



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

**EVALUACIÓN DE BIOFLOC FORTIFICADO PARA LA
PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN SISTEMA DE ACUAPONIA
TESIS**

Que como requisito parcial
para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

CLAUDIA LORENA CERÓN ARGÜELLES

Bajo la supervisión de: **DR. JOEL PINEDA PINEDA**



APROBADA



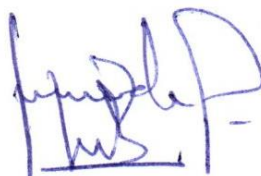
Chapingo, Estado de México
Junio del 2023.

EVALUACIÓN DE BIOFLOC FORTIFICADO PARA LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN SISTEMA DE ACUAPONIA

Tesis realizada por **Claudia Lorena Cerón Argüelles** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



Dr. Joel Pineda Pineda

CO-DIRECTORA:



Dra. Raquel Salazar Moreno

ASESOR:



Dr. Luis Fernando Contreras Cruz

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Fuentes consultadas	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1 La agricultura en México	6
2.2 La acuicultura y el cultivo de tilapia	6
2.2.1 Alimentación	8
2.3 El cultivo de lechuga y la técnica de hidroponía.....	9
2.4 Manejo de un sistema de Acuaponía	11
2.4.1 Calidad del agua para el cultivo de tilapia	12
2.4.2 Mineralización y nitrificación para la remoción de amonio (NH_4^+)	13
2.4.3 Calidad del agua para el cultivo de lechuga.....	14
2.4.4 La tecnología “Biofloc”	16
2.5 Fuentes consultadas	18
3. COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LECHUGA (<i>Lactuca sativa</i> L. var. Vulcan) CON ACUAPONIA CONVENCIONAL Y BIOFLOC.....	1
3.1 INTRODUCCIÓN	3
3.1.1 Acuaponía y los sistemas de recirculación (RAS)	3
3.1.2 “Biofloc” y el cultivo de tilapia en México	4
3.1.3 El cultivo de lechuga	5
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS	6
3.2.1 Ubicación del experimento.....	6
3.2.2 Tratamientos y diseño experimental	6

3.2.3	Montaje de unidades de producción	7
3.2.4	Análisis de calidad del agua.....	8
3.2.5	Concentración de nutrimentos en tejido de lechuga y solución.....	8
3.2.6	Calidad del agua en tanque de peces	9
3.2.7	Biometrías de peces	10
3.2.8	Análisis estadístico	10
3.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	10
3.3.1	Análisis de la calidad del agua	10
3.3.2	Variables de crecimiento y desarrollo de lechuga	11
3.3.3	Rendimiento.....	13
3.3.4	Nutrimentos en tejido de lechuga.....	15
3.3.5	Solución nutritiva.....	18
3.3.6	Calidad de agua en tanque de peces.....	20
3.4	CONCLUSIONES	24
3.5	REFERENCIAS CITADAS	25

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros óptimos de calidad del agua para cultivo de Tilapia sp. ...	8
Cuadro 2. Propiedades físicas de sustratos usados en horticultura.	11
Cuadro 3. Intervalos de tolerancia en la calidad de agua para peces de clima cálido, plantas y bacterias nitrificantes.	15
Cuadro 4. Procedimientos utilizados en la determinación de calidad del agua...	9
Cuadro 5. Análisis de la calidad del agua usada en T1-Bio y T2-Rec comparada con otros parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola.	11
Cuadro 6. Comparación de las variables morfológicas de crecimiento y desarrollo de lechuga en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec realizado en mayo del 2022.	12

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del proyecto de investigación.	6
Figura 2. Diseño del sistema (T1-Bio)	8
Figura 3. Diseño del sistema (T2-Rec)	8
Figura 4. Comparación del rendimiento de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) en función de los tratamientos T1-Bio, T2-Rec durante el mes de mayo 2022.	14
Figura 5 Comparación de la concentración de nutrimentos en el tejido de lechuga en función de los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.....	17
Figura 6. Comparación de la concentración de nutrimentos en la solución nutritiva en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.	19
Figura 7. Comparación de los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, medidos semanalmente en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.....	21
Figura 8. Comparación de las concentraciones de amonio, nitritos y nitratos medidos semanalmente en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.	23

DEDICATORIA

A mis padres: **Yolanda y Guillermo**

A mis hermanos: **Cynthia y Guillermo Raúl**

A mis sobrinos: **Regina y Mateo**

A todos mis **amigos y familiares** en especial a **Olga, Carlos, Elín, Homero y Alma Lorenia** y a todas las personas que en su paso por mi vida han contribuido a mi crecimiento, desarrollo y formación.

AGRADECIMIENTOS

Al **Doctor Joel Pineda Pineda**, quien desde la Dirección de este trabajo me apoyo con entusiasmo y profesionalismo, me mostró que el camino de un maestrante es gratificante cuando se ha trabajado en equipo por un bien común. Así mismo agradezco el apoyo de todo el personal del laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Suelos, en especial a Haydee Téllez y Berenice...

A la **Doctora Raquel Salazar Moreno**, Co-Directora de este trabajo quien desde el día uno creyó en mí y en mi capacidad para desarrollarme profesionalmente, trabajar a su lado me enseñó que con determinación todo es posible.

Al **Doctor Fernando Contreras Cruz**, asesor de este trabajo por su disposición y atenciones.

A los **profesores** de la Maestría en Ciencias en Horticultura

A la **Coordinación de Posgrado** del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

Y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Claudia Lorena Cerón Argüelles

Fecha de nacimiento: 28 de enero 1987

Lugar de nacimiento: Distrito Federal, CDMX

CURP: CEAC870128MDFRRL08

Profesión: Licenciatura en Biología

Cedula profesional: 7593935



Desarrollo académico

Preparatoria: Instituto Don Bosco, Ciudad de México.

Orientación en área II Ciencias Biológicas y de la Salud, 2003-2005.

Licenciatura: Universidad Autónoma de Baja California, Licenciatura en Biología, 2006-2011.

Especialidad: Universidad Autónoma de Yucatán. Especialidad en Agroecología y Sistemas Agropecuarios Integrados, 2011-2012.

Maestría: Universidad Autónoma Chapingo, Maestría en Ciencias en Horticultura, 2020-2022.

RESUMEN GENERAL

EVALUACIÓN DE BIOFLOC FORTIFICADO PARA LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA EN SISTEMA DE ACUAPONIA

El sistema de acuaponía consiste en la producción integrada de peces y plantas. El objetivo de este trabajo fue establecer una comparación del rendimiento de lechuga con acuaponía convencional (T2-Rec) y acuaponía con “Biofloc” (T1-Bio). En ambos sistemas se evaluaron parámetros de calidad del agua, variables morfológicas, peso fresco y seco de lechuga y concentración de nutrimentos en tejido y solución. Los resultados mostraron que T2-Rec obtuvo un peso fresco promedio de 321.31 g/planta con un rendimiento promedio de 18.21 kg·m⁻² a una densidad de 4 kg·m⁻³ de tilapia. T1-Bio produjo un peso fresco promedio de 10.73 g/planta, un rendimiento promedio de 0.626 kg·m⁻² y una densidad de peces de 3 kg·m⁻³. T2-Rec superó a T1-Bio en magnitud 3.44, 3.0, 2.28, 1.22 y 1.28 veces en la concentración de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Para Fe y Mn el T2-Rec obtuvo la mayor concentración con 253 y 107.16 mg·kg⁻¹, respectivamente. En solución nutritiva la concentración N en T1-Bio fue de 15.57 mg·L⁻¹, P (13.38 mg·L⁻¹) y Ca (46 mg·L⁻¹). Para T2-Rec la concentración de K (128.25 mg·L⁻¹) y Mg (177.70 mg·L⁻¹) fueron superiores que T1-Bio. La concentración de Fe en T1-Bio fue mayor con 0.57 mg·L⁻¹, en T2-Rec la concentración de Mn (0.33 mg·L⁻¹) y B (0.25 mg·L⁻¹) fue mayor. Se concluye que T2-Rec obtuvo un rendimiento de lechuga 29 veces mayor que T1-Bio, la temperatura entre 25 – 27 °C, pH entre 6.5 y 7.0, conductividad eléctrica arriba de 1.5 dS·m⁻¹ y oxígeno disuelto mayor a 6 mg·L⁻¹ son condiciones fisicoquímicas óptimas en los sistemas de recirculación.

Palabras clave: *Lactuca sativa*, nitrificación, mineralización.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo

Autora: Claudia Lorena Cerón Argüelles

Director y Co-Directora de Tesis: Joel Pineda Pineda y Raquel Salazar Moreno

GENERAL ABSTRACT

EVALUATION OF FORTIFIED BIOFLOC FOR THE PRODUCTION OF LETTUCE IN AQUAPONICS SYSTEM

Aquaponic systems consists of the the integrated production of fish and plants. The aim of this study was to establish a comparison between the yields of lettuce grown in conventional aquaponics with a simple recirculation system (T2-Rec), and aquaponics with Biofloc (T1-Bio). In both systems, water quality parameters, morphological variables, fresh and dry weight for lettuce as well as the concentration of nutrients in tissue and solution were evaluated. The results show that T2-Rec obtained an average fresh weight of 321.31 g/plant, generating an average yield of 18.21 kg·m⁻² at a density of 4 kg·m⁻³ of tilapia. T1-Bio showed an average fresh weight of 10.73 g/plant, generating an average yield of 0.626 kg·m⁻² at a fish density of 3 kg·m⁻³. T2-Rec surpassed T1-Bio in the magnitude of 3.44, 3.0, 2.28, 1.22 and 1.28 times the concentration of N, P, K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ respectively. For Fe²⁺ and Mn²⁺, T2-Rec obtained the highest concentration with 253 and 107.16 mg·kg⁻¹ respectively. In nutrient solution the N concentration of T1-Bio was 15.57 mg·L⁻¹, P (13.38 mg·L⁻¹) and Ca (46 mg·L⁻¹), showing significant differences with T2-Rec, while the values of K (128.25 mg·L⁻¹) and Mg (177.70 mg·L⁻¹) of T2-Rec were higher than T1-Bio. The Fe concentration in T1-Bio was 0.57 mg L⁻¹, statistically different and higher than T2-Rec, while Mn (0.33 mg L⁻¹) and B (0.25 mg L⁻¹) were higher. It is concluded that T2-Rec obtained a yield 29 times higher than T1-Bio, the temperature between 25 °C and 27 °C, pH between 6.5 and 7.0, electrical conductivity above 1.5 dS·m⁻¹ and dissolved oxygen more than 6 mg L⁻¹ are suitable physicochemical conditions for simple recirculation systems.

Keywords: *Lactuca sativa*, nitrification, mineralization.

Master of Science Thesis in Horticulture. Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Claudia Lorena Cerón Argüelles.

Director and Co-Director: Joel Pineda Pineda y Raque Salazar Moreno

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Actualmente la superficie de tierra cultivable en México, según la FAO (2019), es del 50.3 % del total del territorio, es decir, poco más de 196 mil hectáreas en las regiones rurales son destinadas a actividades agrícolas de temporal. Esta cifra indica que aún se cuenta con más de la mitad de territorio para producir alimentos suficientes y de calidad. Sin embargo, existen varios factores que delimitan los alcances de desarrollo de la agricultura en nuestro país: uno es el crecimiento continuo de la demanda de alimentos, otro factor es el cambio climático y el último, no menos importante, la escasez de agua (Mekonnen & Hoekstra, 2016), de modo que resulta crucial expandir los horizontes en la producción de alimentos, para incentivar una agricultura sustentable y sostenible gestionada por instrumentos económicos que provea alimentos sanos y de calidad, mantenga integra la relación socio-ambiental y se preserve la agro-biodiversidad (FAO, FIDA, UNICEF, PMA y OMS, 2018.; Noruega, 2019; Rosa et al. 2020).

En virtud de lo anterior, han surgido propuestas productivas más saludables y de menor impacto ambiental como la agricultura orgánica libre de agroquímicos, la hidroponía que contribuye a la producción de alimentos con soluciones nutritivas y sin utilizar el suelo como sustrato y la acuicultura que se enfoca en el manejo controlado de especies piscícolas (FAO, 2015). En este contexto surge la acuaponía como una opción sustentable y sostenible para la producción de peces y plantas que contribuyan al desarrollo de la soberanía alimentaria de nuestro país (Gómez-Merino et al., 2015).

La acuaponía es el sistema de producción que combina las unidades de cultivo de peces y plantas en un sistema cerrado de recirculación de agua, la ventaja más práctica es que dentro del sistema se generan de manera natural microorganismos (bacterias autótrofas y heterótrofas) que se encargan de la transformación de los desechos metabólicos de los peces, así como del alimento que no fue consumido (Wongkiew 2017, 2018). Para que el sistema pueda mantenerse en un balance de masas es necesario implementar mecanismos de

mineralización y nitrificación que promuevan la proliferación de bacterias de los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira* y *Nitrobacter* que se van a encargar de procesos oxidativos para que el nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) y nitritos (NO_2^-) pueda convertirse a nitratos (NO_3^-) que es la forma elemental en que plantas absorben dicho nutrimento y lo convierten en biomasa (Wongkiew 2017, 2018). Para que los procesos mencionados anteriormente puedan ocurrir de manera eficiente dentro del sistema es imprescindible que se midan y controlen parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, pues en la medida en que aumenten o disminuyan, influirán de manera directa en procesos metabólicos de peces y plantas (Delaide et al., 2016; Ibáñez et al., 2017).

En acuaponía el cultivo acuícola más frecuente y de mayor preferencia para su consumo es la tilapia (*Oreochromis niloticus*), que por sus diversas características, es adaptable a condiciones de temperatura que van de los 20 a los 35 °C, es una especie resistente a enfermedades y a estrés por manejo, su alimentación puede ser natural o balanceada, tiene un alto contenido proteico y es una especie de gran interés socioeconómico (Bonilla-Paz et al., 2018). En México, la tilapia es la cuarta especie pesquera más importante y su producción en granjas acuícolas se ha incrementado a un ritmo significativo de 0.03 % durante los últimos 12 años (CONAPESCA, 2011). Sin embargo, algunas alternativas para mejorar la producción de tilapia es la tecnología “Biofloc”; esta tecnología se basa en generar biomasa microbiana conformada por flóculos de bacterias, fitoplancton y materia orgánica disuelta que en conjunto mitigan efectos negativos referentes a la descarga de agua y promueven recambios mínimos al reciclar y reutilizar continuamente los nutrientes (Emerenciano et al., 2013). Así mismo, las comunidades microbianas existentes tienen la capacidad de metabolizar el nitrógeno amoniacal (NH_4^+) y con ello conservar estables los parámetros fisicoquímicos que mantienen la calidad del agua para el cultivo de especies acuícolas (Crab et al., 2012).

