

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**ESTUDIO COMPARATIVO DE UN SISTEMA MIXTO (ACUICULTURA E
HIDROPÓNICO) FRENTE A UN CULTIVO HIDROPÓNICO SIMPLE PARA
LA PRODUCCIÓN DE LECHUGAS**

ÁLVARO IGNACIO GATICA CAMPOS

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

CHILLÁN-CHILE

2024

**ESTUDIO COMPARATIVO DE UN SISTEMA MIXTO (ACUICULTURA E
HIDROPÓNICO) FRENTE A UN CULTIVO HIDROPÓNICO SIMPLE PARA
LA PRODUCCIÓN DE LECHUGAS**

Aprobado por:

Luis Antonio Seminario Salas
Ingeniero en Industrias Alimentarias, Mg.
Profesor Asistente

Profesor Guía

Pedro Miguel Aqueveque Muñoz
Profesor de Biología. Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Margarita Isabel Ocampo Rodríguez
Ingeniero en Alimentos, Dr.
Profesora Asistente

Profesora Asesora

Juan Antonio Cañumir Veas
Ingeniero Agrónomo, PhD.
Profesor Asociado

Director de
Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, PhD.
Profesora Asociada

Decana

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Iván Gatica y Margarita Campos, por estar siempre presentes en mi vida. Gracias por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis metas, por sus valiosas enseñanzas y por haberme criado con los valores que han sido fundamentales para recorrer este camino con determinación y gratitud. También quiero agradecer a mi hermano, Iván Gatica, por su apoyo incondicional y por ser una fuente constante de inspiración y motivación a lo largo de este proceso.

Agradezco de corazón a mis profesores Luis Seminario, Margarita Ocampo, Pedro Aqueveque y Elsa Vega. En especial, al profesor Luis Seminario, quien me orientó durante todo el proceso y me recomendó explorar la Universidad Nacional Agraria La Molina, un lugar que contenía todo lo que anhelaba investigar. Asimismo, a la profesora Elsa Vega, por recibirme, brindarme su apoyo y compartir conmigo sus conocimientos en temas de acuicultura, los cuales fueron esenciales para el desarrollo de esta investigación.

Extiendo mi gratitud a las instituciones que hicieron posible este proyecto. A la Universidad de Concepción, donde realicé mis estudios; a la Universidad Nacional Agraria La Molina, donde desarrollé esta investigación; y al Proyecto UCO1996 del Ministerio de Educación, por financiar mi viaje a Perú para realizar este trabajo. También agradezco a la Facultad de Ingeniería Agrícola por su apoyo en este proceso.

A mis amigos, quiero expresarles mi más sincero agradecimiento por su apoyo constante y por los momentos de risas que hicieron más llevadero mi paso por la universidad. En particular, a Javiera Madariaga, Rodrigo Martínez y Francisca Ruiz, quienes siempre estuvieron allí para brindarme ánimo y compañía en cada etapa de este camino. También a Nicolas Delaporte-Lucas, por estar presente en los momentos más difíciles de mi tesis, ayudándome con la construcción del invernadero y brindándome su apoyo cuando más lo necesité.

Asimismo, quiero agradecer especialmente a Wilfer, técnico del Centro de Investigación Piscícola, por su apoyo y por enseñarme los aspectos prácticos que fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y disposición fueron un gran aporte para alcanzar los objetivos de este trabajo.

Finalmente, quiero dedicar unas palabras a todas las personas que, de alguna manera, formaron parte de este proceso. Este logro me ha enseñado que nunca debemos rendirnos. Con constancia y haciendo las cosas correctamente, todo se puede lograr.

ÍNDICE DE MATERIA

Página

AGRADECIMIENTOS.....	II
ÍNDICE DE MATERIA.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	X
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. HIPÓTESIS.....	6
3. OBJETIVOS.....	6
3.1. Objetivo general.....	6
3.2. Objetivos específicos.....	6
4. ANTECEDENTES GENERALES.....	7
4.1. Sistemas Acuícolas con Recirculación (SAR).....	7
4.2. Requerimientos proteicos para el cultivo de tilapias.....	7
4.3. Requerimientos para el cultivo de lechugas.....	8
4.4. Importancia de los macro y micronutrientes en el cultivo hidropónico de lechuga.....	9
4.5. Ciclo del nitrógeno.....	11
5. METODOLOGÍA.....	13
5.1. Lugar y tiempo de estudio.....	13
5.2. Materiales.....	13
5.2.1. Soluciones hidropónicas.....	14
5.2.2. Selección de especies.....	15
5.2.3. Alimento balanceado.....	16
5.3. Métodos.....	17
5.3.1. Diseño experimental.....	17

