E. Meyer, Zamorano, Honduras.

Materiales

Los materiales utilizados durante el experimento fueron; cinco lances de tubo PVC de 1”, 21 codos PVC 1”, cuatro cruces PVC 1”, una bomba Truper sumergible de ½ HP, filtro mecánico (grava), 10 recipientes de 18 litros, nueve tapaderas para los recipientes, 11 válvulas PVC de 1”, un bote de

pegamento para PVC, una hoja de corte, nueve bolsas de malla de 50 micras, materiales filtrantes: Bio-Beads, carbón activado y teja.

Tratamientos

En este experimento se seleccionaron tres diferentes materiales filtrantes para su evaluación, estos se identificaron de la siguiente manera:

T1- Bio-Beads (control)

T2- Carbón activado

T3- Teja

Bio-Beads

La unidad de acuacultura contaba con este material almacenado, por lo cual se decidió evaluarlo dentro de la investigación, a este se le hizo un proceso de lavado y desinfección con hipoclorito de sodio al 5%, posteriormente fueron enjuagados para eliminar los residuos del químico antes mencionado. Seguidamente se realizó el proceso de secado al sol durante todo un día con el objetivo de eliminar la humedad presente en el material y una desinfección adicional con la radiación ultravioleta proporcionada por el sol; al finalizar ese proceso se procedió a ser utilizado para el sistema de biofiltración (Figura 2).

Figura 2

Biofiltro de Bio-Beads, terminado y listo para su instalación.

Carbón Activado

El carbón activado utilizado en el sistema de biofiltración fue una donación recibida por la unidad de acuacultura. Dado que el material donado seria reutilizado, fue necesario someterlo a un proceso de secado y sanitización por temperatura, para garantizar su eficacia. Este proceso consistió en el tratamiento térmico del carbón activado en un horno a 150 °C durante un período de 150 minutos, con el fin de eliminar posibles contaminantes y restaurar sus propiedades adsorbentes (Figura 3). Una vez completado este procedimiento, el carbón activado fue incorporado al sistema de biofiltración, asegurando su óptimo desempeño en la eliminación de contaminantes (Figura 4).

Figura 3

Carbón Activado colocado en bandejas de acero inoxidable dentro del horno, sometido a un proceso de purificación a 150 °C durante un período de 150 minutos.

Figura 4

Biofiltro de Carbón Activado, terminado y listo para su instalación.

Teja

Las tejas fueron obtenidas de la unidad de reciclaje y trasladadas a la unidad de acuacultura Daniel E. Meyer, donde se llevó a cabo un proceso de limpieza exhaustivo. Inicialmente, se lavaron con agua para eliminar cualquier residuo de suciedad en su superficie. Posteriormente, se colocaron en un área al aire libre para que se secaran bajo la luz solar. Al día siguiente, se utilizó un martillo para quebrarlas, con el objetivo de obtener fragmentos de aproximadamente 7 cm (Figura 5).