En contraste, la lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza de hoja de tipo anual,

de ciclo corto y alto rendimiento en condiciones de invernadero (Juárez-Rangel et al., 2023). Se cultiva ampliamente en todo el mundo por su valor nutricional y económico, es altamente adaptable a todas las estaciones del año, se obtienen altos rendimientos y una buena productividad (Juárez-Rangel et al., 2023; Martínez-Carrillo et al., 2015). Respecto al rendimiento de lechuga en un sistema de acuaponía se encontró en el trabajo de Pantanella et al. (2012) que la producción de lechuga en un sistema hidropónico y acuapónico no fue diferente pues en el sistema de hidroponía la producción fue de $2.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ mientras que para el sistema de acuaponía de alta densidad ($8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) la productividad fue de $2.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

1.1 Fuentes consultadas

- Bonilla Paz, B. L., Montoya Bonilla, B., Gómez, J., & Caja, Álvaro. (2018). Efecto de la temperatura sobre el crecimiento de tilapia (*Oreochromis* sp) en mamá lombriz, Vereda Rio Blanco, Popayán, Colombia. *Teknos Revista Científica*. 18(1), 24–30. <https://doi.org/10.25044/25392190.922>
- CONAPESCA. (2011). *Anuario estadístico de acuacultura y pesca*. Mazatlán, Sinaloa. 305 p.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356, 351-356.
- Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Sucre*) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water*, 8(10), 467.
- Emerenciano, M., Gaxiola, G., & Cuzon, G. (2013). Biofloc technology (BFT): a review for aquaculture application and animal food industry. *Biomass Now-Cultivation and Utilization*, 12, 301-328.

- FAO. México. Pesca en cifras 2019, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, 2015. (Acceso: 10 de marzo de 2021).
- FAO, FIDA, UNICEF, PMA y OMS. (2018). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo. Fomentando la resiliencia climática en aras de la seguridad alimentaria y la nutrición*. FAO, Roma.
- Gómez-Merino, F. C., Ortega-López, N. E., Trejo-Téllez, L. I., Sánchez-Páez, R., Salazar-Marcial, E., & Salazar-Ortiz, J. (2015). La acuaponía: alternativa sustentable y potencial para producción de alimentos en México. *Agroproductividad*, 8(3), 60-65.
- Ibáñez, A., Castellanos, M., Rodríguez, A., & Álvarez, S. (2017). Influencia de la temperatura, densidad, oxígeno y alimento en la formación de marcas en las escamas de tilapia. *Biología Tropical*, 65(2), 613-622.
- Juárez-Rangel, A. P., Solís-Oba, A., Martínez-Cásares, R. M., Castro-Rivera, R., & Solís-Oba, M. M. (2023). Producción de lechuga en invernadero fertilizada con extracto de sargazo o lixiviado de vermicomposta. *Mexican Journal of Biotechnology*, 8(1), 21-36.
- Martínez Carrillo, G., Lara Herrera, A., Padilla Bernal, L. E., Luna Flores, M., Avelar Mejía, J. J., & Llamas Llamas, J. J. (2015). Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 251-260.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), 71-82.
- Noruega, T. A. (2019). Bases teórico-metodológicas para el diseño de sistemas agroecológicos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 51(1), 273-293.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). Evaluación y planificación del sistema agroalimentario ciudad-región. FAO.

Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. *Acta Horticulturae*, (927), 887-893.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>

Rosa, L., Chiarelli, D. D., Rulli, M. C., Dell'Angelo, J., & D'Odorico, P. (2020). Global agricultural economic water scarcity. *Science Advances*, 6(18), Article eaaz6031.

Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W., & 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>.

Wongkiew, S., Park, M.R., Chandran, K., & Khanal, S.K. (2018). Aquaponic systems for sustainable resource recovery: linking nitrogen transformations to microbial communities. *Environmental Science & Technology*. 52(21), 12728–12739. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04177>.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La agricultura en México

La agricultura en un contexto global es la actividad encargada de proveer alrededor del 70 % del alimento que se consume a nivel mundial (Attar et al., 2020). Por lo tanto, el consumo de agua para realizar esta actividad puede llegar a ser más del doble de lo que necesitaba un cultivo de temporal hace 20 años, pues los efectos del cambio climático se reflejan en pérdidas de agua por evapotranspiración y por consecuencia estrés hídrico en los cultivos, pérdidas por filtración al subsuelo a efecto de la desertificación de tierras y no menos importante, la pérdida de agua por descuidos o por mal manejo del recurso (Attar et al., 2020; Zheng et al., 2018). Con este contexto, el sector agrícola se enfrenta a grandes retos, sobre todo en zonas rurales de climas áridos o semiáridos en el mundo, pues estas comunidades serían las más afectadas ya que la agricultura de temporal prescinde de lluvias estacionales que anteriormente aseguraban su producción y sustento (Jin et al., 2018; Mandal et al., 2020).

Por lo tanto, los sistemas de producción sostenibles y sustentables son alternativas para el manejo y aprovechamiento de recursos naturales, que permitan producir alimentos suficientes y de calidad (Velasco-Muñoz et al., 2018).

2.2 La acuicultura y el cultivo de tilapia

La acuicultura es el cultivo de especies acuáticas como peces, crustáceos, moluscos o algas en medios controlados, en los cuales se busca generar condiciones lo más cercanas al medio natural en el que viven (FAO, 2020). El suministro de pescados y mariscos ya no solo es tarea de las pesquerías de captura, también la acuicultura ha tomado mayor posición y ventaja en el mercado comercial pues a la fecha se ha reportado una producción en volumen de más de 90 mil toneladas, superando a la industria de producción de huevo, res y ovejas (FAO, 2020; Stankus, 2021; Stentiford & Holt, 2022). La distribución porcentual de la producción de acuicultura mundial está dividida en un 23 % por algas o pastos, 15 % moluscos, 7 % crustáceos, 0.4 % anfibios e invertebrados

y el 49 % restante es encabezado por el cultivo de peces, lo que corresponde a un 54 % de la producción en aguas marinas y el 47 % en agua dulce (Stentiford & Holt, 2022).

En el cultivo de especies continentales (de agua dulce) la especie más destacada es la tilapia; este pez es originario de África de la región de Mozambique, fue introducido a México desde los años 60, es una especie de clima cálido, con ventajas productivas por su rápido crecimiento, llegan a talla comercial (500 kg) en un periodo de 6 meses, es de fácil reproducción sin necesidad de inducción hormonal, su periodo larvario es corto, es resistente a enfermedades y estrés por manejo logrando supervivencias del 80-90 %, consumen alimento natural y/o artificial, es nutritiva y de alto contenido proteico, contiene omega 3 y es bajo en colesterol, tienen una gran aceptación en el mercado y por lo mismo es altamente rentable para su comercialización (Bonilla-Paz et al., 2018).

México cuenta con una gran cantidad de recursos marinos y continentales en donde se desarrollan actividades de acuicultura, por ejemplo en lagos, lagunas, presas, esteros, bahías, lagunas litorales o estanques artificiales, estos últimos son los más prácticos y comunes para la producción en superficie ya que puede ser ajustable a los distintos niveles de producción de tilapia que van desde la producción extensiva (bajas densidades, sin tecnificación y bajos índices de recambio de agua <10 %), semi-intensiva (densidades medias, mayor tecnificación, alimento natural y comercial, recambios del 30-50 %) e intensiva (altas densidades, niveles altos de tecnificación, alimento balanceado, y recambios de agua del 80 al 99 %), razón por la cual, a mayor nivel de producción mayor impacto negativo y más recomendable el uso de tecnologías sustentables (Ronzón-Ortega et al., 2015; Ornelas-Luna et al., 2017).

Los rangos de calidad del agua óptimos y más recomendables para el cultivo de tilapia se enlistan a continuación:

Cuadro 1. Parámetros óptimos de calidad del agua para cultivo de *Tilapia* sp.

Parámetro	Intervalo
Temperatura	28 – 32 °C
pH	6.5 - 9
Oxígeno disuelto	> 4.5 mg·L ⁻¹
Saturación	65 %
Dureza	50 - 350 mg·L ⁻¹
Dióxido de carbono (CO ₂)	< 30 mg·L ⁻¹
Amoniaco (NH ₃)	< 0.04 mg·L ⁻¹
Nitritos (NO ₂ ⁻)	< 0.08 mg·L ⁻¹
Nitratos (NO ₃ ⁻)	< 0.05 mg·L ⁻¹

Fuente: Bonilla-Paz et al., 2018; Plazas-Pemberthy & Paz-Ruiz, 2019.

2.2.1 Alimentación

La tilapia es una especie acuática que tiene hábitos alimenticios como especie omnívora pero más preferentemente herbívora, es decir, en su entorno natural se alimenta de fitoplancton, microalgas, bentos y en algunos casos filtran zooplancton (Pineda-Santis et al., 2012). Sin embargo, cuando esta especie es cultivada con fines comerciales, no siempre se generan las condiciones para producir fuentes naturales de alimento, por lo que es necesario suplementar sus necesidades nutricionales con alimento comercial balanceado de alta calidad (Paz et al., 2019; Pineda-Santis et al., 2012). La formulación nutrimental del alimento producido para tilapia varía por país, región y por etapa de crecimiento (Paz et al., 2019). Generalmente la dieta de especies acuícolas de hábitos herbívoros puede incluir harina de pescado (16 %), harina de cacahuete (24 %), harina de soya (14 %), salvado de arroz (30 %), arroz quebrado (15 %) y algunas premezclas de vitaminas y minerales (1 %) (Somsueb, 1995; Suloma et al., 2014). Adicionalmente, Torres-Novoa y Hurtado-Nery (2012) reportaron que los requerimientos de proteína más adecuados se encuentran en un rango de 26.8 a 41.3 %, según la fase de desarrollo biológico y como un requerimiento mineral

la concentración de fósforo puede encontrarse en intervalo entre 0.75 – 0.46 %, sin exceder una relación P: Ca de 1:1.5 para reducir los posibles efectos contaminantes del fósforo. Por otro lado, la ración alimenticia es un aspecto importante que es recomendable considerar desde el inicio del cultivo pues determina el crecimiento que tengan los alevines en sus primeras etapas de desarrollo; la ración está formulada en función de la biomasa, es decir, al peso total de los peces en relación a la cantidad de organismos presentes en el estanque, en las primeras etapas la ración más recomendable es del 8-10 % de la biomasa dividida preferentemente en 8 a 9 raciones por día; de esta manera y conforme al crecimiento de los peces, la ración alimenticia puede llegar a disminuir hasta en 2 – 3 % de ración alimenticia en las etapas de levante y/o engorde (García-Ulloa, 2004).

2.3 El cultivo de lechuga y la técnica de hidroponía.

La lechuga es un producto vegetal que se consume en cualquier época del año y en diversas partes del mundo (Yang & Kim, 2019). Es la hortaliza con mayores volúmenes de producción, pues la demanda se inclina a su favor por la versatilidad de preparación en fresco y por su aporte nutricional en crudo ya que contiene vitaminas A, B1, B2, B3, B9, C y E además de minerales como fósforo, hierro, calcio, antioxidantes y aminoácidos, es una planta anual (Carranza et al., 2009).

Existen varias técnicas para el cultivo de la lechuga que actualmente se ajustan a modelos productivos sustentables que, han conseguido mejorar la calidad y la cantidad de producto ofrecido al mercado, como es el caso de la hidroponía, que consiste en el cultivo de plantas sin suelo en el que los nutrientes son de origen inorgánico y se obtienen mediante fertilización (Alcarraz et al., 2019; FAO, 2015). Las técnicas de cultivo más comunes en hidroponía son el NFT (Nutrient Film Technique) que consiste en una película nutritiva recirculante de fertilizantes inorgánicos, la construcción más básica se realiza con tubos de PVC acomodados paralelamente de forma estratificada, en la parte superior cuentan

con orificios en donde se colocan canastillas que sostengan al cultivo pero que a su vez permitan el contacto de las raíces con la película nutritiva (Sandoval et al., 2012). Otra técnica similar es la de NGS (New Growing System) que igualmente consiste en la recirculación de una película nutritiva que permite la libre distribución de nutrientes, agua y oxígeno a las raíces de la planta, la diferencia con la técnica anterior radica en que la construcción, en vez de utilizar PVC, está construida con capas de polietileno que en su interior se encuentran estratificadas en forma de cascada con el fin de permitir el libre crecimiento de las raíces (Sandoval et al., 2012). Por otro lado, la técnica aeropónica es menos común pero igualmente efectiva, su construcción es con tubos de PVC por lo general dispuestos verticalmente, contienen orificios de siembra a los costados de los tubos, las raíces se encuentran expuestas en el interior de los tubos y son asperjadas periódicamente con la solución nutritiva por lo que el crecimiento de algunos cultivos en este sistema son efectivos debido a la condición de aireación que permite mayor concentración de oxígeno en las raíces (Sandoval et al., 2012). Finalmente la técnica de raíz flotante o DWC (Deep Water Culture) consiste en mantener el cultivo flotando sobre la solución nutritiva aireada, generalmente se disponen de placas de unicel con orificios en la superficie donde se colocan canastillas que sostienen el cultivo, esta técnica permite que las raíces están siempre en contacto con el agua, el oxígeno y los nutrimentos disueltos permitiendo que la planta pueda tomarlos a razón de sus necesidades nutrimentales (Sandoval et al., 2012).

Los sustratos son el medio físico donde crece la raíz de las plantas, el método de suministro de la solución nutritiva y en todo caso el medio que permite la aireación, el drenaje y la humedad necesaria para el correcto desarrollo de un cultivo (Castellanos, 2009). De igual forma, para cada técnica de cultivo es importante considerar que según el tipo de cultivo será la técnica y según la técnica será la elección adecuada del sustrato con base en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, tal como se observa en el cuadro 2 (Castellanos, 2009).

Cuadro 2. Propiedades físicas de sustratos usados en horticultura.

Propiedad	Turba rubia	Lana de roca	Perlita	Fibra de coco	Tezontle
Densidad aparente (%)	0.07	0.07	0.14	0.09	0.70
Espacio poroso total (% vol)	96	97	86	94	72
Capacidad de aireación (% vol)	41	36	29	30	35
Agua fácilmente disponible (% vol)	25	59	25	25	21
Agua de reserva (% vol)	6.0	0.3	7.0	8.1	5.5

Fuente: Castellanos, 2009.