5.3.2. Construcción de los sistemas	18
5.4.2. Medición del crecimiento y desarrollo de plantas.	26
5.4.3. Crecimiento y desarrollo de tilapias	27
5.5. Distribución de peces en los estanques	28
5.6. Tasa de supervivencia	28
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
6.1. Desarrollo de las lechugas.....	30
6.2. Supervivencia de las tilapias en el sistema mixto	37
6.4. Número de hojas de las lechugas.....	42
6.5. Calidad de agua.....	45
7. CONCLUSIONES	51
8. BIBLIOGRAFÍA.....	53
9. ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

En el texto	Página
Tabla 1. Requerimiento proteico en diferentes etapas del desarrollo de la tilapia del Nilo.	8
Tabla 2. Requerimientos de macro y micronutrientes sugeridos para el cultivo hidropónico de lechugas.....	9
Tabla 3. Composición Nutricional de CoriPeces.	16
Tabla 4. Métodos asociados a la determinación de parámetros fisicoquímicos del agua.....	23
Tabla 5. Límites de detección y cuantificación de cobre, zinc manganeso y hierro en los análisis de agua.	25
Tabla 6. Dispositivos y frecuencia de mediciones de parámetros físicos y químicos.	26
Tabla 7. Distribución, tasa de supervivencia de los peces en los estanques.	37
Tabla 8. Resultados del ANOVA para la masa de las lechugas.	38
Tabla 9. Cuadro de análisis de la varianza de la masa (SC tipo III).....	38
Tabla 10. Análisis de comparación múltiple de LSD entre semanas para el crecimiento de lechugas en función a la masa.....	39
Tabla 11. Análisis de comparación múltiple de LSD entre tratamientos para el crecimiento de lechugas en función a la masa.....	39
Tabla 12. Análisis de comparación múltiple de LSD entre la interacción de semanas y tratamientos para el crecimiento de lechugas en función de la masa.....	40
Tabla 13. Resultados del ANOVA para el número de hojas de las lechugas.	42
Tabla 14. Cuadro de análisis de la varianza del número de hojas (SC tipo III).	42
Tabla 15. Análisis de comparación múltiple de LSD entre semanas para el crecimiento de lechugas en función del número de hojas.	43
Tabla 16. Análisis de comparación múltiple de LSD entre tratamientos para el crecimiento de lechugas en función del número de hojas.	43
Tabla 17. Análisis de comparación múltiple de LSD entre la interacción de semanas y tratamientos para el crecimiento de lechugas en función del número de hojas.	44

Tabla 18. Evolución de los parámetros fisicoquímico y metales pesados del agua en el tratamiento cultivo hidropónico simple.....	46
Tabla 19. Evolución de los parámetros fisicoquímico y metales pesados del agua en el tratamiento mixto.	47
Tabla 20. Evolución de los parámetros fisicoquímico y metales pesados del agua en el tratamiento control.	49
En el anexo	
Tabla I. Longitud de raíz, número de hojas y masa de las lechugas de las camas hidropónicas de cultivo hidropónico simple a lo largo de las tres semanas.	57
Tabla II. Longitud de raíz, número de hojas y masa de las lechugas de las camas hidropónicas del tratamiento mixto a lo largo de las tres semanas.	58
Tabla III. Longitud de raíz, número de hojas y masa de las lechugas de las camas hidropónicas del control a lo largo de las tres semanas. ...	59