Figura 5

Biofiltro de Teja terminado y listo para su instalación

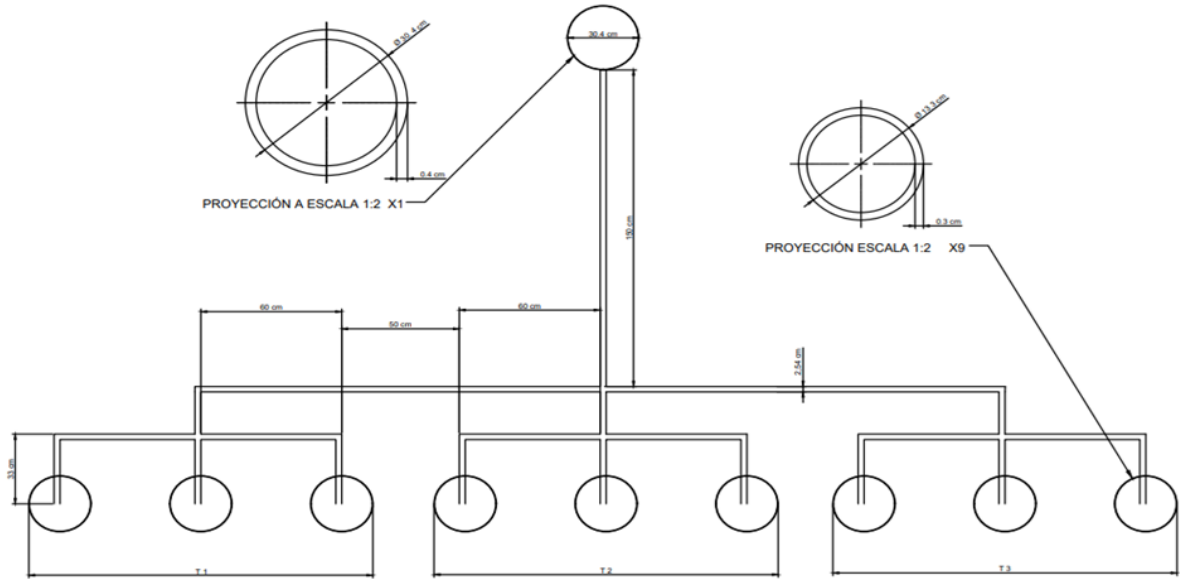
Sistema de Filtraje

El sistema de filtraje estuvo compuesto por nueve biofiltros y un filtro mecánico de grava, todo el sistema era alimentado por una bomba Truper sumergible de ½ HP. El agua fue extraída de la laguna de Monterredondo, al ingresar al sistema esta pasaba primeramente por un filtro mecánico cuya función principal era, la de disminuir la carga de solidos en suspensión presentes en el agua. Luego, esta fue distribuida a través de la tubería central a los diferentes biofiltros, se hizo un ajuste en cada una de las válvulas de alimentación para que el flujo fuera lo más homogéneo posible y así evitar un desequilibrio en el sistema; es importante mencionar que el flujo de agua era continuo y su funcionamiento era continuo (Figura 6). Para evitar problemas por saturación dentro del sistema y con la intención de facilitar el mantenimiento de este, se le agrego un proceso de retro lavado al filtro

mecánico, con lo cual se le hizo una limpieza dos veces por semana después de cada muestreo; cada biofiltro tuvo en su parte inferior una salida de agua, las cuales caían directamente a un canal de descarga que se encargaba de llevar el efluente resultante a otro punto de la laguna. Todo este sistema se diseñó y construyó por gravedad, teniendo una inclinación de 9°.

Figura 6

Esquema de diseño 2D sistema de filtración, diseñado en programa AutoCAD versión 2023.



Filtro Mecánico

El filtro mecánico fue construido utilizando un recipiente plástico con una capacidad de 120 litros. Se perforaron orificios de una pulgada en el centro de la tapa y a 10 cm de la base del recipiente para permitir la entrada y salida de la tubería respectivamente. Posteriormente, el recipiente fue llenado en un 70% con grava, y se procedió a instalarlo en el lugar asignado para el experimento.

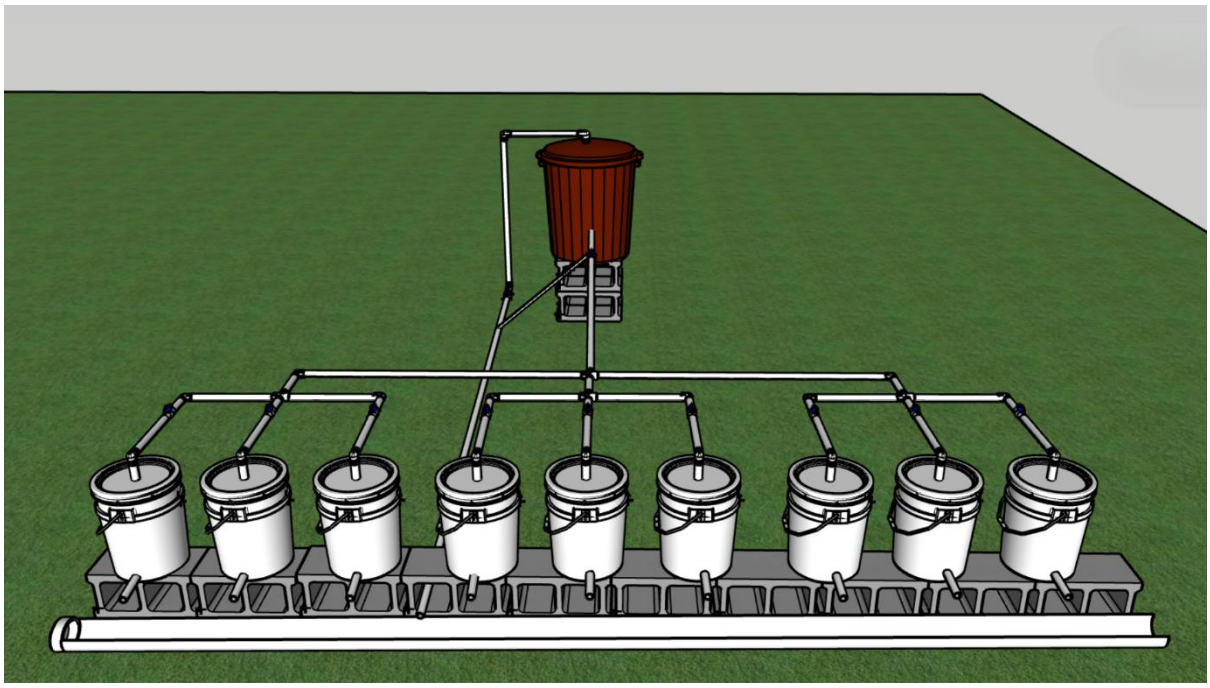
Biofiltros

Para los biofiltros, se utilizaron recipientes plásticos de 18 L. Se realizaron perforaciones de una pulgada en el centro de la tapa y a 5 cm de la base para la instalación de la tubería de entrada y salida respectivamente. En la base del recipiente, se colocó una capa de grava de 10 cm, seguida de una capa de 18 cm de material filtrante, que se colocó dentro de una bolsa hecha con malla de 50