2.4 Manejo de un sistema de Acuaponía

La acuaponía es una técnica de producción que conjunta el cultivo de especies acuáticas en medios controlados y la hidroponía que es el cultivo de plantas en sustratos inertes o en solución nutritiva (FAO, 2015). El principio básico de este sistema consiste en aprovechar y transformar por acción de microorganismos (bacterias) el producto metabólico de los peces, haciendo recircular una solución nutritiva compuesta por sólidos disueltos y suspendidos que de manera continua se filtran biológicamente dando lugar a procesos de mineralización y nitrificación mismos que favorecerán el desarrollo y crecimiento de las plantas cultivadas (Ebeling et al., 2006; Modarelli et al., 2022; Trejo-Téllez et al., 2013). Algunas de las ventajas que se pueden destacar de este sistema de producción es que a diferencia de la acuicultura convencional, se requiere como máximo un recambio de 1.5 % diario del volumen total de agua que si bien, se atribuye a la reposición

de agua que se pierde por evapotranspiración de las plantas (Somerville et al., 2022), la calidad del agua es estable cuando se mantienen los parámetros fisicoquímicos adecuados como bajas concentraciones de NAT (Nitrógeno Amoniacal Total) y nitritos y por consecuencia una adecuada concentración de nitratos, finalmente se pueden llegar a producir densidades de especies acuáticas que van de los 40 a los 150 kg·m⁻³, por lo que al obtener dos subproductos de alto valor económico, el sistema se posiciona como un sistema rentable y reproducible (Goddek et al., 2019; Palm et al., 2019)

2.4.1 Calidad del agua para el cultivo de tilapia

Los parámetros de calidad del agua en rangos óptimos permiten que el desarrollo del cultivo de tilapia se efectúe de manera correcta, por ello es importante conocer como están relacionados entre sí y de qué manera la modificación de algún parámetro modifica la condición de otro (Somerville et al., 2022).

2.4.1.1 Oxígeno Disuelto (OD)

El OD es la cantidad de oxígeno gaseoso que se encuentra disuelta en el agua y es diferente al aire disuelto, una burbuja de aire en el agua contiene 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 0.03% de CO₂ (Taiz & Zeiger, 2009). De esta manera la incorporación del oxígeno puede ser mediante gotas de agua que caen al tanque de peces y contienen oxígeno disuelto o mediante la incorporación de burbujas que capturan oxígeno hasta llegar a la superficie (Blanco-Zuñiga & Rojas-Arias, 2021). El oxígeno disuelto se mide con un aparato conocido como oxímetro que arroja lecturas de 0 – 50 mg·L⁻¹ o de 0- 100 % de saturación de oxígeno (Blanco-Zuñiga & Rojas-Arias, 2021). Las interacciones que ocurren entre el oxígeno disuelto y su proporción varía en cuanto a su saturación, es decir, en saturaciones que van de 60 a 100% se considera un rango óptimo y de estrés controlado, pero existe la posibilidad de llegar a una saturación de hasta 150-200% en donde ocurre un estrés en el comportamiento social de los peces, se registran altos factores de conversión alimenticia y un bajo crecimiento

morfológico, por el contrario, a saturaciones menores de 50% desarrollan una dependencia fisiológica y alimentaria, dejan de comer, son susceptibles a enfermedades y las tasas de mortalidad se incrementan (Somerville et al., 2022).

2.4.1.2 Temperatura

En un cultivo acuícola la temperatura afecta los procesos metabólicos de los organismos (alimentación, digestión, asimilación, excreción, respiración, crecimiento) y la solubilidad de los gases (a mayor temperatura, menor oxígeno disuelto, a mayor temperatura mayor solubilidad del nitrógeno amoniacal total), adicionalmente temperaturas arriba de 30 °C afectan la absorción de Ca^{2+} por parte de las plantas, de modo que una temperatura óptima para peces, plantas y microorganismos estaría entre 22 – 29 °C (Somerville et al., 2022).

2.4.1.3 Potencial de hidrógeno (pH)

Este parámetro afecta el crecimiento y la reproducción de tilapia, entre 6.5 y 9.0 es el rango deseable, entre 5 y 6.5 ocurre un lento crecimiento, entre 4.0 - 5.0 se ven afectada la reproducción y abajo de 4.0 es letal, por el contrario entre 9.0 y 10.5 el crecimiento es más lento, y arriba de 10.5 ocurre mortalidad (Somerville et al., 2022). Por lo tanto, las interacciones del pH ocurren de la siguiente manera: a menor pH menor eficiencia del proceso de nitrificación, a mayor pH mayores concentraciones de nitrógeno amoniacal, a mayor pH mayor estrés en el comportamiento social de los peces, a menor pH mayor toxicidad por concentración de nitritos, a menor pH mayor concentración de CO_2 (Goddek et al., 2019; Somerville et al., 2022). Por otro lado, un pH de 6.0 a 6.5 todos los micro y macro nutrientes están fácilmente disponibles, en cambio un pH de 7.5 puede dar lugar a deficiencias en hierro, fósforo y manganeso (Somerville et al., 2022).

2.4.2 Mineralización y nitrificación para la remoción de amonio (NH_4^+)

El nitrógeno amoniacal total (NAT) se refiere a la cantidad de nitrógeno en forma

de amonio NH_4^+ , sin embargo, este ion puede encontrarse como amoniaco en su forma no ionizada (NH_3) al ser un subproducto de la degradación de proteínas que contiene el alimento, pues en promedio el 30% de la proteína suministrada por la dieta balanceada es retenida por el pez, lo que significa que del 70% de nitrógeno total obtenido por el alimento, el 55% es excretado por los peces en forma de amoniaco y 15 % restante que no es digerido por los peces, sale en forma de urea $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ y amonio del alimento no consumido (Somerville et al., 2022).

El proceso de nitrificación es aquel que ocurre en los filtros biológicos por acción de bacterias aeróbicas oxidantes del amonio como *Nitrosomonas*, *Nitrosolobus* y *Nitrosovibrio* y aquellas oxidantes de nitritos que comprenden géneros como *Nitrobacter*, *Nitrosococcus* y *Nitrospira*. (Palm et al., 2018; Timmons et al., 2009; Wongkiew et al., 2018). El proceso de nitrificación ocurre en dos pasos sucesivos, las bacterias oxidan el amoniaco (NH_3), lo convierten en nitritos (NO_2^-) y simultáneamente las bacterias que oxidan nitritos convertirán el NO_2^- en nitrato (NO_3^-), para que ocurra lo anterior, es importante considerar el área o volumen específico del filtro biológico, un pH ente 6.0 – 7.0, temperaturas entre 17 – 34 °C, oxígeno disuelto entre 4 – 8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y proteger el filtro de la incidencia de luz directa (Goddek et al., 2019; Somerville et al., 2022).

El “Biofloc” acoplado a procesos de mineralización y nitrificación son alternativas para remover el exceso de amonio (NH_4^+). Para el caso de la mineralización aeróbica y anaeróbica, ambos procesos se llevan a cabo uno detrás del otro mediante dos grupos de comunidades bacterianas quimio/foto autótrofas y heterótrofas (Avnimelech, 2009), que se encargarán de aprovechar y sintetizar residuos de alimento y materia orgánica e inorgánica (Avnimelech, 2009; Gallego-Alarcón & García-Pulido, 2017; García-Pulido et al., 2011).

2.4.3 Calidad del agua para el cultivo de lechuga

2.4.3.1 Propiedades físico-químicas

Los parámetros fisicoquímicos en el agua de las plantas son igual de importantes

que los presentes en el agua de los peces, de modo que los principales parámetros que se evalúan para mantener la calidad del agua es la temperatura, pH, oxígeno disuelto, compuestos nitrogenados y conductividad eléctrica (cuadro 3). Aunque cada parámetro es relevante dentro del sistema, es recomendable considerar la interacción que existe entre ellos con el fin de poder controlarlos y mantener un equilibrio en el ecosistema que permita el correcto desarrollo y crecimiento de los tres componentes de un sistema de acuaponía: peces, plantas y microorganismos o específicamente bacterias nitrificantes (Somerville et al., 2022).

Cuadro 3. Intervalos de tolerancia en la calidad de agua para peces de clima cálido, plantas y bacterias nitrificantes.

Tipo de organismo	Temp (°C)	pH	OD (mg·L ⁻¹)	NAT (mg·L ⁻¹)	NO ₂ ⁻ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mg·L ⁻¹)
Peces de aguas cálidas	22-32	6-8.5	4-6	< 3	< 1	< 400
Plantas	16-30	5.5-7.5	> 3	< 30	< 1	-
Bacterias nitrificantes	14-34	6-8.5	4-8	< 3	< 1	-

Fuente: Somerville et al., 2022. ^z OD: oxígeno disuelto, ^y NAT: nitrógeno amoniacal total, ^x NO₂⁻ : nitritos, ^w NO₃⁻ : nitratos.

La temperatura es un parámetro de relevancia pues con él se determinan condiciones adecuadas para el fotoperiodo, el desarrollo de la raíz y la absorción de nutrientes además del pH, en la interacción se podría decir que a menor temperatura, menor absorción de nutrientes y menor crecimiento radical (Somerville et al., 2022).

El oxígeno disuelto también es un parámetro determinante tanto para peces, como para plantas pues a bajas concentraciones disminuye el proceso de

nitrificación (Somerville et al., 2022). El incremento o disminución del potencial de hidrógeno (pH) influye en la concentración de nitrógeno amoniacal total, y finalmente la conductividad eléctrica (CE) es el parámetro que indica el contenido de sales disueltas en la solución nutritiva, a mayor CE mayor contenido de sales, por lo que su valor más óptimo se encuentra en un intervalo entre 1 y 2 dS·m⁻¹, por encima de este intervalo se afecta el crecimiento de plantas intolerantes a las sales (Somerville et al., 2022).

2.4.3.2 La solución nutritiva

Se le conoce como solución nutritiva a la concentración de nutrientes disueltos en el agua, que mantienen entre sí relaciones directas en función de la cantidad de los elementos presentes y en función de los parámetros fisicoquímicos del agua (Somerville et al., 2022). Según Steiner (1980) la proporción de cationes y aniones más adecuada en meq·L⁻¹ para una solución nutritiva debe ser de 60 % de NO₃⁻, 5 % de H₂PO₄⁻, 35 % de K⁺, 45 % de Ca²⁺, 20 % de Mg²⁺ y 35 % de SO₄²⁻. Así mismo, la condición óptima de pH para las plantas es entre 5.5 y 6.5 para lograr el máximo nivel de asimilación de nutrientes, pues debajo de un pH de 5.0 puede existir deficiencias de N, K, Ca, Mg, y B, y arriba de 6.5 puede disminuir la absorción de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu (Somerville et al., 2022). Por otro lado, para una solución nutritiva acuapónica se ha reportado que a un pH de 6.0 a 7.5 es óptimo para la absorción de macronutrientes como el fósforo (H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻ o PO₄³⁻), potasio (K⁺), azufre (SO₄²⁻), calcio (Ca²⁺) y magnesio (Mg²⁺). Teniendo en cuenta que los micronutrientes como el hierro (Fe³⁺, Fe²⁺), manganeso (Mn²⁺), boro (BO₃²⁻, B₄O₇²⁻), cobre (Cu²⁺, Cu⁺) y zinc (Zn²⁺) se absorben preferentemente a valores de pH inferiores a 6.0 (Lucas & Davis, 1961).

2.4.4 La tecnología “Biofloc”

El uso de la tecnología “Biofloc” en México es una tecnología emergente, que, en los últimos 10 años ha logrado contribuir a la eficiencia en la producción acuícola pues se basa en el principio de reciclaje de nutrientes, principalmente nitrógeno,

que sirve como fuente de alimento para las comunidades microbianas (Avnimelech, 2009). El “Biofloc” está constituido por flóculos o agregados de microorganismos tales como bacterias, fitoplancton y materia orgánica particulada (Collazos-Lasso & Arias-Castellanos, 2015). El flóculo se compone de 60 a 70% de materia orgánica del cual del 2 al 20% son células microbianas y del 30 al 40% es materia inorgánica (Wilén & Lant, 2003).

De las especies bacterianas mayormente presentes en el “Biofloc” se encuentran *Proteobacterium*, *Bacillus* y *Actinobacterium* y otras en menor cantidad como *Roseobacter* sp. y *Cytophaga* sp., que se clasifican como heterotróficas fijadoras de amoníaco y bacterias nitrificantes quimioautótrofas y en su conjunto, son las encargadas de mantener la calidad del agua (Deng et al., 2018; Ebeling et al., 2006; Hargreaves, 2013; Zhao et al., 2012).

Según un estudio reciente realizado por Betanzo-Torres et al. (2019) se ha demostrado que la tecnología “Biofloc” ha funcionado de manera eficiente logrando obtener menores factores de conversión alimenticia (FCA) referentes al peso de tilapia producido por kilogramo de alimento de hasta 1.04 ± 0.14 , un ahorro de agua del 72 al 84% ya que no existe la necesidad de hacer recambios de agua, así mismo, reportaron un incremento en la productividad de $3.4 -15.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ destacando la supervivencia de tilapias en un 99% atribuido al manejo diferenciado de la relación carbono-nitrógeno, a la densidad adecuada del cultivo y al alimento correctamente balanceado.

Por otro lado, Avnimelech (2007) reportó que con el uso de “Biofloc” para el cultivo de *Tilapia* sp., se ha conseguido incrementar las producciones de $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (cultivos semi-intensivos), a valores cercanos a $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ lo que quiere decir que esta tecnología es ampliamente utilizada por demostrar alta eficiencia en la productividad, sostenibilidad y bioseguridad del cultivo. Adicionalmente al uso eficiente del agua por la disminución en el índice de recambio de agua, esta tecnología ha resultado útil para controlar y mantener la calidad del agua pues

mientras algunas asociaciones microbianas remueven los desechos metabólicos de los peces otro grupo son el complemento alimenticio de las de las mismas especies cultivadas (Hernández-Mancipe et al., 2019; McMurtry et al., 1997).

2.5 Fuentes consultadas

Alcarraz, Q. E. W., Tapia, L. O., & Alcarraz, Q. Y. M. (2019). Microbiological analysis of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in an aquaponic and hydroponic system. *Net Journal of Agricultural Science*, 7(2), 50-55.

Attar, H. K., Noory, H., Ebrahimian, H., & Liaghat, A. M. (2020). Efficiency and productivity of irrigation water based on water balance considering quality of return flows. *Agricultural Water Management*, 231, 106025.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106025>

Avnimelech, Y. (2009). *Biofloc technology: a practical guidebook*. World Aquaculture Society.

Avnimelech, Y. (2007). Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture*, 264(1-4), 140-147.

Betanzo-Torres, E. A., Marín-Muñiz, J. L., de los Ángeles Piñar-Álvarez, M., Celdrán-Sabater, D., & Mata-Alejandro, H. (2019). Desarrollo de la acuicultura con tecnología biofloc para producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en regiones rurales de México. *Rinderesu*, 4(1-2), 42-58.

Bonilla Paz, B. L., Montoya Bonilla, B., Gómez, J., & Caja, Álvaro. (2018). Efecto de la temperatura sobre el crecimiento de Tilapia (*Oreochromis* sp) en mamá lombriz, Vereda Rio Blanco, Popayán, Colombia. *Teknos Revista Científica*, 18(1), 24–30. <https://doi.org/10.25044/25392190.922>

Blanco-Zúñiga, C. R., & Rojas-Arias, N. (2021). Influencia del ángulo y perímetro de impacto de las aspas en un aireador de eje horizontal sobre la

transferencia de oxígeno disuelto. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(5), 350-376.

Carranza, C.; Lanchero, O.; Miranda, D. & Chaves, B. (2009). Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) "Batavia" cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 27(1):41-48.

Castellanos, J. Z. (2009). Manual de producción de tomate en invernadero. Celaya, Guanajuato, México: Intagri S. C.