ÍNDICE DE FIGURAS

En el texto	Página
Figura 1. Soluciones hidropónicas A y B para el tratamiento de control.	15
Figura 2. Cama hidropónica con 18 plántulas de lechuga Tropicana.	16
Figura 3. a) Esquema del cultivo mixto y un control y b) Sistema del cultivo mixto y un control.....	18
Figura 4. a) Cubierta de malla Raschel para el tanque y b) Tanque para cultivo de tilapias de Nilo con un tubo de desagüe central de 2”	18
Figura 5. Filtro mecánico de flujo radial para remoción de sólidos con filtración de hasta 100 micras.	20
Figura 6. Tanque de reserva de agua con la bomba sumergible y desagüe de las camas hidropónicas.	21
Figura 7. Compresor de aire del sistema de aireación del sistema mixto.....	22
Figura 8. Rendimiento de la masa de lechugas en función de las semanas en el tratamiento de hidroponía simple. (Datos Tabla I, ANEXOS)....	30
Figura 9. Registro fotográfico de las lechugas por repetición en el tratamiento de control hidropónico simple por semana dónde a), b), c) y d) corresponden a las semanas 0, 1, 2 y 3 respectivamente.....	31
Figura 10. Rendimiento de la masa de lechugas en función de las semanas en el tratamiento mixto.	32
Figura 11. Registro fotográfico de las lechugas por repetición en el tratamiento mixto por semana dónde e), f), g) y h) corresponden a las semanas 0, 1, 2 y 3 respectivamente.....	33
Figura 12. Rendimiento de la masa de lechugas en función de las semanas en el tratamiento control. Datos recopilados de la Tabla III, ANEXOS.	34
Figura 13. Registro fotográfico de las lechugas por repetición en el tratamiento control por semana dónde i), j), k) y l) corresponden a las semanas 0, 1, 2 y 3 respectivamente.....	35
Figura 14. Evolución de la masa promedio de las repeticiones de los cultivos de lechugas con barras de error en los tratamientos: control negativo, mixto y control a lo largo de las semanas.	36

En el anexo

Figura I. Análisis post hoc de LSD para el rendimiento en masa de lechugas en función de los tratamientos y semanas.....	61
Figura II. Análisis post hoc de LSD para el rendimiento en número de hojas en función de los tratamientos y semanas.....	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Página

Ecuación 1. Tasa de supervivencia.....	28
--	----

**ESTUDIO COMPARATIVO DE UN SISTEMA MIXTO (ACUICULTURA E
HIDROPÓNICO) FRENTE A UN CULTIVO HIDROPÓNICO SIMPLE PARA
LA PRODUCCIÓN DE LECHUGAS**

A COMPARATIVE STUDY OF A MIXED SYSTEM (AQUACULTURE AND
HYDROPONICS) VERSUS A SIMPLE HYDROPONIC SYSTEM FOR
LETTUCE PRODUCTION

Palabras clave: Acuicultura, hidroponía, tilapia del Nilo, sostenibilidad.

RESUMEN

Este estudio comparativo tiene como objetivo evaluar la eficiencia de un sistema mixto de acuicultura e hidroponía en comparación con un sistema hidropónico simple en la producción de lechugas (*Lactuca sativa*, var. Tropicana). La metodología consistió en el establecimiento de tres tratamientos: un control hidropónico simple sin nutrientes adicionales, un control con solución nutritiva hidropónica completa y un sistema mixto que combina acuicultura con hidroponía. Las mediciones incluyeron parámetros de crecimiento vegetal, calidad del agua y tasa de supervivencia de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Los resultados evidenciaron que, aunque el sistema mixto mostró mejoras en el crecimiento de biomasa y número de hojas de las lechugas en comparación con el sistema hidropónico simple, su rendimiento fue inferior al del sistema hidropónico con solución nutritiva completa, que promovió un mayor desarrollo vegetal. A pesar de la limitada eficiencia en el aporte de nutrientes del sistema mixto, se logró una tasa de

supervivencia del 100% en las tilapias. La conclusión sugiere que, aunque el sistema mixto presenta potencial, se requieren ajustes adicionales en los nutrientes para alcanzar un balance productivo entre plantas y peces.

A COMPARATIVE STUDY OF A MIXED SYSTEM (AQUACULTURE AND HYDROPONICS) VERSUS A SIMPLE HYDROPONIC SYSTEM FOR LETTUCE PRODUCTION

Keywords: Aquaculture, hydroponic, Nile Tilapia, sustainability.