micras para facilitar su limpieza. Esta estructura fue replicada en todos los biofiltros empleados durante el experimento, garantizando uniformidad en el proceso de filtración (Figura 7). A cada recipiente se le colocó 40 g de alimento para tilapia 32% como sustrato para el establecimiento de las bacterias nitrificantes y ayudar así a acelerar un poco el proceso de maduración de cada biofiltro.

Figura 7

Esquema de diseño 3D sistema de filtración, diseñado en programa SketchUp online



Maduración de Biofiltros

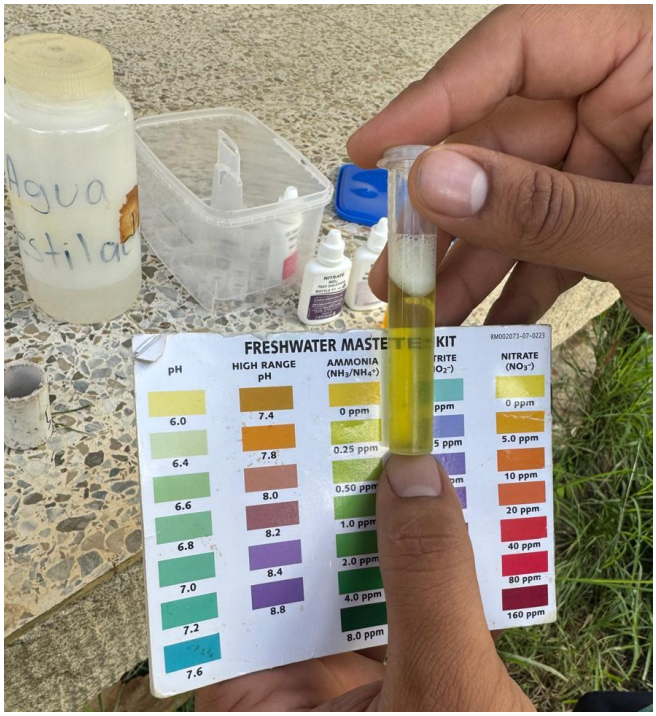
El proceso de maduración de los biofiltros es de suma importancia, debido a que este determina el éxito de su funcionamiento. Durante este tiempo se midieron variables de calidad de agua: pH, Nitrógeno Amoniacal Total (mg/L), nitritos (mg/L) y nitratos (mg/L). Mediante el uso de un API® Freshwater Master Test kit, se midió el comportamiento de los parámetros antes mencionados, esta actividad se realizó dos días a la semana (martes y sábado). Según González-Rodríguez et al. (2012) un biofiltro está maduro cuando los compuestos nitrogenados tienen un comportamiento inversamente proporcional, las concentraciones de NAT disminuyen y la presencia de nitratos aumenta.

API Test Kit

De cada repetición se tomaron cuatro muestras de 5 mL en tubos de ensayo, cada tubo sirvió para medir un parámetro en específico. En el caso de pH se le agregó al tubo tres gotas de pH Test Solution y se agitó. Para Amonio se agregaron ocho gotas del frasco n° 1 de Ammonia (NH_3/ NH_4^+) Test Solution, luego se añadieron ocho gotas del frasco n° 2 de Ammonia (NH_3/ NH_4^+) Test Solution, esta mezcla se agitó por cinco segundos y se dejó reposar por cinco minutos. Para nitritos se colocaron cinco gotas de Nitrito (NO_2^-) Test Solution, se agitó por cinco segundos y se dejó en reposo por cinco minutos. En el caso de nitratos al tubo se añadieron diez gotas del frasco n° 1 de Nitrato (NO_3–) Test Solution, se agitó el tubo con el fin de mezclar la solución, el frasco n° 2 de Nitrato (NO_3–) Test Solution se agitó 30 segundos antes de agregarle diez gotas a la solución anterior, luego se agitó junto por un minuto. Al pasar el tiempo de espera de cada tubo la coloración se comparó con la carta Color Chart que contiene una escala de colores según la cantidad de cada parámetro (Aquarium pharmaceuticals [API], 2009).