Collazos-Lasso, L. F., & Arias-Castellanos, J. A. (2015). Fundamentos de la tecnología biofloc (BFT). Una alternativa para la piscicultura en Colombia: una revisión. *Orinoquia*, 19(1), 77-86.

Deng, M., Chen, J., Gou, J., Hou, J., Li, D., & He, X. (2018). The effect of different carbon sources on water quality, microbial community and structure of biofloc systems. *Aquaculture*, 482, 103-110.

Earth.Org. (2020). Aquaponics: A Solution To Food Insecurity? | Earth.Org. Recuperado de: https://earth.org/data_visualization/aquaponics-a-solution-to-food-insecurity/

Ebeling, J. M., Timmons, M. B., & Bisogni, J. J. (2006). Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 257(1-4), 346-358.

FAO. (2020). Fisheries Statistical Collections Global production statistics 2015–2020(disponible en: www.fao.org/fishery/statistics/global-production/en) (Acceso febrero 2023).

FAO. (2015). Small-scale aquaponic food production. Fisheries and Aquaculture Technical Paper.

Recuperado:<http://www.fao.org/publications/card/en/c/90bb6bfe1ac34280>

-857e-1c5a20404b38/.

- 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.
- García-Pulido, D., Gallego-Alarcón, I., Díaz-Delgado, C., Fall, C., & Burrola-Aguilar, C. (2011). Evaluación de un sistema de recirculación y acondicionamiento de agua en truiticultura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 83-96.
- García-Ulloa, M. (2004). Efecto de la ración alimenticia en el crecimiento de juveniles de tilapia *Oreochromis aureus* (Steindachner) bajo condiciones experimentales de cultivo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 8(1), 0.
- Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., & Keesman, K. J. (2019). Decoupled aquaponics systems. *Aquaponics Food Production Systems*, 201.
- Hargreaves, J. A. (2013). *Biofloc production systems for aquaculture* (Vol. 4503, pp. 1-11). Stoneville, MS: Southern Regional Aquaculture Center.
- Hernández Mancipe, L. E., Londoño Velez, J. I., Hernández García, K. A., & Torres Hernández, L. C. (2019). Los sistemas biofloc: una estrategia eficiente en la producción acuícola. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 14(1), 70-99.
- Jin, N., Ren, W., Tao, B., He, L., Ren, Q., Li, S., & Yu, Q. (2018). Effects of water stress on water use efficiency of irrigated and rainfed wheat in the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 642, 1-11.
- Sandoval, V. M., Sánchez, G. P. & Alcántar, G. G. (2012). Principios de la

- hidroponía y del fertirriego. In G. Alcántar G., & L. I. Trejo-Téllez (Eds.), *Nutrición de cultivos* (pp. 373-438). Colegio de Postgraduados.
- Lucas, R. E., & Davis, J. (1961). Relationships between pH values of organic soils and availabilities of 12 plant nutrients. *Soil Science*, 92(3), 177-182.
- Mandal, S., Vema, V. K., Kurian, C., & Sudheer, K. P. (2020). Improving the crop productivity in rainfed areas with water harvesting structures and deficit irrigation strategies. *Journal of Hydrology*, 586(124818), 1-51.
- McMurtry, M. R., Sanders, D. C., Cure, J. D., Hodson, R. G., Haning, B. C., & Amand, E. S. (1997). Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *Journal of the World Aquaculture Society*, 28(4), 420-428.
- Modarelli, G. C., Cirillo, C., Vanacore, L., Langellotti, A. L., Masi, P., De Pascale, S., & Roupheal, Y. (2022). Recirculating aquaponics systems: the new era of food production. *Acta Horticulturae*. 1354, 215-220.
- Ornelas-Luna, R., Aguilar-Palomino, B., Hernández-Díaz, A., Hinojosa-Larios, J. Á., & Godínez-Siordia, D. E. (2017). Un enfoque sustentable al cultivo de tilapia. *Acta Universitaria*, 27(5), 19-25.
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S. M., Vermeulen, T., ... Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International*, 26(3), 813–842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>.
- Paz, P. E., Turcios, A. D. M., & Chávez, J. I. C. (2019). Producción de tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) en la etapa de engorde con dos estrategias de alimentación. *Ceiba*, (0843), 1-6.
- Pineda Santis, H. R., Zuluaga Sepulveda, C. A., & Vertel Betancur, D. A. (2012). Evaluación de la morfometría y del hábito alimenticio en tilapia roja

(*Oreochromis* sp.) y tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus* var. chitralada) bajo diferentes condiciones de manejo en dos granjas piscícolas del occidente antioqueño. *Revista Politécnica*, 8(14), 97-104.

Plazas Pemberthy, L. A., & Paz Ruiz, N. E. (2019). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de parámetros de calidad de agua en cultivo de tilapia en una granja piscícola del departamento del Cauca. *Publicaciones e Investigación*, 13(2), 11–22. <https://doi.org/10.22490/25394088.3255>.

Ronzón-Ortega, M., Hernández-Vergara, M. P., & Pérez-Rostro, C. I. (2015). Producción acuapónica de tres hortalizas en sistemas asociados al cultivo semi intensivo de tilapia gris (*Oreochromis niloticus*). *Agroproductividad*, 8(3), 26-32.

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. & 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, Roma. <https://doi.org/10.4060/i4021es>

Somsueb, P. (1995). Optimum levels of essential fatty acids for growth and feed conversion of hybrid clarias catfish (*Clarias macrocephalus*, *Clarias gariepinus*). *Agriculture and Natural Resources*, 29(4), 479-485.

Stankus, A. (2021). State of world aquaculture 2020 and regional reviews: FAO webinar series. *FAO Aquaculture Newsletter*, (63), 17-18.

Steiner, A. A. (1980). The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horticulturae*, (98), 87-97.

Stentiford, G. D., & Holt, C. C. (2022). Global adoption of aquaculture to supply seafood. *Environmental Research Letters*, 17(4), 041003.

- Suloma, A., El-Husseiny, O. M., Hassane, M. I., Mabroke, R. S., & El-Haroun, E. R. (2014). Complementary responses between hydrolyzed feather meal, fish meal and soybean meal without amino acid supplementation in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* diets. *Aquaculture international*. 22(1377-1390).
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2009). *Fisiología vegetal* 4.Ed. Porto Alegre.
- Timmons, M. B., Ebeling, M. J., & Piedrahita, H. R. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Ithaca, USA: Cayuga Aqua Ventures.
- Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., Baca-Castillo, G. A., & Tejeda-Sartorius, O. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(5), 863-876.
- Torres-Novoa, D. M., & Hurtado-Nery, V. L. (2012). Requerimientos nutricionales para tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*). *Orinoquia*, 16(1), 63-68.
- Velasco-Muñoz, J.; Aznar-Sánchez, J.; Belmonte-Ureña, L. & Román-Sánchez, I. (2018). Sustainable water use in agriculture: a review of worldwide research. *Sustainability*, 10(1084):1-18.
- Wilén, B. M., Jin, B., & Lant, P. (2003). The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties. *Water Research*, 37(9), 2127-2139.
- Wongkiew, S., Park, M.R., Chandran, K., & Khanal, S.K. (2018). Aquaponic systems for sustainable resource recovery: linking nitrogen transformations to microbial communities. *Environmental Science & Technology*. 52(21), 12728–12739.
PubMed. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04177>.
- Yang, T. & Kim, H. J. 2019. Nutrient management regime affects water quality,

crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems. *Scientia Horticulturae*, 256, Article 108619.

Zhao, P., Huang, J., Wang, X. H., Song, X. L., Yang, C. H., Zhang, X. G., & Wang, G. C. (2012). The application of bioflocs technology in high-intensive, zero exchange farming systems of *Marsupenaeus japonicus*. *Aquaculture*, 354, 97-106.

Zheng, H.; Bian, Q.; Yin, Y.; Ying, H.; Yang, Q. & Cu, Z. (2018). Closing water productivity gaps to achieve food and water security for a global maize supply. *Scientific Reports*. 8(14762), Article14762.

3. COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L. var. Vulcan) CON ACUAPONIA CONVENCIONAL Y BIOFLOC

RESUMEN

El sistema de acuaponía es una técnica de producción que combina el cultivo de peces con el cultivo de plantas, ya sea de bajo porte (hortalizas de hoja) o de alto porte (hortalizas de fruto). El objetivo de este trabajo consistió en comparar el rendimiento de lechuga de un sistema de acuaponía convencional o recirculación simple con otro sistema de acuaponía con “Biofloc”. El tratamiento T1-Bio consistió en la implementación de un sistema de recirculación en el que se desacopló el sedimentador y el mineralizador, la alimentación del cultivo de tilapia fue de 95 % “Biofloc” y 5 % alimento comercial balanceado (ACB) con respecto la biomasa, a una densidad de $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. El T2-Rec consistió en un sistema de recirculación convencional en el que la cama de plantas y el tanque de peces estaban acoplados, en este tratamiento se suministró el 100% ACB estimando el 10% de ración, con base al peso del pez y a una densidad de $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ de tilapia. En ambos sistemas se evaluaron parámetros de calidad del agua (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, N-amoniaco, N-NO_3^- , N-NO_2^-), variables morfológicas (altura, diámetro de tallo y copa), peso fresco y seco de lechuga, y concentración de nutrientes en tejido y solución (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn). Los resultados mostraron que T2-Rec obtuvo un peso fresco promedio de 321.31 g/planta generando un rendimiento promedio de $18.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ a una densidad de $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ de tilapia. Mientras que T1-Bio mostró un peso fresco promedio de 10.73 g/planta generando un rendimiento promedio de $0.626 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ a una densidad de peces de $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Los tratamientos mostraron diferencias significativas en la concentración de macronutrientes en tejido de hoja, T2-Rec superó a T1-Bio en magnitud 3.44, 3.0, 2.28, 1.22 y 1.28 veces la concentración de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Para Fe y Mn también se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, T2-Rec obtuvo la mayor

concentración con 253 y 107.16 mg·kg⁻¹ respectivamente. Para Cu y Zn no se encontraron diferencias significativas. En solución nutritiva T1-Bio fue estadísticamente diferente a T2-Rec, la concentración N fue de 15.57 mg·L⁻¹, P (13.38 mg·L⁻¹) y Ca (46 mg·L⁻¹), mostrando diferencias significativas con T2-Rec, mientras que los valores de K (128.25 mg·L⁻¹) y Mg (177.70 mg·L⁻¹) de T2-Rec fueron superiores que T1-Bio y estadísticamente diferentes. La concentración de Fe en T1-Bio fue de 0.57 mg·L⁻¹, estadísticamente diferente y superior que T2-Rec, mientras que Mn (0.33 mg·L⁻¹) y B (0.25 mg·L⁻¹) fueron más altos en T2-Rec 16.5 y 3.1 veces más que en T1-Bio, para Cu y Zn no se encontraron diferencias significativas.

Con estos resultados se concluye que T2-Rec obtuvo un rendimiento 29 veces mayor que T1-Bio, la temperatura entre 25 y 27 °C, pH entre 6.5 y 7.0, conductividad eléctrica arriba de 1.5 dS·m⁻¹ y oxígeno disuelto superior a 6 mg·L⁻¹ son condiciones fisicoquímicas adecuadas para que los sistemas de recirculación simple puedan funcionar adecuadamente y se obtenga un crecimiento y desarrollo óptimos de lechuga.

Palabras clave: Lactuca sativa, amonio, nitritos, nitratos.

3.1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha contribuido a la creciente escasez de agua en México debido a las pocas lluvias durante el ciclo anual. Se espera que para el año 2030 este fenómeno conduzca a una disminución del 40 al 70% de las tierras productivas de temporal cultivables en México, lo que significa que nuestro país podría perder más de la mitad de sus tierras funcionales en menos de 9 años (Mekonnen & Hoekstra, 2016).

Por otro lado, el crecimiento poblacional y el aumento asociado a la demanda de alimentos ha impulsado el crecimiento de la agricultura y la acuacultura intensiva, de acuerdo con Monsees et al. (2019) en los últimos 10 años el sector productor de alimentos es el que registra un mayor crecimiento (5.4%), razón por la cual, los sistemas de producción en ambientes controlados, integrados y eficientes son alternativas para obtener alimentos suficientes y de calidad, basados en una producción sustentable y sostenible.

3.1.1 Acuaponía y los sistemas de recirculación (RAS)

En poco más de 10 años la acuaponía se ha posicionado en el sector agro-acuícola como un sistema de producción de bajo impacto ambiental, fácil replicabilidad y rentable, en niveles que van desde el autoconsumo hasta la producción de gran escala con sistemas desacoplados o D-RAS (Modarelli et al., 2022). El sistema de acuaponía es la combinación entre la acuicultura (cultivo de peces en un medio controlado) y la hidroponía (cultivo de plantas en medios inertes igualmente controlados). El sistema consiste en aprovechar los efluentes metabólicos y residuos del cultivo acuícola para transformarlos en nutrimentos disponibles para las plantas, esto se logra mediante procesos como la filtración, aireación y recirculación acoplados a procesos biológicos de acción bacteriana como la mineralización y la nitrificación (Candarle, 2015). De lo anterior se obtiene una solución nutritiva asimilable por las plantas, mismas que actúan como filtro biológico manteniendo la calidad del agua lo más apropiada para el

desarrollo piscícola (Endut et al., 2010; Pineda-Pineda et al., 2018). La calidad del agua en los sistemas integrados se refiere al mantenimiento de las condiciones físico-químicas del medio acuático que las contiene, es decir, de parámetros como la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto y la concentración regulada de amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) que permitirán en su conjunto, mantener al sistema en un balance óptimo (Wongkiew et al., 2018).

Desde el punto de vista de la eficiencia, el uso de recursos como el agua, la superficie cultivable y los fertilizantes, se reducen considerablemente en los sistemas de recirculación (RAS) a razón de evitar la descarga de grandes cantidades de agua al medio ambiente y aprovechar los compuestos nitrogenados producto de la descomposición del alimento y los desechos metabólicos de los organismos acuáticos (Modarelli et al., 2022; Palm et al., 2018; Pérez-Urrestarazu et al., 2019; Wongkiew et al., 2018). Uno de los grandes retos dentro del sistema es la remoción de las formas amoniacales tóxicas (NH_3 , NH_4^+) que excretan los peces por las branquias y la orina, los cuales son altamente solubles, lo que puede ocasionar graves consecuencias si los organismos se exponen a la presencia de estos compuestos por periodos prolongados, por esto se procura la biofiltración como un proceso acoplado o desacoplado al sistema con el fin de oxidar sucesivamente las moléculas de amonio (NH_4^+) a nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) por acción de un grupo de bacterias aeróbicas de los géneros *Nitrosomonas*, *Nitrosolobus* y *Nitrosovibrio*, y aquellas oxidantes de nitritos que comprenden géneros como *Nitrobacter*, *Nitrosococcus* y *Nitrospira* (Ingle de la Mora et al., 2003; Modarelli et al., 2022; Timmons et al., 2002).