ABSTRACT

This comparative study aims to evaluate the efficiency of a mixed aquaculture-hydroponic system compared to a simple hydroponic system in lettuce production (*Lactuca sativa*, var. Tropicana). The methodology involved establishing three treatments: a simple hydroponic control without additional nutrients, a control with a complete hydroponic nutrient solution, and a mixed system combining aquaculture with hydroponics. Measurements included plant growth parameters, water quality, and survival rate of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). Results evidenced that, although the mixed system showed improvements in biomass growth and leaf number in lettuce compared to the simple hydroponic system, its performance was lower than that of the hydroponic system with a complete nutrient solution, which promoted greater plant development. Despite the limited nutrient efficiency of the mixed system, a 100% survival rate was achieved in tilapia. The conclusion suggests that, while the mixed system shows potential, further nutrient adjustments are necessary to achieve a productive balance between plants and fish.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema mixto consiste en una integración de acuicultura e hidroponía en el que los desechos de los peces se aprovechan para nutrir las plantas. Este enfoque permite aprovechar los desechos generados en la acuicultura para nutrir el cultivo hidropónico fomentando un ciclo más sostenible (Okomoda et al., 2022). En un sistema acuapónico encontramos un filtro biológico, en el que los desechos generados son aprovechados como nutrientes por las bacterias nitrificantes que transforman el amoníaco en nitritos y simultáneamente en nitratos (Stoyanova et al., 2024).

Ante el crecimiento poblacional previsto, la demanda de alimentos en las próximas décadas se encontrará en una etapa crítica. Por ello, el uso de sistemas de estas características cobra especial relevancia, en vista y considerando la desaparición de tierras agrícolas por el avance urbano, degradación y pérdidas de suelo, incrementado por el cambio climático y prácticas agrícolas insostenibles (Yavuzcan et al., 2017).

Otra característica importante de estos sistemas es el uso de invernaderos como estrategia efectiva, en vista que constituyen espacios controlados que permiten una producción alimentaria intensiva en espacios reducidos donde los parámetros más importantes pueden ser controlados (Obirikorang et al., 2021).

Un aspecto importante de los sistemas acuapónicos es el equilibrio entre la cantidad de desechos producidos por los peces, en función de la alimentación

que reciben, y la capacidad de las plantas para utilizar estos residuos para su crecimiento (Lennard & Goddek, 2019). Asimismo, se debe considerar las concentraciones de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas: los macronutrientes y los micronutrientes. Sin embargo, ocurre que el efluente de los peces no siempre proporciona todos los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas en las cantidades requeridas. Diversas investigaciones, han indicado la necesidad de añadir suplementos al sistema acuapónico, o mediante pulverización foliar para optimizar el crecimiento vegetal (Yavuzcan et al., 2017).

En un entorno donde los desafíos ambientales son cada vez más demandantes, la necesidad de sistemas agrícolas sostenibles se convierte en un imperativo. Estos sistemas buscan armonizar la producción de alimentos con la preservación de los recursos naturales y la mitigación del impacto ambiental. Su importancia radica en la capacidad para promover una agricultura y/o hidroponía responsable y resiliente, para enfrentar los desafíos del cambio climático y la degradación de los distintos elementos que componen el medio ambiente (Barbeau et al., 2015).

2. HIPÓTESIS

Es posible producir lechugas en un sistema mixto de acuicultura e hidroponía más eficiente que el sistema hidropónico simple.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

- Realizar un estudio comparativo de un sistema mixto (de acuicultura e hidroponía), en condiciones controladas, con un sistema hidropónico simple para la producción de lechugas (*Lactuca sativa*, var Tropicana).

3.2. Objetivos específicos

- Evaluar los parámetros de crecimiento de las lechugas en ambos sistemas, para comparar su productividad durante el periodo de estudio.
- Determinar la tasa de supervivencia de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) en el sistema mixto.
- Analizar la variación en la calidad del agua durante el periodo de estudio en el sistema mixto y simple.

4. ANTECEDENTES GENERALES

4.1. Sistemas Acuícolas con Recirculación (SAR)

Los SAR representan una nueva forma de producción acuícola que recicla el agua, optimizando su uso y reduciendo el impacto ambiental. Estos sistemas, generalmente están equipados con componentes esenciales para filtrar partículas sólidas (EUMOFA, 2020). También se pueden integrar dispositivos de intercambio de gases para eliminar el CO₂ o incrementar el oxígeno, uso de radiación UV para desinfectar, técnicas como la ozonización y el desnatado de proteínas para el manejo de sólidos y microorganismos (Martins et al., 2010).