Figura 8

Medición de Nitrógeno Amoniacal Total (Ammonia NH_3/ NH_4^+) utilizando carta Color Chart del API® Freshwater Master Test kit



Muestras de Laboratorio

Una vez por semana se tomaron muestras de cada tratamiento y de la laguna, en recipientes plásticos de 500 mL. Luego de ser recolectadas estas fueron transportadas en una hielera Coleman® con gel refrigerante para mantener una temperatura de 10 °C. Los análisis se realizaron en el Laboratorio Energía Ambiente y Desarrollo, en el Departamento de Ambiente y Desarrollo.

Figura 9

Recipientes de 500 mL usados para la recolección de muestras de agua identificados con la fecha, tratamiento, repetición y número del muestreo

Porcentaje de Reducción NAT

Para calcular el porcentaje de reducción de NAT, Kir (2009), indica que la proporción de reducción de amonio (NR en %), ayuda a establecer el ciclo de disminución de amonio en los biofiltros. La NR representa el porcentaje de nitrógeno amoniacal total (NAT) que se reduce al atravesar el biofiltro. Para calcular la NR, se utilizó la ecuación 1:

$$NR\ (\%) = [(NATi - NATs)/NATi] \times 100 \qquad [1]$$

Donde NR es la reducción de amonio, expresado en porcentaje, NATi es el nitrógeno amoniacal total que ingresa y el NATs es el nitrógeno amoniacal total que sale del biofiltro. Las unidades son expresadas en mg/L y el resultado en porcentaje.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se usó un diseño completamente al azar con tres tratamientos y tres repeticiones de cada uno. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANDEVA), en caso necesario se usó la prueba de Tukey para comparación de las medias y evaluar la existencia de diferencias significativas entre sí con una probabilidad de ($P \leq 0.05$)

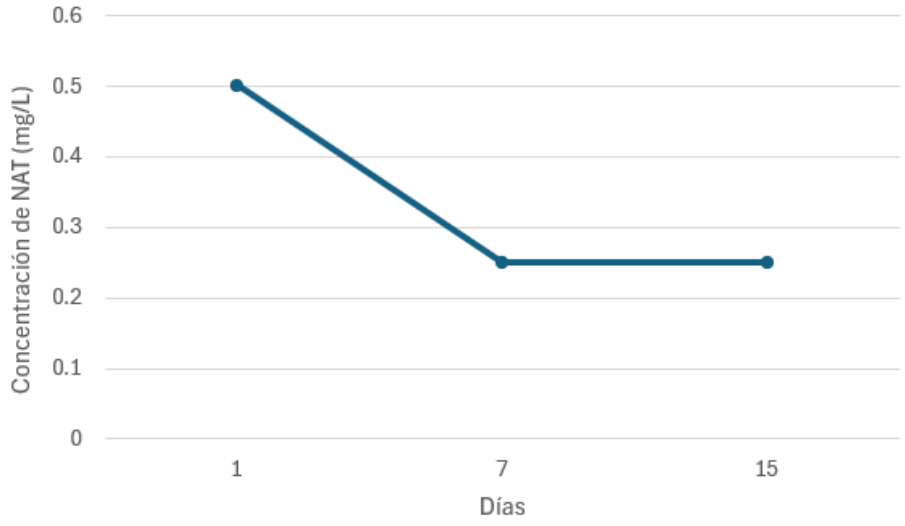
Resultados y Discusión

Maduración de Biofiltros

La maduración de los biofiltros tomó 15 días, periodo durante el cual las concentraciones de Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) disminuyeron de 0.50 mg/L a 0.25 mg/L. La Figura 10 muestra el comportamiento del NAT en los efluentes de los biofiltros a lo largo del tiempo. El tiempo requerido para la maduración de los biofiltros puede oscilar entre siete y 60 días, dependiendo de varios factores, siendo los más relevantes la temperatura del agua y la cantidad de nutrientes presentes en la misma (Gallego-Alarcón y García-Pulido, 2017).

Figura 10

Oxidación de Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) en biofiltros, comprendido del día 1 al 15 en el periodo de maduración, datos tomados con el API® Freshwater Master Test kit



Resultados Parámetros de Calidad de Agua

Durante el experimento se evaluaron parámetros de calidad de agua con la finalidad de determinar el funcionamiento de los biofiltros en el proceso de nitrificación. Los parámetros que se registraron fueron; nitrógeno amoniacal total, nitritos y nitratos.

Nitrógeno Amoniacal Total ($NH_3 + NH_4^+$) (mg/L)

Los resultados del nitrógeno amoniacal total (NAT) son de suma importancia para este proyecto, ya que sus resultados son la base para poder determinar la eficacia de cada tratamiento. Durante las cuatro semanas de duración del experimento, después de la maduración de los biofiltros, existieron diferentes resultados tanto positivos como negativos.