3.1.2 “Biofloc” y el cultivo de tilapia en México

La acuicultura de tilapia (*Oreochromis niloticus*) constituye una actividad económica de relevancia al desarrollo regional y a la oferta alimentaria en México, es una propuesta productiva complementaria a la pesca de captura marítima y de agua dulce extensiva al desarrollo rural. Betanzo-Torres et al. (2019)

comentan que la tilapia es la especie de mayor consumo y productividad en las granjas piscícolas de nuestro país con más de 4,500 unidades que representan alrededor de 50% del total de las granjas productoras (Betanzo-Torres et al., 2019). Según datos del CONAPESCA (2020) en el año en mención se registró una producción total de tilapia arriba de 72 mil toneladas en 29 entidades federativas mexicanas, lo que significa en términos económicos una derrama de más de dos mil millones de pesos para el PIB.

La tilapia es una especie que por sus características biológicas se considera de rápido crecimiento, es adaptable a condiciones de temperatura que van de los 20 a los 35 °C, es resistente a enfermedades y a estrés por manejo, alcanza la madurez sexual entre los 80 y 100 g y pueden producir crías cada 4 semanas; ha sido un especie mejorada genéticamente y su alimentación puede ser natural o balanceada, tiene un alto contenido proteico y es una especie de gran interés socioeconómico (Sotomayor et al., 2022).

En la actualidad, algunos cultivos de tilapia han resultado favorecidos con el uso de la tecnología “Biofloc”, que se basa en promover el desarrollo de biomasa microbiana (flóculos integrados por bacterias, fitoplancton, materia orgánica e inorgánica) a partir de una fuente de carbono y nitrógeno, con el fin de proveer al cultivo de una alimentación natural de mayor digestibilidad y al mismo tiempo, mantener la calidad del agua (Avnimelech, 2009; Betanzo-Torres et al., 2019). Es importante destacar que una cuestión definitoria en el manejo para la implementación correcta de esta tecnología es considerar un balance apropiado entre la fuente de carbono y nitrógeno que puede ir en proporción 15:1 hasta 25:1, así como mantener el sistema en constante flujo de recirculación y aireación (Hernández-Mancipe et al., 2019).

3.1.3 El cultivo de lechuga

La lechuga es la hortaliza de mayor consumo en México y en el mundo, el aporte nutricional es principalmente 21 % de vitamina A, 18 % de ácido fólico y 5 % de vitamina C, además de contener minerales como hierro, calcio y potasio (USDA, 2019; IOM, 2011). Respecto a su cultivo, es la especie vegetal que se selecciona

con mayor frecuencia para su producción en sistemas de acuaponía, ya que es una especie de ciclo corto y alto rendimiento en condiciones de invernadero (Cruz-Suarez et al., 2000). El objetivo del presente trabajo fue comparar el rendimiento de lechuga en dos sistemas de acuaponía con recirculación, en el primer tratamiento se utilizó “Biofloc” y el segundo alimento comercial balaceado.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Ubicación del experimento

El presente trabajo de investigación se desarrolló en un invernadero de 195 m² localizado en el campo San Ignacio dentro de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (Figura 1). La duración fue de 60 días, inició en el mes de abril y finalizó en el mes de mayo del año 2022.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Localización geográfica del proyecto de investigación.

3.2.2 Tratamientos y diseño experimental

Se realizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos y tres repeticiones, dando un total de seis unidades experimentales. El primer tratamiento consistió en acuaponía con “Biofloc” en una relación C: N de 12:1 empleando melaza como fuente de carbono, complementado con 5% de ración

alimenticia y la fórmula 5015 de alimento comercial balanceado de la marca Nutripec® (T1-Bio), el segundo tratamiento fue en acuaponía de recirculación con el 10% de ración alimenticia y la fórmula 5015 de alimento comercial balanceado marca Nutripec® (T2-Rec).

3.2.3 Montaje de unidades de producción

Las unidades de producción para T1-Bio (Figura 2) consistieron en 3 tanques circulares de polietileno con capacidad de 170 L, adicionalmente se acoplaron 3 sedimentadores de flujo radial de 70 L para la separación de residuos en tres tipos: sedimentables, suspendidos y disueltos. Por otra parte, se conectaron 3 tinas de polietileno de 40 L que contenían 6 m de malla anti pájaros, misma que tuvo la función de servir como sustrato de adherencia para las bacterias. Finalmente se colocaron 3 tinas más de polietileno de 1×0.6×0.4 m de largo, ancho y profundidad, respectivamente, que funcionaron como contenedor de 210 L de agua, adicionalmente, sobre esa superficie se colocaron balsas flotantes de poliestireno extruido de 1 pulgada. Para el T2-Rec (Figura 3) se utilizó el mismo arreglo físico de Pineda et al. (2018) que consistió en tres tanques de polietileno de 170 L acoplado a tres tinas de polietileno con capacidad de 210 L rellenas de sustrato tezontle, con la modificación en este experimento del acomodo del sustrato por capas de granulometría, iniciando con grosor de 8 mm al fondo y finalizando en 4 mm en la parte más superficial.

En ambos sistemas, la recirculación del agua se realizó con tubería de PVC de ½ pulg y una bomba sumergible de 0.25 hP, la aireación se suministró por conducto de tuberías de PVC de 3 pulgadas provenientes de un blower GF-370 de 1600 mm H₂O de presión, se dispersó 24 horas continuas en cada tanque con 4 piedras difusoras de 3 mm de burbuja.



Figura 2. Diseño del sistema (T1-Bio)



Figura 3. Diseño del sistema (T2-Rec)

3.2.4 Análisis de calidad del agua

Previo al montaje del experimento se realizó un análisis de la calidad del agua en el laboratorio de LANISAF (Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal) que incluye los elementos y procedimientos descritos en el Cuadro 4.

3.2.5 Concentración de nutrimentos en tejido de lechuga y solución

Al termino de las 48 horas en la estufa de secado, se sacaron las muestras de hojas y raíces de las plantas y se pesaron para obtener peso seco. Posteriormente las muestras se trituraron con un molino de acero inoxidable marca Foss® para obtener material pulverizado que sirvió para la digestión de la muestra.

Las variables evaluadas en las muestras de T1-Bio y T2-Rec se dividieron en dos grupos: los macronutrimentos que se determinaron en el Laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo y que corresponden a N (NO_3^- y NH_4^+) determinadas por el método micro-Kjeldahl (Pineda-Pineda et al., 2018), P (H_2PO_4^-) que se determinó por el método molibdovanadato amarillo a una absorbancia de 420 nm en un

espectrofotómetro Thermo Scientific modelo Genesys 10 (Pineda et al., 2017). El K^+ , Ca^{2+} y Na se cuantificaron en un flamómetro M410 de Sherwood, para Mg^{2+} se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica modelo Savant AA marca GBC. El segundo grupo correspondió a la determinación de los micronutrientes como Boro, el cual se cuantificó por colorimetría con Azometina-H en espectrofotómetro ultra-violeta, y Fe, Cu, Mn y Zn se determinaron con espectrofotómetro de absorción atómica marca Savant AA modelo GBC.

Cuadro 4. Procedimientos utilizados en la determinación de calidad del agua.

Elemento	Técnica utilizada
Fósforo	Cuantificación por colorimetría con molibdato de amonio en espectrofotómetro ultra-violeta.
Boro	Cuantificación por colorimetría con Azometina-H en espectrofotómetro ultra-violeta.
Sulfatos	Cuantificación por turbidimetría en espectrofotómetro Ultra-Violeta.
Calcio, Manganeso, Cobre, Hierro, Zinc, Cromo, Cadmio, Níquel	Cuantificación en espectrofotómetro de absorción atómica.
Nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^-)	Cuantificación en analizador por inyección de flujo (FIA)
Sodio, Potasio	Cuantificación en flamómetro.
Carbonatos, Bicarbonatos, Cloruros	Titulación volumétrica según la NOM 021-SEMARNAT-2000.

3.2.6 Calidad del agua en tanque de peces

Las variables de temperatura, pH y conductividad eléctrica se midieron con un sensor Groline de Hanna® HI981420, el oxígeno disuelto se midió con un oxímetro de Hanna® HI9146, dichos parámetros se midieron las 24 horas tomando lecturas cada 10 min, los datos se enviaron a un Datalogger donde se

colectaron durante el tiempo de duración del experimento. Finalmente, las pruebas de Amonio, Nitritos y Nitratos se realizaron cada semana en el mismo día de extracción del material vegetal y se determinó su concentración con las pruebas rápidas por colorimetría de FluvalTest®.

3.2.7 Biometrías de peces

Los datos morfológicos de peso y longitud del pez que se tomaron cada semana el mismo día del muestreo en plantas y de calidad del agua. Para ello se determinó que el tamaño de la muestra fuera siempre del 10% del total de la población en cada muestreo. Con una red cuchara de ½ mm de grosor de malla, se extrajeron 25 ejemplares por tanque, se colocaron en un contenedor diferente con agua y 70 g de sal de mar disuelta con el fin de evitar contagios por contaminación cruzada e higiene. Posteriormente se pesaron uno a uno en una báscula OHAUS modelo Traveler TA302 y con una cinta métrica flexible se midió la longitud, se aprovechó para revisar el estado de salud de los organismos y una vez finalizadas las mediciones se regresaron al tanque.

3.2.8 Análisis estadístico

Los datos resultantes fueron sometidos a un análisis de varianza (ANAVA) con una confiabilidad del 95%, para las pruebas de comparaciones múltiples de medias se utilizó Tukey ($p \leq 0.05$) y Diferencia Mínima Significativa (DMS) utilizando el programa estadístico SAS® Studio 2022.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Análisis de la calidad del agua

Los resultados del análisis del agua tuvieron la finalidad de conocer las características químicas y nutrimentales presentes en el agua del invernadero, los resultados fueron cotejados con Castellanos et al., (2000) y Gómez et al., (2015) de manera que los resultados obtenidos (Cuadro 5) se encuentran dentro del intervalo considerado como aceptable y en grado de restricción leve.

Cuadro 5. Análisis de la calidad del agua usada en T1-Bio y T2-Rec comparada con otros parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola.

Parámetro	Unidades	Concentración	Concentración	Concentración
			Castellanos et al., 2000	Gómez et al., 2015 (Tlaxcala, Ocotlán)
pH		7.72	-	7.76
Conductividad eléctrica	dS·m ⁻¹	0.48	< 0.7 – 3.0	0.27
Calcio	meq·L ⁻¹	1.21	-	1.01
Magnesio	meq·L ⁻¹	1.00	-	0.81
Potasio	meq·L ⁻¹	0.18	-	0.11
Sodio	meq·L ⁻¹	2.52	< 5.0 – 10.0	0.47
Bicarbonatos	meq·L ⁻¹	3.30	< 1.5 – 8.0	2.10
Cl ⁻	meq·L ⁻¹	0.41	-	0.37
SO ₄ ²⁻	meq·L ⁻¹	0.62	-	0.13
N-NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻	mg·L ⁻¹	2.76	-	1.12
P	mg·L ⁻¹	0.13	-	0.00
B	mg·L ⁻¹	0.29	< 0.7 – 3.0	-
Fe	mg·L ⁻¹	0.10	< 0.1 – 1.5	0.027
Zn	mg·L ⁻¹	0.01	NR	NR

^z NR= elemento no reportado.

3.3.2 Variables de crecimiento y desarrollo de lechuga

Las variables morfológicas medidas para estimar el rendimiento de lechuga fueron número de hojas, largo, ancho y área foliar. Se encontró que T2-Rec mostró diferencias significativas superando a T1-Bio en 3.0, 1.9, 2.6 y 23.8 veces más en todas las variables, respectivamente (Cuadro 6).

Las variables morfológicas se midieron por semana, sin embargo, solo reportan los valores tomados al día de la cosecha (25 de mayo).

Cuadro 6. Comparación de las variables morfológicas de crecimiento y desarrollo de lechuga en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec realizado en mayo del 2022.

	Número hojas	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área foliar (cm ²)	IAF	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
T2-Rec	28.0a ^z	17.79a	14.44a	4627.4a	64.26a	312.31a	61.73a
T1-Bio	9.33b	9.16b	5.36b	194.42b	5.56b	10.73b	12.63b
C.V.	8.30	4.22	5.01	9.51	9.52	16.96	11.37

^z Valores con letras iguales en la misma columna no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p \leq 0.05$). ^z IAF = Índice de área foliar, ^y C. V. = Coeficiente de variación.

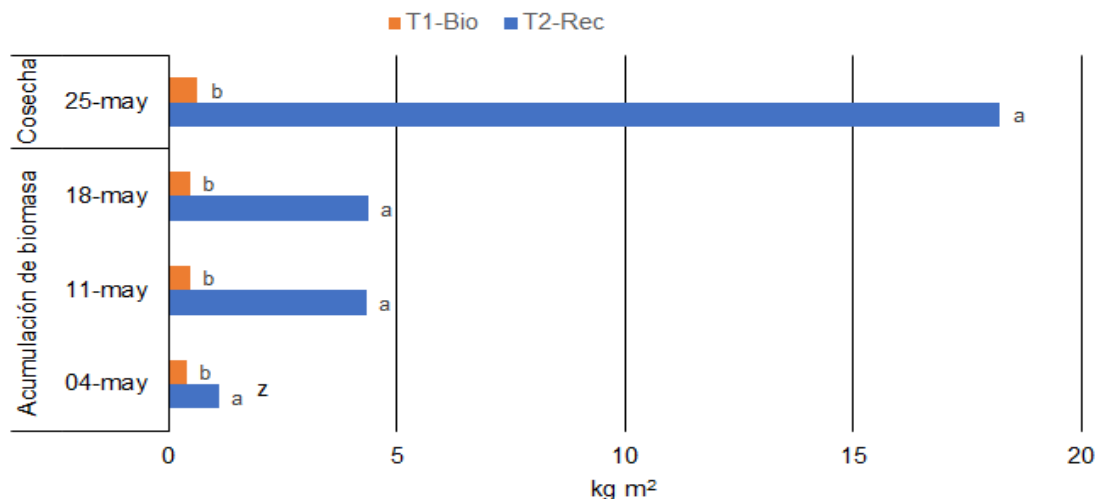
Los mayores valores en T2-Rec se debieron a condiciones más favorables de absorción de nutrientes en cama de tezontle que en balsa flotante ya que las propiedades físicas y químicas de granulometría, porosidad, tamaño de partícula, pH y conductividad eléctrica, son variables estrechamente relacionadas con la absorción nutrimental y el correcto desarrollo de la raíz en sustratos de tezontle (Trejo-Téllez et al., 2013). Adicionalmente, Valenzuela-Antelo et al. (2023), mencionan que el uso de sustratos como el tezontle con granulometría menor a 1 cm promueve la retención de humedad y aumenta la superficie de adherencia de bacterias promotoras del crecimiento en los sistemas acuapónicos lo que sustenta que la granulometría de 4 mm usada en el experimento fue adecuada. En cuanto al peso seco y fresco de materia vegetal, se encontró que las medias más altas de ambas variables las obtuvo el T2-Rec con 312.31 g/planta de peso fresco y 61.73 g/planta de peso seco, lo que corresponde a una diferencia de 29.1 y 4.88 veces más con respecto al peso fresco y seco de T1-Bio, lo que resalta las diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 6). Según el trabajo de Mosees et al. (2019) se obtuvo un peso fresco de cabezas de lechuga

de 323.3 y 332 g/planta en sus dos tratamientos con RAS-D, con lo que afirman que la acuaponía desacoplada es tan efectiva como la hidroponía convencional, ya que usa alrededor de 63% menos fertilizante mineral. Por otro lado, la distribución de materia seca vía floema es importante para el desarrollo de las plantas, esto explica que al no existir superficie foliar, los fotosintatos fueron sintetizados y translocados en cantidad suficiente para efectuar el correcto desarrollo y crecimiento de lechugas en T2-Rec, mientras que en T1-Bio no ocurrieron adecuadamente estos procesos (Barrientos-Lanos et al., 2015). Si bien, el peso seco y fresco son dos variables altamente relacionadas con el rendimiento, también lo es el IAF (índice de Área Foliar) del que depende la actividad fotosintética de un cultivo y la relación entre biomasa acumulada y rendimiento estimado (Taiz & Zeiger, 2009). Bajo este contexto, el T2-Rec presentó la media más alta de IAF con un valor de 64.26 cm² que representa 11.55 veces más que el valor de IAF de T1-Bio, lo anterior indica un valor adecuado comparado con estudios realizados por García-Zertuche et al. (2021), donde reportan un valor similar para sistemas de acuaponía sin fertilización complementaria. Aunque la intensidad de luz fue la misma para ambos tratamientos, la capacidad fotosintética no lo fue, el desarrollo y crecimiento del cultivo de lechuga en T1-Bio resultó en una media de IAF de 2.24, posiblemente en consecuencia a mecanismos de respuesta por estrés relacionado con el balance carbono-nitrógeno C:N: 12:1 usado para sembrar el “Biofloc” y por lo tanto, pudo haber originado la proliferación de organismos heterótrofos que inmovilizaron el nitrógeno como parte de sus procesos biológicos con el fin último de incrementar la biomasa bacteriana y no la vegetal (Hernández-Mancipe et al., 2019).