En un SAR, se controlan parámetros como la temperatura, salinidad, pH y oxígeno, manteniendo un ambiente adecuado para el cultivo (Timmons, 2002). Además, los tratamientos de agua, como los filtros mecánicos y biológicos, se utilizan para procesar los residuos generados por los peces, eliminando sustancias inertes y patógenos, lo que promueve un equilibrio sustentable (Metcalf y Eddy Inc., 2013).

4.2. Requerimientos proteicos para el cultivo de tilapias

La tilapia del Nilo necesita diferentes cantidades de proteína en cada etapa de su desarrollo como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Requerimiento proteico en diferentes etapas del desarrollo de la tilapia del Nilo.

Etapa de Desarrollo	Peso (gramos)	Requerimiento de Proteína (%)
Larvas	< 0,02	45-50
Alevines y peces jóvenes	0,02 - 10	35-40
Juveniles	10 - 25	30-35
Etapa de crecimiento	> 25	28-30
Peces reproductores		40-45

Fuente: FAO (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (2022).

4.3. Requerimientos para el cultivo de lechugas

Para el cultivo hidropónico, es relevante considerar los parámetros que influyen directamente en el crecimiento y desarrollo de la lechuga (Graber & Junge, 2009), entre esto se encuentran:

- **Temperatura:** La lechuga prospera en ambientes frescos, con temperaturas óptimas entre 18°C y 22°C; no obstante, temperaturas superiores a 28°C pueden inducir la espigación prematura, lo que deteriora significativamente la calidad y el sabor de las hojas (Thompson et al., 1998).
- **pH:** El pH ideal para el cultivo de lechuga en sistemas acuapónicos es entre 5,5 y 6,5; por lo tanto, mantener el pH en este rango es esencial para una absorción eficiente de nutrientes, prevenir toxicidades y evitar deficiencias nutricionales que puedan afectar el crecimiento y desarrollo de la lechuga (Singh et al., 2019).

Adicionalmente, es recomendado que la solución nutritiva contenga las concentraciones adecuadas de macronutrientes y micronutrientes, como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2. Requerimientos de macro y micronutrientes sugeridos para el cultivo hidropónico de lechugas.

Parámetro	(mg/L)
Fósforo	35
Potasio	210
Calcio	150
Magnesio	45
Hierro	1
B	0,5
Cobre	0,1
Manganeso	0,5
Zinc	1,15
Nitratos	554

Fuente: Penn State Extension. (2024); Valverde, K., Chang M., Rodríguez D.A. (2009).

4.4. Importancia de los macro y micronutrientes en el cultivo hidropónico de lechuga

a) Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente esencial en el cultivo de lechugas, ya que interviene en la formación de aminoácidos y en la síntesis de clorofila, el pigmento responsable del proceso de fotosíntesis en las plantas. Una deficiencia de nitrógeno se manifiesta principalmente como clorosis en las hojas más antiguas, resultado de la redistribución del nutriente hacia las hojas más jóvenes. Este déficit limita el crecimiento de las plantas, provoca el

amarillamiento del follaje y afecta negativamente su salud y productividad (Marschner, 2012).

b) Potasio

El potasio es fundamental para la regulación de la apertura y cierre de los estomas, lo que influye en la transpiración. A su vez, activa numerosas enzimas necesarias en la fotosíntesis en síntesis de proteínas. La deficiencia de potasio se manifiesta como clorosis intervenal y necrosis en los bordes de las hojas más viejas. Además, de un crecimiento reducido y menor resistencia al estrés y a enfermedades (Taiz & Zeiger, 2010).

c) Cobre

El cobre es esencial para diversas enzimas, involucradas en la fotosíntesis, la respiración, el metabolismo de carbohidratos y de proteínas. Su deficiencia puede provocar clorosis en hojas jóvenes, retardo en el crecimiento y una mayor susceptibilidad a enfermedades debido a la reducción en la lignificación de las paredes celulares (Marschner, 2012).

d) Zinc

El zinc, por su parte, es un componente fundamental de muchas enzimas y proteínas, y juega un papel clave en la síntesis de auxinas, hormonas que regulan el crecimiento y la elongación celular. La deficiencia de zinc puede resultar en enanismo, con hojas más pequeñas y entrenudos acortados, así como clorosis intervenal en hojas jóvenes (Alloway, 2008).