Durante la primera semana de función de los biofiltros, no se observaron diferencias ($P > 0.05$) entre los tratamientos. Lo contrario se observó en la segunda semana, donde sí se presentó una diferencia ($P \leq 0.05$), en donde el T3-Teja presentó un aumento del NAT (Cuadro 1). El agua de la laguna fue un factor que afectó las tasas de reducción del NAT, debido a un aumento en la presencia de carga solida en este líquido. Esta situación ocurre porque, según Chen et al. (2006), las aguas residuales de la acuacultura contienen materia orgánica, lo que favorece el crecimiento de bacterias heterotróficas. Estas bacterias compiten con las bacterias nitrificantes por el espacio y el oxígeno, dificultando el proceso de nitrificación.

Cuadro 1

Comparación semanal de las concentraciones de nitrógeno amoniacal total ($NH_3 + NH_4^+$) por tratamiento

Tratamiento	Nitrógeno Amoniacal Total (mg/L) /Semana			
	1	2	3	4
Laguna	10.96	4.960	0.320	3.420
Bio-beads	0.777	2.277[a]	4.100	3.017
Carbón activado	0.467	1.500[a]	4.040	5.393
Teja	0.673	5.417[b]	2.533	3.660
EE	3.208	0.344	1.108	0.596
Valor P	0.22	0.0007	0.3631	0.1209

Nota. EE: Error Estándar

El carbón activado y los bio-beads fueron iguales, siendo en esa semana los que tuvieron niveles más bajos de nitrógeno amoniacal total. En la tercera y cuarta semana no se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo, esto se puede atribuir a un fenómeno natural, que afectó la fuente de agua utilizada, ya que por las condiciones climatológicas aumentó la materia orgánica y solidos suspendidos (Cuadro 2). Kim y Jo (2009) afirman que existe una disminución

en el proceso de nitrificación a medida que aumenta la presencia de materia orgánica, esto debido a que estos desechos se acumulan en las superficies del medio filtrante, resaltando la importancia de un tanque sedimentador previo al paso por el biofiltro.

Cuadro 2

Porcentaje de reducción de nitrógeno amoniacal total ($NH_3 + NH_4^+$), por semana y tratamiento

Semana	Tratamiento	NAT inicial (mg/L)	NAT final (mg/L)	% Reducción
1	Bio-beads	10.97	0.78	92.92
	Carbón activado		0.47	95.74
	Teja		0.67	93.86
2	Bio-beads	4.96	2.28	54.10
	Carbón activado		1.50	69.76
	Teja		5.42	-9.21
3	Bio-beads	0.32	4.10	-1181.25
	Carbón activado		4.04	-1162.50
	Teja		2.53	-691.66
4	Bio-beads	3.42	3.02	11.79
	Carbón activado		5.39	-57.70
	Teja		3.66	-7.02

Nota. NAT: Nitrógeno Amoniacal Total; Números negativos indican un aumento.

Eficiencia en Porcentaje de Reducción de Nitrógeno Amoniacal Total

Las muestras tomadas durante la primera semana fueron las que lograron altas tasas de oxidación de NAT alcanzado porcentajes de hasta 95.74% de reducción, mostrando una tendencia que disminuyo en la semana 2 como se observa en el Cuadro 2. Según Aragón Monter et al. (2013) los biofiltros que utilizan carbón activado como material filtrante representan una opción viable para el tratamiento de aguas residuales acuícolas, ya que proporcionan un hábitat adecuado para el crecimiento de comunidades microbianas que pueden llevar a cabo procesos de biodegradación o nitrificación, al mismo tiempo que eliminan contaminantes mediante adsorción.

Sin embargo, en las siguientes semanas se notó un descenso en las tasas de reducción, siendo el periodo de semana 3 el más crítico para todos los tratamientos. En esta semana las cantidades de NAT fueron mayores en los efluentes de los biofiltros en relación con los tomados en la laguna, alcanzando rangos de -691.66% a -1181.25% de reducción. El pH es un factor clave en el proceso de nitrificación; Boyd (2015) establece que la nitrificación se lleva a cabo de manera más eficiente cuando

los niveles de pH se encuentran entre 7 y 8, optimizando la actividad bacteriana en este rango. En las muestras, los valores de pH tomados de los efluentes de los biofiltros oscilaron entre 6.60 y 6.90 (Cuadro 3). Según Villaverde et al. (1997) el rango óptimo de pH para la actividad de Nitrosomonas se sitúa entre 7.2 y 8.8, mientras que para Nitrobacter, se extiende de 7.2 a 9.0. Estos valores son cruciales, ya que fuera de esos rangos, la eficiencia del proceso de nitrificación disminuye considerablemente, afectando la conversión de amoníaco a nitritos y posteriormente a nitratos.