3.3.3 Rendimiento

Para esta variable se observaron diferencias significativas entre los tratamientos durante el periodo de acumulación de biomasa y al tiempo de la cosecha, siendo el T2-Rec el tratamiento que obtuvo el mayor rendimiento promedio de 18.21 kg·m⁻² a una densidad de tilapia de 4 kg·m⁻³ en comparación con el T1-Bio que

obtuvo un rendimiento promedio de $0.62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ con una densidad de $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 4). Quispe et al. (2018), reportaron un rendimiento de lechuga de $2.74 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en sistema acuapónico de recirculación y $2.57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en sistema de hidroponía, por lo que el rendimiento encontrado en T2-Rec es 7.37 y 7.0 veces mayor, respectivamente, que el reportado por dichos autores. Por otro lado, en el trabajo de Pantanella et al. (2012) se alcanzó un rendimiento de lechuga romana de $2.71 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en balsa flotante y cultivo de tilapia con una densidad de $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, por lo que el rendimiento de T2-Rec es 6.7 veces mayor que los datos obtenidos en ese trabajo. Por su parte, Dediu et al. (2012) reportaron que en términos de productividad de lechuga, el peso promedio de las lechugas cultivadas en hidroponía de baja retención hidráulica fue de $3.76 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, mientras que en hidroponía de alta retención hidráulica contuvieron $3.38 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, valores que se encuentran por debajo de los reportados en este trabajo.



	04-may	11-may	18-may	25-may
C.V.	10.66	13.82	10.98	12.33

^z Valores con letras iguales en las columnas de diferente color no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p \leq 0.05$).

^y C.V.= Coeficiente de variación.

Figura 4. Comparación del rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en función de los tratamientos T1-Bio, T2-Rec durante el mes de mayo 2022.

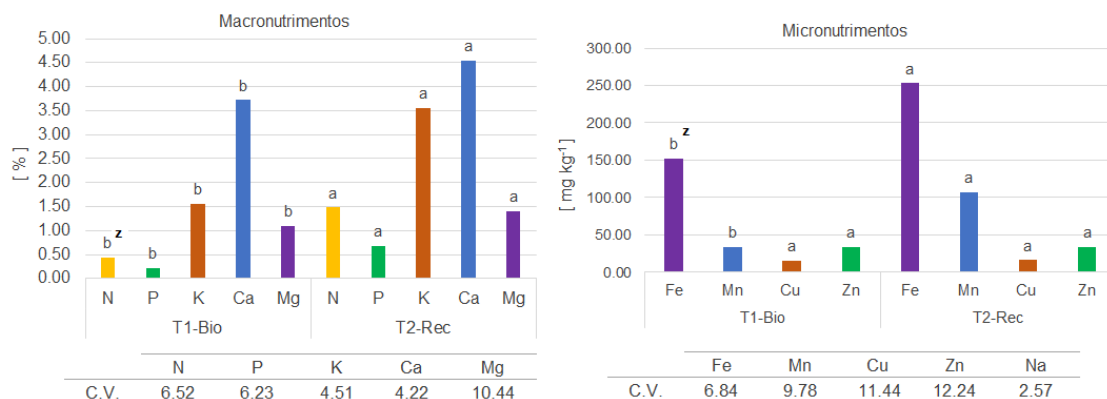
Finalmente, Lennard y Ward (2019) reportaron una producción de 15 lechugas por metro cuadrado, lo que constituye un rendimiento mayor que un cultivo tradicional; mientras que en este trabajo de investigación en T2-Rec se obtuvieron 21 lechugas por metro cuadrado, lo que representa 1.4 veces más de producción por metro cuadrado que los valores obtenidos por dichos investigadores.

Sin embargo, existen varias razones que pudieron responder al bajo rendimiento del T1-Bio comparado con T2-Rec, una de ellas es la falta de maduración del sistema puesto que el experimento inició en el mes de abril con una densidad de tilapias de $0.028 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y finalizó en mayo con una densidad de $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; cabe destacar que aunque el número de peces fue el mismo en todas las repeticiones de los dos tratamientos, la biomasa de T1-Bio fue estadísticamente diferente y menor que T2-Rec ($P \leq 0.05$) posiblemente por condiciones de estrés dentro del tanque los peces dejaron de consumir alimento, y su crecimiento y desarrollo se vio afectado, por lo tanto, al existir bajas densidades de peces, los efluentes metabólicos (deshechos) no fueron suficientes para ser reciclados, transformados y aprovechados y los 2 meses en recirculación resultaron deficientes en contraste con un trabajo experimental que en condiciones de invernadero, reportó que los sistemas maduros de acuaponía (4 - 6 meses en recirculación) reflejaron rendimientos de tomate y pepino más altos comparados con los sistemas de hidroponía (Savidov, 2005). Por otro lado, Yáñez (2013) expresa que en la maduración de un sistema de acuaponía para producir una carga de bacterias autótrofas y heterótrofas que transformen las diversas formas amoniacales es importante de considerar en el manejo inicial de estos sistemas con el fin de cubrir los requerimientos nutricionales tanto para plantas como para peces.

3.3.4 Nutrimientos en tejido de lechuga

De acuerdo con los análisis realizados para determinar la concentración de macro y micronutrientes en tejido vegetal, se observó que para el primer grupo de nutrientes como N, P, K, Ca y Mg los tratamientos mostraron diferencias

significativas. Los resultados de T2-Rec superaron en magnitud de 3.44, 3.0, 2.28, 1.22 y 1.28 veces más a los resultados obtenidos en T1-bio para la concentración de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente (figura 5). De acuerdo con los rangos óptimos y de suficiencia reportados en el trabajo de Pineda et al. (2018), los autores encontraron en las variedades de lechuga Andrómeda y Ruby Sky cultivadas en acuaponía un porcentaje de concentración de N (4.02 y 4.03%), P (0.62 y 0.54%), K (7.49 y 5.71%), Ca (1.58 y 2.18%) y Mg (0.76 y 0.98%), que a diferencia de las concentraciones de N en T1-Bio y T2-Rec no se alcanzaron los rangos óptimos de 400 ppm como mínimo para efectuar procesos metabólicos en el caso de T1-Bio (Ako & Baker, 2004), y aunque T2-Rec presentó una condición de insuficiencia para N (1.48%) y K (3.56%), las concentraciones de P (0.67%), Ca (4.55%) y Mg (1.41%) fueron adecuadas, generando una biomasa total efectiva de 4.5 kg·m² en 21 días (Ako & Baker, 2004; Barrientos-Lanos et al., 2015). Así mismo, las concentraciones de P, K, Ca y Mg de T2-Rec coinciden con los rangos de suficiencia reportados por Pineda et al. (2018). Según Beverly et al. (1984) y Sánchez et al. (1988), los rangos de suficiencia para P van de 0.35 - 0.60 % al igual que K en el rango de 4.8 - 8 %, mientras que Wade, (1981) reportó concentraciones de Ca en un rango de suficiencia de 1.2 - 2.0 % y Mg en el rango de 0.4 - 0.8 % según Sánchez et al. (1988), lo que coloca a los resultados obtenidos en T2-Rec en condiciones de suficiencia. Finalmente, Benimeli et al. (2019) expresan que uno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas es el N y al estar en cantidades deficientes el cultivo mantiene un incipiente estado de desarrollo que conlleva descensos productivos que coincide con lo ocurrido en T1-Bio. En un sistema de acuaponía, la asimilación de nitrógeno por parte de las plantas ocurre en forma de nitrato (NO₃⁻), sin embargo, la presencia de amonio en elevadas concentraciones dentro de la solución inhibe la absorción de cationes (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), por el contrario, una concentración de nitrato por encima de 90 mg·L⁻¹ en la solución no representa una condición de toxicidad, pues la planta lo puede almacenar hasta ser utilizado o incorporado a moléculas orgánicas por actividad enzimática de la nitrato reductasa (Cockx & Simonne, 2003).



^z Valores con letras iguales en la misma barra de color no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p \leq 0.05$).

^y C.V.= Coeficiente de variación.

Figura 5 Comparación de la concentración de nutrientes en el tejido de lechuga en función de los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.

El otro grupo de variables que fueron analizadas para conocer el estado nutricional del cultivo son los micronutrientes, que se definen como todos aquellos elementos funcionales que se requieren en bajas cantidades y su concentración en el tejido vegetal se encuentra en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a diferencia de los macronutrientes que se reportaron en porcentaje por tratarse de cantidades más altas. Para el caso de Fe y Mn se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (figura 5), T2-Rec obtuvo una concentración de $253 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de Fe y $107.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de Mn, superando al T1-Bio en magnitud de 1.65 y 3.24 veces más, respectivamente. Para Cu y Zn no se encontraron diferencias significativas entre ambos tratamientos, pero en el caso de Cu su disponibilidad estuvo en el rango de deficiencia, es posible que esta condición se debiera a las diferencias en el pH, pues con el aumento de este parámetro a 7.9, se pudo haber visto afectada su disponibilidad y absorción en el tejido vegetal de ambos sistemas mientras que Zn se encontró dentro del rango de suficiencia ($25\text{-}100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) según lo reportado por Mills y Jones (1996). Por otro lado, la concentración de Fe en T2-Rec fue de $253 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, estadísticamente diferente y 1.65 veces mayor que T1-Bio y la concentración de Mn en T2-Rec fue de $107.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

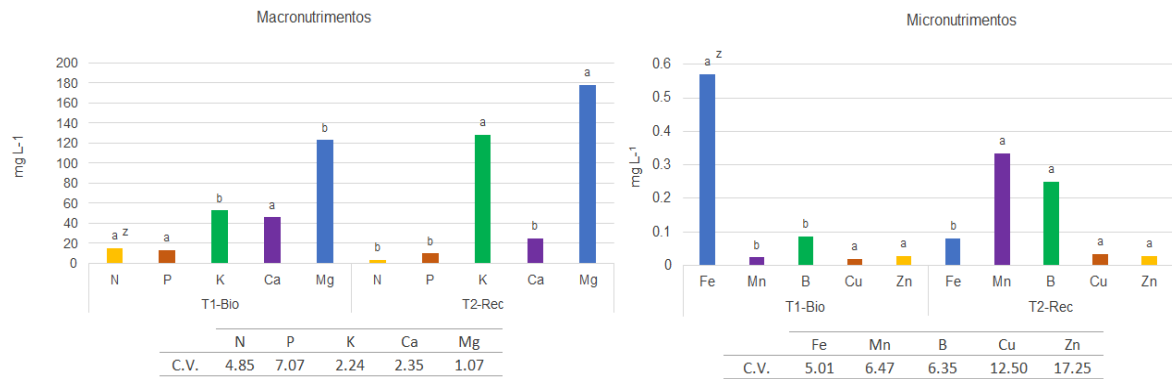
igualmente diferente y mayor 3.2 veces más que T1-Bio, lo que quiere decir que la concentración de estos micronutrientes se encuentra dentro de los rangos considerados como óptimos (Fe 50-500 mg·kg⁻¹ y Mg 25-130 mg·kg⁻¹), según lo reportado por Mills y Jones (1996).

3.3.5 Solución nutritiva

La composición de la solución nutritiva también se analizó separando los grupos de elementos de manera similar al tejido y solo se consideraron los valores finales del experimento al momento de la cosecha de plantas. Para el primer grupo de elementos, N, P, K, Ca y Mg, se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, el T1-Bio fue superior a T2-Rec en 4.4, 1.36 y 1.86 veces más en la concentración de N, P y Ca con 15.57 mg·L⁻¹, 13.38 mg·L⁻¹ y 46 mg·L⁻¹, respectivamente, mientras que los valores de K 128.25 mg·L⁻¹ y Mg²⁺ 177.70 mg·L⁻¹ de T2-Rec fueron superiores, lo que significa que este tratamiento fue 2.45 y 1.44 veces superior en la concentración de dichos cationes que en T1-Bio (figura 6). Siguiendo con el segundo grupo de elementos se encontró que Fe, Mn y B son estadísticamente diferentes, mientras que para Cu y Zn no se encontraron diferencias significativas. Las concentraciones fueron 0.57 mg·L⁻¹ de Fe para T1-Bio superando al T2-Rec 7.1 veces más, mientras que Mn (0.33 mg·L⁻¹) y B (0.25 mg·L⁻¹) fueron más altos en T2-Rec 16.5 y 3.1 veces más que en T1-Bio (figura 6).