Cuadro 3

Comparación de promedios semanales de potencial de hidrogeno (pH), del agua de la laguna de Monterredondo y la salida de cada tratamiento

Semana	Tratamiento	pH inicial	pH final
1	Bio-beads	6.70	6.70
	Carbón activado		6.60
	Teja		6.60
2	Bio-beads	7.00	6.73
	Carbón activado		6.67
	Teja		6.77
3	Bio-beads	7.00	6.90
	Carbón activado		6.77
	Teja		6.80
4	Bio-beads	7.10	6.73
	Carbón activado		6.73
	Teja		6.80

Nota. pH: Potencial de Hidrogeno

En el Cuadro 3 se evidencia una disminución del pH en los biofiltros durante todas las semanas, en comparación con el pH del agua de la laguna Monterredondo. Según Boyd (2015), la nitrificación es un proceso de oxidación en el que las moléculas van adquiriendo electrones, en este caso provenientes del oxígeno (O_2), y que también se liberan protones, específicamente hidrógeno (H^+). Esta liberación de protones provoca una acidificación del entorno, lo que significa que el pH del agua disminuye.

Nitritos NO_2 (mg/L)

Los resultados obtenidos sobre los nitritos en los efluentes de los biofiltros indican que en las primeras tres semanas del experimento se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) (Cuadro 4). Estos

resultados indican que este parámetro se mantuvo en un rango aceptable por debajo de los niveles considerados tóxicos para la producción acuícola, asegurando condiciones seguras para el desarrollo óptimo de organismos acuáticos. Ya que, según Somerville et al. (2022) los nitritos son perjudiciales cuando superan concentraciones de 1 mg/L.

Cuadro 4

Comparación semanal de las concentraciones de nitritos (NO_2^-) por cada tratamiento

Tratamiento	Nitritos (mg/L) /Semana			
	1	2	3	4
Laguna	0.030	0.210	0.080	0.070
Bio-beads	0.143[a]	0.287[a]	0.100[a]	0.153
Carbón activado	0.173[b]	0.283[a]	0.107[b]	0.137
Teja	0.143[a]	0.290[b]	0.097[a]	0.100
EE	0.025	0.011	0.003	0.022
Valor P	0.044	0.045	0.015	0.239

Nota. EE: Error Estándar

Durante el proceso de maduración los nitritos se reducen rápidamente a nitratos por lo que sus mediciones son bajas (Boyd, 2015). Nuestros resultados indican que la reducción de Nitrógeno Amoniacal Total a nitritos estuvo dentro de lo normal.

Nitratos (NO_3^-)(mg/L)

No se observó diferencias significativas entre tratamientos. Cabe recalcar que la concentración de nitratos se redujo de la primera semana hasta la tercera semana, mostrando un leve aumento en la semana 4; pero estos datos se encuentran dentro de los rangos aceptable para este parámetro. Según Bautista Covarrubias y Ruiz Velazco (2011) los niveles de nitrato entre 0 y 40 mg/L suelen ser seguros para los peces, pero cuando superan los 80 mg/L pueden provocar intoxicaciones. De manera similar, el aumento de nitratos también tiene un impacto negativo en el ambiente acuático, promoviendo la eutrofización del agua y alterando la química de los sedimentos.

Cuadro 5

Comparación semanal de las concentraciones de nitratos (NO_3^-) por cada tratamiento.

Tratamiento	Nitratos (mg/L) /Semana			
	1	2	3	4
Laguna	0.856	0.710	0.445	0.517
Bio-beads	1.118	0.830	0.577	0.724[b]
Carbón activado	1.099	0.809	0.550	0.674[a]
Teja	1.008	0.843	0.597	0.697[a]
EE	0.116	0.031	0.026	0.026
Valor P	0.524	0.2799	0.1164	0.0354

Nota. EE: Error Estándar

Enfatizar, que a medida que avanzaron las semanas, las concentraciones de nitratos mostraron una tendencia a disminuir gradualmente, alcanzando una reducción considerable hacia el final de la tercera semana. Este comportamiento es similar con lo reportado por Rubio (2010), quien observó una disminución progresiva en los niveles de nitratos en su estudio; el experimento, empleó dos tratamientos diferentes, registrando una reducción en la concentración de nitratos desde un valor inicial de 11.6 mg/L en el día 0, hasta 0.26 mg/L al término del día 20, lo que indica una disminución drástica a lo largo del período de investigación. Los resultados obtenidos en esta variable indican que la reducción de nitratos es un fenómeno que ocurre a lo largo del tiempo, independientemente de las variaciones en los tratamientos empleados, debido a procesos de degradación natural y la actividad microbiana. Sin embargo, en la cuarta semana del experimento se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos; esta variación puede atribuirse a las diferencias en las condiciones fisicoquímicas de la fuente de agua utilizada, particularmente debido a la presencia de concentraciones elevadas de sólidos suspendidos observadas en la tercera semana. De acuerdo con Pire Sierra et al. (2010), cuando existe una alta carga orgánica en el agua, puede impactar negativamente a las bacterias responsables del proceso de nitrificación, e incluso llegar a inhibirlo.

Conclusiones

El biofiltro compuesto por carbón activado fue el tratamiento que registro una menor concentración de Nitrógeno Amoniacal Total, durante las primeras dos semanas.

El pH posiblemente influyó en la eficiencia de la reducción del Nitrógeno Amoniacal Total, ya que sus valores estuvieron por debajo de los niveles óptimos necesarios para las bacterias nitrificantes.

Recomendaciones

Realizar la misma evaluación en un sistema de recirculación acuícola o acuapónico, para evaluar la eficiencia de cada tratamiento.

Brindar un mayor tiempo a la etapa de maduración de los biofiltros, con el fin de promover un mejor establecimiento de las bacterias nitrificantes.

Agregar al esquema de diseño un tanque de sedimentación, como complemento que reduzca las altas concentraciones de sólidos.

Adicionar a las evaluaciones futuras parámetros de calidad de agua como temperatura, oxígeno disuelto y alcalinidad.

Referencias

Aquarium pharmaceuticals. (2009). *Ammonia (NH3/NH4 +) test kit instructions.* Aquarium pharmaceuticals (API). https://www.apifishcare.com/pdfs/products-us/freshwater-master-test-kit/api-freshwater-master-test-kit-instruction-manual.pdf

Aragón Monter, R. (2014). *Uso de carbón activado granular (cag) para el tratamiento de los efluentes de la granja integral de policultivo de tezontepec de aldama, hgo [*Tesis]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.

Aragón Monter, R., Ramírez Godínez, J., Coronel Olivares, C., Lucho Constantino, C. y Vázquez Rodríguez, G. (2013). *Uso de carbón activado granular (cag) en un biofiltro para el tratamiento de efluentes acuícolas.*

Bautista Covarrubias, J. C. y Ruiz Velazco, J. M. (2011). Calidad de agua para el cultivo de Tilapia en tanques de geomembrana. *Fuente*, *3*(8). http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/568

Boyd, C. E. (1998). *Water quality for pond aquaculture.* Auburn University.

Boyd, C. E. (2015). *Water Quality: An Introduction* (2nd ed. 2015). Springer International Publishing; Imprint: Springer.

Chen, S., Ling, J. y Blancheton, J.-P. (2006). Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. *Aquacultural Engineering*, *34*(3), 179–197. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.004

Fondo de Población de las Naciones Unidas. (2023). *8,000 millones de vidas, infinitas posibilidades*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.unfpa.org/sites/default/files/swop23/SWOP2023-SPANISH-230403-web.pdf

Gallego-Alarcón, I [Iván] y García-Pulido, D [Daury] (2017). Remoción de nitrógeno amoniacal total en un biofiltro: percolador-columna de arena. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, *08*(1), 81–93. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-06

González-Rodríguez, A., Burrola-Aguilar, C., García-Pulido, D [D.] y Gallego-Alarcón, I [I.]. (2012). *Alternativa para establecer el momento de maduración de un biofiltro inserto en un SRA.* Universidad Autónoma del Estado de México.

Kim, I.-B. y Jo, J.-Y. (2009). *Intensive system biofilter provides effective suspended solids treatment - Responsible Seafood Advocate.* Global Seafood Alliance. https://www.globalseafood.org/advocate/intensive-system-biofilter-provides-effective-suspended-solids-treatment/

Kir, M. (2009). Nitrification performance of a submerged biofilter in a laboratory scale size of the recirculating shrimp system. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *9*(2), 209–214. https://doi.org/10.4194/trjfas.2009.0213

Merino, O. G. y Sal, F. M. (2007). *Sistemas de recirculación y tratamiento de agua.* CENADAC.

Meyer, D. E. (2004). *Introduccion a la acuacultura.* Escuela Agricola Panamericana Zamorano.

Moreno, S. y Arámbulo, V. (2020). *Diseño de un protocolo efectivo para la maduración y manejo de biofiltros para sistemas de recirculación en acuicultura en CENAIM* [Tesis]. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil,Ecuador. https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/50681/1/T-109775%20Moreno-Arámbulo.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2023). *El agua es vida, el agua nutre. No dejar a nadie atrás.*

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2024). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. https://www.fao.org/publications/home/fao-flagship-publications/the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture/es

Pire Sierra, M. C., Palmero, J., Araujo, I. y Diaz, A. (2010). Tratabilidad del efluente de una teneria usando un reactor por carga secuencial. *Maracaibo*, *20*(3).

Rubio, D. (2010). Evaluación de medios filtrantes en un biofiltro percolador de flujo continúo a escala de laboratorio. *Revista De Investigacion*, *3*(1). http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/798

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. y Lovatelli, A. (2022). *Produccion de alimentos en acuaponia a peque;a escala: cultivo integral de peces y plantas*. FAO.