En el trabajo de Delaide et al. (2016) se demostró que los sistemas acuapónicos de recirculación simple (RAS) y doble recirculación (D-RAS) pueden superar las tasas de crecimiento encontradas en los sistemas hidropónicos convencionales, basado uno de ellos en suplementación mineral; en el contexto anterior, los autores reportaron concentraciones promedio de N (50-215.52 mg·L⁻¹), P (7.83 - 52.16 mg·L⁻¹), K (59.51 - 219.31 mg·L⁻¹), Ca (14.72 - 175.09 mg·L⁻¹), Mg (7.36 - 43.02 mg·L⁻¹), Fe (4.47 - 4.40 mg·L⁻¹), Mn (0.50 - 0.66 mg·L⁻¹), B (0.47 - 0.59 mg·L⁻¹), Cu (0.09 - 0.12 mg·L⁻¹) y Zn (0.14 - 0.16 mg·L⁻¹), lo que sirve de referencia comparativa y reafirma que los resultados en este trabajo para el T2-Rec son

óptimos para generar altos rendimientos de lechuga y que para T1-Bio se debiera poner especial énfasis en equilibrar las cargas microbiológicas y la materia orgánica disuelta para poder elevar las tasas de crecimiento de lechuga en este sistema.



^z Valores con letras iguales en la misma barra de color no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p \leq 0.05$).
^y C.V. = Coeficiente de variación.

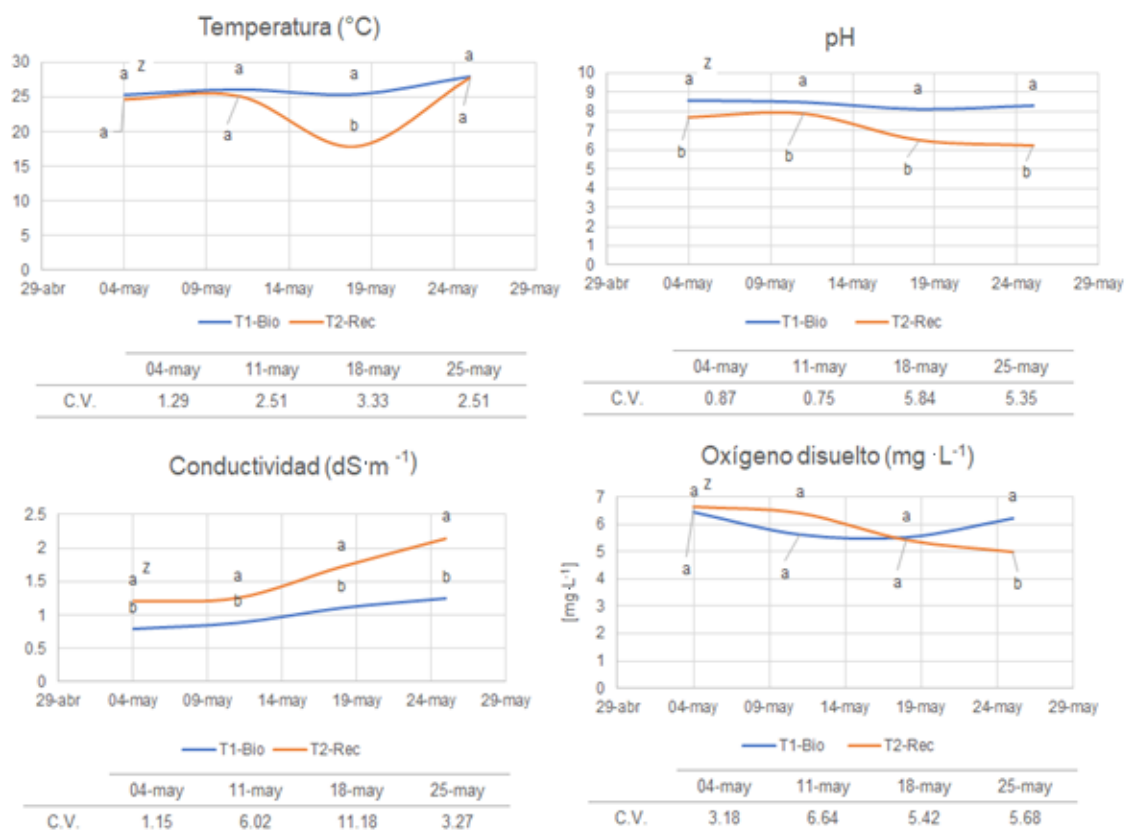
Figura 6. Comparación de la concentración de nutrientes en la solución nutritiva en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.

Así mismo, es necesario resaltar que, con excepción del nitrógeno, en la solución nutritiva del T1-Bio se obtuvieron concentraciones de los demás nutrientes cercanas a valores óptimos, lo que quiere decir que sí es posible obtener una solución nutritiva con la mayoría de los elementos en solución, sin embargo, la proliferación del grupo de bacterias encargadas de los procesos oxidativos del NH_4^+ a NO_3^- no fue la esperada y aunque ya existen trabajos de caracterización de microorganismos del “Biofloc” (Hernández-Mancipe et al. 2019; Wonkiew, 2018), sería recomendable hacer una caracterización del consorcio bacteriano presente en el “Biofloc” de sistemas acuapónicos, con el fin de poder establecer un mejor balance microbiológico (Betanzo-Torres, 2019; Hernández-Mancipe et al., 2019; Delaide et al., 2016; Blume & Brümmer, 1991). También sería conveniente probar el sustrato de tezontle como filtro biológico en un sistema de “Biofloc” con recirculación desacoplada como en el T1-Bio, dado que por las

características antes mencionadas es posible lograr la colonización y fijación de bacterias nitrificantes (Hernández-Mancipe et al., 2019; Trejo-Téllez et al., 2013).

3.3.6 Calidad de agua en tanque de peces

Los parámetros de calidad del agua constituyen un factor importante para el correcto desarrollo y crecimiento de los peces al ser primer eslabón de la cadena productiva en un sistema de acuaponía (Somerville et al., 2022). Los resultados indican que la temperatura no mostró diferencias significativas, excepto por el muestreo del 18 de mayo que por cuestiones de falta de luz los resultados fueron diferentes, sin embargo, se mantuvo en un intervalo promedio de 27-28 °C. El pH y la conductividad eléctrica presentaron diferencias significativas entre tratamientos, con intervalos de pH de 7.8 a 8 para el T1-Bio y 6.5 a 7.0 para el T2-Rec. La conductividad eléctrica en T1-Bio se incrementó desde 0.79 a 1.24 dS·m⁻¹ en un intervalo de 28 días, mientras que en T2-Rec ascendió de 1.21 a 2.15 dS·m⁻¹. El parámetro de conductividad eléctrica es el indicador de la concentración de sales totales en la solución nutritiva, y según Ansorena (1994), no debe exceder los 3.5 dS·m⁻¹, lo que muestra que los resultados obtenidos en este trabajo están dentro de los rangos adecuados. El oxígeno disuelto (OD) no presentó diferencias significativas en los tres primeros muestreos de ambos sistemas, sin embargo, en el T2-Rec la concentración de OD disminuyó de 6.3 a 5.0 mg·L⁻¹, por lo que en el último muestreo se diferenció estadísticamente del T1-Bio que se mantuvo en un intervalo entre 6.2 - 6.5 mg·L⁻¹, la razón de esta diferencia puede estar relacionada con la diferencia de temperatura y la concentración de oxígeno disuelto, pues ambas variables son inversamente proporcionales (Ibáñez et al., 2017; Lennard & Ward, 2019), lo que es congruente con la temperatura más alta registrada durante el experimento (28 °C) en el T2-Rec (Figura 7).



^z Valores con letras iguales en la misma columna no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p \leq 0.05$). ^y C. V. = Coeficiente de variación.

Figura 7. Comparación de los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, medidos semanalmente en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.

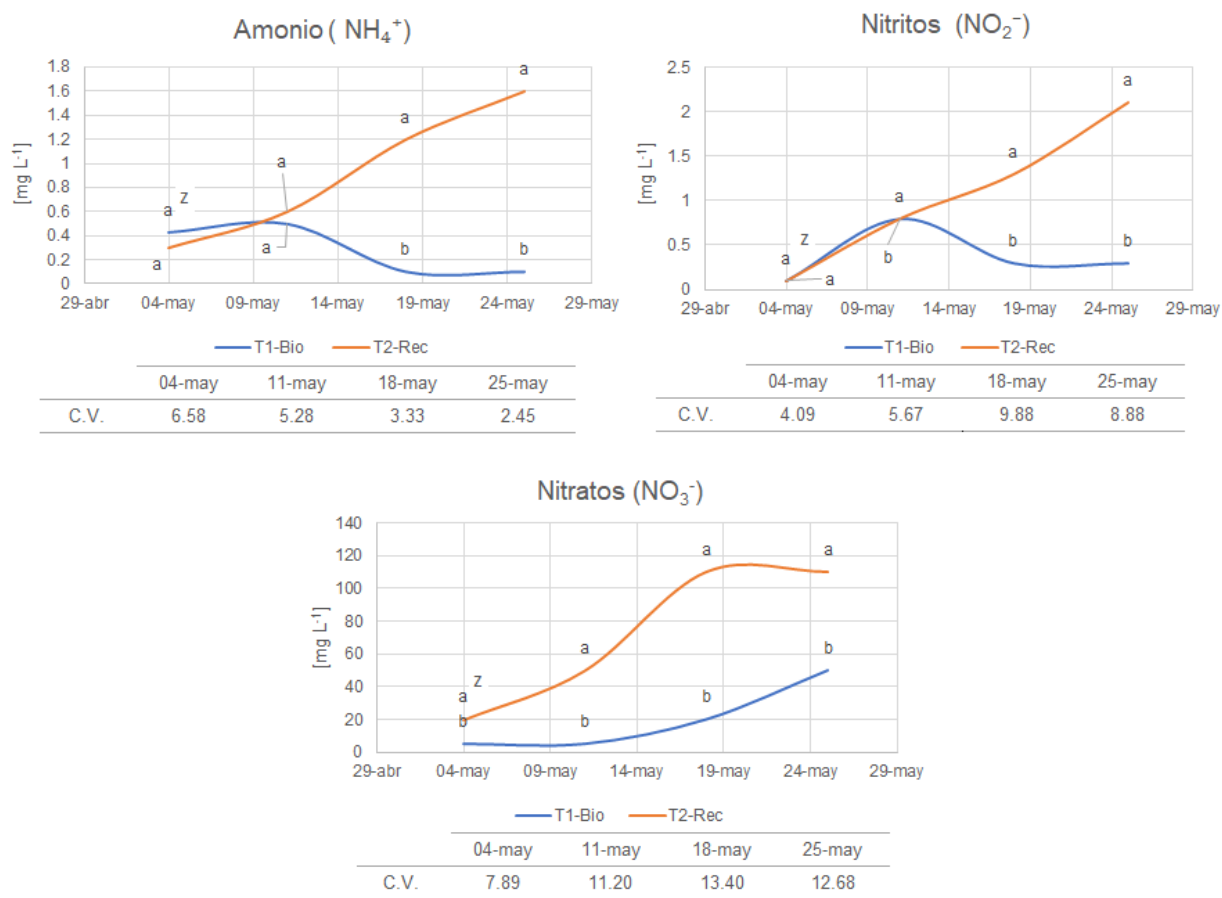
Con respecto a la temperatura, Bonilla-Paz et al. (2018) e Ibáñez et al. (2017) expusieron que el rango óptimo para crecimiento de tilapia es 28-32 °C, pero en un intervalo entre 13-15 °C las tilapias sufren estrés por baja temperatura, aletargan su metabolismo y ocurre una disminución en el consumo de alimento, mientras que en el intervalo de los 32- 34 °C los peces sufren estrés por alta temperatura, su metabolismo se acelera y consumen más oxígeno; ambos extremos pueden constituirse como un factor limitante en el crecimiento de tilapia.

Para decir que en un sistema acuapónico el pH es ideal para peces y plantas, el intervalo tendría que estar ente 6.0 a 7.5, lo que coloca los niveles de pH de T1-

Bio y T2-Rec en un nivel aceptable, inclusive se ha demostrado que a valores de pH por debajo de 5.0, puede ocurrir una disminución en la abundancia relativa de organismos nitrificantes, que podría provocar niveles altos de nitrógeno amoniacal (Wongkiew et al., 2018). Por otro lado, la influencia del pH en la absorción de micro y macronutrientes a un pH de 6.0 a 7.5 es óptimo para la absorción de macronutrientes como el fósforo (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} o PO_4^{3-}), potasio (K^+), azufre (SO_4^{2-}), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). Teniendo en cuenta que los micronutrientes como el hierro (Fe^{3+} , Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), boro (BO_3^{2-} , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$), cobre (Cu^{2+} , Cu^+) y zinc (Zn^{2+}) se absorben preferentemente a valores de pH inferiores a 6.0 (Lucas & Davis, 1961).

Con respecto a los valores de amonio en solución (figura 8) se encontraron diferencias significativas en el último muestreo. Mientras que la concentración de amonio en T1-Bio fue disminuyendo de 0.43 a 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, la concentración en T2-Rec fue aumentando de 0.3 a 1.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. La concentración de nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) presentaron diferencias significativas en el último muestreo, se observó que T2-Rec obtuvo una concentración de nitritos 7 veces mayor que T1-Bio y una concentración de nitratos 2.2 veces mayor que T1-Bio (figura 8). Lo anterior pudo deberse a que en T2-Rec sí ocurrieron de manera completa los procesos de mineralización y nitrificación, que en parte se debió a la cama de tezontle cribado en partículas de 4, 6 y 8 mm que sirvió de manera eficaz como filtro biológico y por otra parte, a aumento en la densidad de tilapias de 4 $\text{kg}\cdot\text{m}^3$ en T2-Rec así como del consumo del alimento proporcionado (Endut et al., 2010). En contraste, lo que pudo ocurrir en T1-Bio fue que, a pesar de las bajas concentraciones de nitritos y nitratos, indican una baja concentración y oxidación del NH_4^+ y quizás la composición del “Biofloc” promovió el desarrollo de bacterias que neutralizaron el amonio (Avnimelech, 2009). De acuerdo con Xu et al., (2016), el balance C: N de 12:1 usado en este trabajo pudo contribuir de manera simultánea a mantener una alta concentración de bacterias heterotróficas que removieron el amoniaco de la columna de agua, también estos autores reportaron que los valores de nitrógeno amoniacal total por debajo de 3.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y un pH

entre 6.5 y 8.5 no resultan peligrosos en piscicultura de aguas templadas.



^z Valores con letras iguales en las líneas de distinto color no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba Tukey ($p \leq 0.05$). ^y C. V. = Coeficiente de variación

Figura 8. Comparación de las concentraciones de amonio, nitritos y nitratos medidos semanalmente en los tratamientos T1-Bio y T2-Rec.

En otro estudio, Megahed (2010) y Xu et al. (2016) demostraron que una proporción C: N de 12: 1 combinado con poca iluminación desarrolló una cantidad importante de bacterias nitrificantes que fueron capaces de mantener bajos niveles de compuestos nitrogenados, situación que sustenta al “Biofloc” como una alternativa para mantener la calidad del agua.

En vista de los resultados obtenidos en esta investigación y con fundamento en los trabajos citados anteriormente, se puede decir que en un sistema de

recirculación simple, existe una estrecha relación entre la superficie de cultivo de plantas, idealmente en una proporción 10:1, es decir, 10 m² de cultivo vegetal por cada metro cúbico de cultivo acuícola (Jiménez-Márquez, 2020), el tipo y la cantidad de filtro biológico (Suhl et al., 2018) y una densidad adecuada de peces puede ir entre 10-15 kg·m⁻³ para cultivos semi intensivos y hasta 25-30 kg·m⁻³ en cultivos de gran escala (Pineda et al., 2018). Respecto a la tecnología de “Biofloc” ajustada a un sistema de acuaponía desacoplada, se puede inferir que la acumulación de bacterias heterótrofas promueve la calidad del agua en el cultivo de peces pues por cada 8 g de bacteria se remueven aproximadamente 0.6 mg·L⁻¹ de NAT y es directamente proporcional a la relación C: N que se aporte al cultivo piscícola, considerando un balance no mayor a 20:1 (Crab et al., 2012). Por consiguiente, sería recomendable evaluar otras fuentes de carbono como harina de sorgo, harina de trigo o almidón, inclusive se podrían usar fuentes orgánicas como hummus, vinagre orgánico, yuca o lechuga acuática (Avnimelech, 2009; Hernández-Mancipe et al., 2019). Se requieren más trabajos de investigación para llegar a sustentar que la tecnología de “Biofloc” ajustada a parámetros de optimización, construcción y manejo de nutrimentos, tiene un efecto positivo en el rendimiento de plantas como lo tiene para el cultivo piscícola y que este tipo de trabajos sean el parteaguas para continuar promoviendo el uso eficiente de recursos naturales y al mismo tiempo generar estándares nutricionales para el cultivo de tilapia y lechuga en sistema de acuaponía desacoplada (Blanchard et al., 2020; Delaide et al., 2016; Suhl et al., 2018).

3.4 CONCLUSIONES

El tratamiento T2-Rec se diferenció en su funcionalidad productiva y se comprobó que la acuaponía convencional con sustrato de tezontle cribado en partículas menores a 1 cm de diámetro permitió el desarrollo y crecimiento de lechuga con un peso fresco promedio de 312.31 g/planta, lo que generó un rendimiento promedio de 18.21 kg·m⁻² con 21 plantas de lechugas cosechadas por metro cuadrado a una densidad de 4 kg·m⁻³ de cultivo de tilapia. En este sistema, la temperatura entre 25 – 27 °C, un pH entre 6.5 y 7.0, conductividad eléctrica arriba

de $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y oxígeno disuelto mayor a $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ son condiciones fisicoquímicas óptimas para mantener en equilibrio los tres componentes biológicos (plantas, peces y microorganismos) y de esta manera los sistemas de recirculación funcionen adecuadamente y se obtengan altos rendimientos de lechuga.

En contraste, el tratamiento T1-Bio generó un rendimiento no satisfactorio en el desarrollo y crecimiento de lechuga, con un peso fresco promedio de 10.73 g/planta , lo que generó un rendimiento promedio de $0.626 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ con 21 plantas de lechuga cosechadas en un metro cuadrado con una densidad de tilapias de $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. La temperatura entre $25 - 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$, pH entre 6.5 y 7.0, conductividad eléctrica arriba de $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y oxígeno disuelto mayor a $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ son condiciones fisicoquímicas óptimas en los sistemas de recirculación.

Además de los beneficios en la producción de lechuga con sistemas de recirculación simple, el enfoque de desacoplar cada componente del sistema permite que cada uno pueda tener condiciones controladas más apropiadas, y al mismo tiempo, se puedan integrar para obtener mejores rendimientos en los cultivos de peces y plantas.

3.5 REFERENCIAS CITADAS

Ansorena, M.J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Mundi-Prensa.

Avnimelech, Y. (2009). *Biofloc technology: a practical guidebook*. World Aquaculture Society.

Ako, H., & Baker, A. (2004). *Nutrient fluxes in aquaponics systems*. Final Report for OW10-301.

Barrientos Llanos, H., del Castillo Gutiérrez, C. R., & García Cárdenas, M. (2015). Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 2(1),

- Bautista Olivas A. L., Fernández D.R., Álvarez Chávez C.R., Sánchez Mexia A.C., Mendoza-Cariño M. & García Cabello K. (2021). Productividad de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en acuaponía e hidroponía. *European Scientific Journal, ESJ*, 17(21), 283.
- Benimeli, M., Plasencia, A., Corbella, R., Andina, D., Sanzano, A., Sosa, F. & Fernández, J. (2019). *El nitrógeno del suelo*. Universidad Nacional de Tucumán.
- Betanzo-Torres, E. A., Marín-Muñiz, J. L., de los Ángeles Piñar-Álvarez, M., Celdrán-Sabater, D., & Mata-Alejandro, H. (2019). Desarrollo de la acuacultura con tecnología biofloc para producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en regiones rurales de México. *Rinderesu*, 4(1-2), 42-58.
- Beverly, R. B., Stark, J. C., Ojala, J. C., & Embleton, T. W. (1984). Nutrient diagnosis of 'valencia' oranges by DRIS. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109(5), 649-654.
- Bonilla Paz, B. L., Montoya Bonilla, B., Gómez, J., & Caja, Álvaro. (2018). Efecto de la Temperatura sobre el Crecimiento de Tilapia (*Oreochromis* sp) en Mamá Lombriz, Vereda Rio Blanco, Popayán, Colombia. *Teknos Revista Científica*, 18(1), 24–30. <https://doi.org/10.25044/25392190.922>
- Blanchard, C., D.E. Wells, J.M. Pickens, & D.M. Blersch. (2020). Effect of pH on cucumber growth and nutrient availability in a decoupled aquaponic system with minimal solids removal. *Horticulturae* 6(1), Article10.
- Blume, H. P., & Brümmer, G. (1991). Prediction of heavy metal behavior in soil by means of simple field tests. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 22(2), 164-174.
- Candarle, P. (2015). *Técnicas de acuaponía*. Centro Nacional de Desarrollo

agrícola, (CENADAC), Dirección de Acuicultura.

Castellanos, J. Z., Uvalle B, J.X. & A. Aguilar S. (2000) *Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP* (2da edición). INTAGRI.

Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356, 351-356.

Cruz-Suárez, L. E., Antimo-Pérez, J. S., Luna-Mendoza, N., Tapia-Salazar, M., Guajardo-Barbosa, C., & Ricque-Marie, D. (2000). *Relaciones proteína/energía y proteína vegetal/animal optimas en alimentos de engorda para Litopenaeus vannamei y L. stylirostris. Avances en Nutrición Acuicola.*

Cockx E. M. & Simonne E. H. (2003). Reduction of the impact of fertilization and irrigation on processes in the nitrogen cycle in vegetable fields with BMPs. *University of Florida Horticultural Sciences Publication*, 9(18), 22-29.

CONAPESCA. (2020). *Anuario estadístico de acuacultura y pesca*. Edición 2020. CONAPESCA.

Dediu, L., Cristea, V., & Xiaoshuan, Z. (2012). Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. *African Journal of Biotechnology*, 11(9), 2349-2358.

Delaide, B., Goddek, S., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Sucriner*) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water*, 8(10), 467.

Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Nik, W. W., & Hassan, A. (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic

system. *Bioresource Technology*, 101(5), 1511-1517.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040>.

Espinosa, R. M. M. (2010). *Avances en el metabolismo del nitrógeno*. Editorial Club Universitario.

FAO. (2016). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura* (2016). Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. FAO.

García-Zertuche, M. F., Sandoval-Rangel, A., Robledo-Torres, V., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., & Cabrera-de la Fuente, M. (2021). Rentabilidad y rendimiento agronómico de lechuga acuapónica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (26), 119-130.

Gómez, J. J. C., Muñoz, R. B., & Rodríguez, M. D. L. H. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19(1), 39-50.

Hernández Mancipe, L. E., Londoño Velez, J. I., Hernández García, K. A., & Torres Hernández, L. C. (2019). Los sistemas biofloc: una estrategia eficiente en la producción acuícola. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 14(1), 70-99.

Ibáñez, A., Castellanos, M., Rodríguez, A., & Álvarez, S. (2017). Influencia de la temperatura, densidad, oxígeno y alimento en la formación de marcas en las escamas de tilapia. *Biología Tropical*, 65(2), 613-622.

Ingle de la Mora, G., Villareal-Delgado, E. L., Arredondo-Figueroa, J. L., Ponce-Palafox, J. T., & Barriga-Sosa, I. D. L. A. (2003). Evaluación de algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación para la acuicultura, sometido a diferentes cargas de biomasa de peces. *Hidrobiológica*, 13(4), 247-253.

IOM. Institute of Medicine. (2011). *Dietary reference intakes for calcium and vitamin D*. The National Academies Press.

- Jiménez Márquez, O. (2020). Acuaponía: Una forma potencial y sustentable de cultivar de manera eficiente y sustentable alimentos. *III Congreso Virtual Internacional Sobre Economía Social y Desarrollo Local Sostenible*. Instituto Tecnológico de Tlaxiaco. Disponible en:
<https://www.eumed.net/actas/20/economia-social/26-acuaponia-una-formapotencial-y-sustentable-de-cultivar.pdf>
- Lennard, W., & Ward, J. (2019). A comparison of plant growth rates between an NFT hydroponic system and an NFT aquaponic system. *Horticulturae*, 5(2), Article 27.
- Lucas, R. E., & Davis, J. (1961). Relationships between pH values of organic soils and availabilities of 12 plant nutrients. *Soil science*, 92(3), 177-182.
- Martínez, M. A. S. (2006). *Manejo del cultivo de tilapia*. BIDEAUSAID.
- Megahed, M. E. (2010). The effect of microbial biofloc on water quality, survival and growth of the green tiger shrimp (*Penaeus semisulcatus*) fed with different crude protein levels. *Journal of the Arabian Aquaculture Society*, 5(2), 119-142.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323.
- Mills, H.A., & Jones, B.J. (1996). *Plant analysis. Handbook II*. Micro Macro Publishing, Inc..
- Modarelli, G. C., Cirillo, C., Vanacore, L., Langellotti, A. L., Masi, P., De Pascale, S., & Roupahel, Y. (2022). Recirculating aquaponics systems: the new era of food production. *Acta Horticulturae*, 1345, 215-220. 10.17660/ActaHortic.2022.1345.29.
- Monsees, H., Suhl, J., Paul, M., Kloas, W., Dannehl, D. & Wuertz, S. (2019).

Lettuce (*Lactuca sativa*, V. Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. *PLoS One*, 14(6), Article e0218368.

Ortiz, J. E., Eraso, H. R. y Ramos, L. M. (2021). Evaluación de variables agronómicas en cultivo de lechuga con sistema de recirculación. *Suelos Ecuatoriales*, 51(1), 37-44.

Palma, R. & Zegarra, J. (2019). Comparativo del rendimiento de tres cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.) empleando solución nutritiva y biol bajo sistema hidropónico NFT en el Fundo “La Banda” Huasacache, Arequipa 2017. 53-56. Universidad Católica de Santa Marta.

<https://core.ac.uk/download/pdf/287059637.pdf>

Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M., and Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquaculture International*, 26(3), 813–842.

<https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>.

Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. *Acta Horticulturae*, (927), 887-893.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>

Pérez-Urrestarazu, L., Lobillo-Eguívar, J., Fernández-Cañero, R., & Fernández-Cabanás, V. M. (2019). Suitability and optimization of FAO's small-scale aquaponics systems for joint production of lettuce (*Lactuca sativa*) and fish (*Carassius auratus*). *Aquacultural Engineering*, 85, 129-137.

Pineda, P. J.; Castillo, G. M.; Morales, C.; Colinas, L. M. T.; Valdez, A. L., & Avitia, G. E. (2008). Efluentes y sustratos en el desarrollo de nochebuena. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(2), 131-137.

- Pineda-Pineda, J., Valdez-Zamora, A., Miranda-Velázquez, I., Rodríguez-Pérez, J. E., Ramírez-Arias, J. A., & Lozano-Toledano, A. (2018). Yield of two cultivars of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in hydroponic and aquaponic systems. *Acta Horticulturae*, 1227, 347-354.
DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.43.
- Quispe, E. W. A., Tapia, M. L., Pezoa, A. B., Laguna, O. T., Gonzales, J. W., & Contreras, V. H. E. (2018). Evaluación de la concentración de nitratos, calidad microbiológica y funcional en lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en los sistemas acuapónico e hidropónico. In *Anales Científicos.*, 79(1), 101-110.
- Sánchez, C. A., Burdine, H. W., Guzman, V. L., & Hall, C. B. (1988). Yield quality and leaf nutrient composition of crisphead lettuce as affected by N, P, and K on histosols. In *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* (Vol. 101, pp. 346-349).
- Savidov, N. (2005). Evaluation and development of aquaponics production and product market capabilities in Alberta. Phase II. Final Report - Project #2004-67905621. 2005 Dec 20; 57p.
- SAS Institute Inc. (2023). *SAS on demand* (2nd edn. Vol. 1, 2, 3, and 4) (Cary, SAS Institute Inc.
- Suhl, J., Dannehl, D., Baganz, D., Schmidt, U., & Kloas, W. (2018). An innovative suction filter device reduces nitrogen loss in double recirculating aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, 82, 63-72.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A. & 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, Roma. <https://doi.org/10.4060/i4021es>

- Sotomayor, R. U., Martínez, A. N. M., Torres, R. G., Morales, R. G., & Murillo, R. N. (2022). Análisis de la producción de crías de tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) en instalaciones acuícolas en México de 2014-2021. *AquaTechnica: Revista Iberoamericana de Acuicultura*, 4(1), 1-6.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2009). *Fisiología vegetal*. Ed. Porto Alegre.
- Timmons, M. B., Ebeling, M. J., & Piedrahita, H. R. (2002). *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Cayuga Aqua Ventures.
- Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Albarado, J. C., Baca-Castillo, G. A., y Tejeda-Sartorius, O. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(5), 863-876.
- USDA. 2019. FoodData Central. <https://fdc.nal.usda.gov/index.html>
- Valenzuela-Antelo, A., Sandoval-Villa, M., Almaraz-Suárez, J. J., Alcántar-González, G., & Bórquez-López, R. (2023). Efecto de la granulometría del tezontle en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) en acuaponía. *Revista Terra Latinoamericana*, 41, Article e1598.
<https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1598>
- Wade, N. L. (1981). Effects of storage atmosphere, temperature and calcium on low-temperature injury of peach fruit. *Scientia Horticulturae*, 15(2), 145-154.
[https://doi.org/10.1016/0304-4238\(81\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0304-4238(81)90102-3).
- Wongkiew, S., Park, M.R., Chandran, K., & Khanal, S.K. (2018). Aquaponic systems for sustainable resource recovery: linking nitrogen transformations to microbial communities. *Environmental Science & Technology*. 52(21), 12728–12739.

PubMed <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04177>.

Yáñez, R. M. (2013). La Acuaponía como alternativa de producción agropecuaria sostenible ¿Una posibilidad para tener en casa?. *REDICINAYSA*, 2(5), 16.

Xu, W. J., Morris, T. C., & Samocha, T. M. (2016). Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. *Aquaculture*, 453, 169-175.