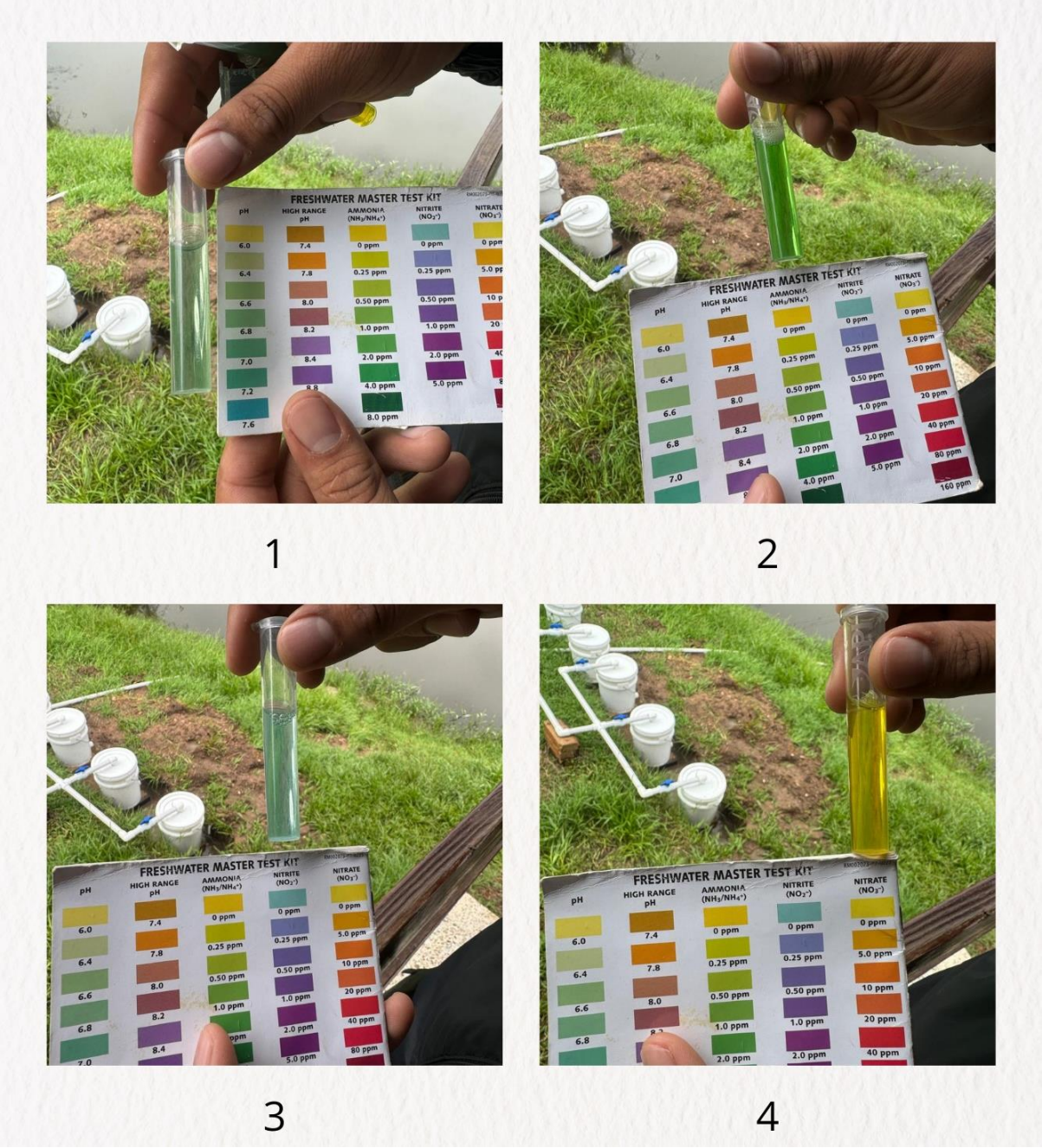
Timmons, M. B., Ebeling, J. M. y Piedrahita, R. H. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación* (M. Hevia, G. Parada y R. Labatut, Eds.) (Primera edición en español). Cayuga Aqua Ventures.

Villaverde, S., García-Encina, P. A. y FDZ-Polanco, F. (1997). Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters. *Water Research*, *31*(5), 1180–1186. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00376-4

Anexos

Anexo A

Muestreo #1 evaluación de parámetros de calidad de agua con API® Freshwater Master Test Kit



Nota: 1 = parámetro pH, 2 = parámetro NAT (NH3 + $NH4^+$), 3 = parámetro nitrito (NO2), 4 = parámetro nitrato (NO3−).

Anexo B

Muestre #4 evaluación de parámetros de calidad de agua con API® Freshwater Master Test Kit

Nota: 1 = parámetro pH, 2 = parámetro NAT ($NH3 + NH4^+$), 3 = parámetro nitrito (NO2), 4 = parámetro nitrato (NO3−).

Anexo C

Sistema de Filtración funcionando, parte superior izquierda filtro mecánico de grava, parte derecha inferior, tratamientos evaluados y canal de desagüe.