e) Manganese

El manganeso es necesario para la fotosíntesis, particularmente en la fotólisis del agua en el fotosistema II. Además, participa en la síntesis de clorofila y en la activación de enzimas. Su deficiencia se manifiesta como clorosis intervenal en las hojas jóvenes, lo que disminuye la capacidad fotosintética y compromete la resistencia de la planta frente a enfermedades (Teixeira et al., 2004).

f) Hierro

El hierro es necesario para las lechugas, ya que participa en procesos como la síntesis de clorofila y el transporte de electrones en la fotosíntesis. La deficiencia de hierro se manifiesta principalmente como clorosis intervenal en las hojas más jóvenes, debido a su baja movilidad en la planta. Esta condición reduce la capacidad fotosintética, afecta el crecimiento y puede comprometer la productividad del cultivo (Briat & Lobreaux, 1997).

4.5. Ciclo del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno constituye un proceso biológico dentro de los sistemas con recirculación, facilitando la conversión de los compuestos nitrogenados tóxicos, derivados de los desechos de los peces, en formas asimilables por las plantas (Rakocy et al., 2006). Este ciclo comprende varias etapas:

a) Amonificación

En los sistemas con recirculación, los residuos orgánicos de los peces y el alimento no consumido se descomponen bioquímicamente, liberando amoníaco (NH_3). Dada su toxicidad en concentraciones elevadas para los peces, su transformación es esencial para la salud del sistema (Endut et al., 2013).

b) Nitrificación

En este proceso se lleva a cabo en dos fases por bacterias nitrificantes:

- **Primera Fase:** Bacterias del género *Nitrosomonas* oxidan el amoníaco para formar nitrito (NO_2^-), aunque menos tóxico que el amoníaco, sigue siendo peligroso para la vida acuática en altas concentraciones (Goddek et al., 2015).
- **Segunda Fase:** Bacterias del género *Nitrobacter* convierten el nitrito en nitrato (NO_3^-), un compuesto mucho menos tóxico y una fuente de nitrógeno utilizable por las plantas (Goddek et al., 2015).

c) Asimilación

Las plantas absorben estos nitratos del medio y los utilizan en sus procesos metabólicos para crecer y desarrollarse. Este paso no sólo suministra nutrientes esenciales para las plantas, sino que también purifica el agua, de vuelta a los tanques de peces (Lennard & Leonard, 2006).

5. METODOLOGÍA

5.1. Lugar y tiempo de estudio

El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigación Piscícola (CINPIS), perteneciente a la Facultad de Pesquería, de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Este centro está ubicado en el distrito de La Molina, Lima, Perú. Contempló un total de 6 semanas de muestreo, distribuidos equitativamente en dos periodos de 3 semanas cada uno.

5.2. Materiales

- Tanques de cultivo de tilapias de dimensiones 0,98 m x 0,8 m x 0,42 m.
- Filtros mecánicos de polietileno con capacidad de 30 L.
- Camas hidropónicas de madera, cubiertas con nylon impermeable de dimensiones 1,35 m x 1 m x 0,3 m con 0,5 mm de espesor.
- Tubos, uniones y válvulas esféricas de PVC con diámetros ½", ¾" y 2" para uso de agua fría.
- Canastillas hidropónicas de polietileno Hydro Roots de 5,5 cm de alto y ancho.
- Bomba sumergible JINGYE 105 con máximo caudal de 4000 L/h y potencia de 60 W.
- Compresor de aire SUNSUN ACO-003.
- Manguera difusora de aire de 4 y 6 mm de diámetro interno y externo respectivamente.
- Válvulas de control de aire de polipropileno.
- Agua potable comprada para el sistema.
- Oxímetro YSI 550A.
- Multiparameter Tester OAKTON® WD-35634-35.
- Kit de medición SALIFERT TEST KIT.

- Kit de medición API® FRESHWATER MASTER TEST KIT.
- Balanza Ohaus Scout Pro SP 2001 de capacidad 2000 g y sensibilidad de 0,1 g.
- Guantes de protección SHOWA 377 de nitrilo.
- Tanque de reserva de polietileno.
- Ictiómetro Krausshenke KH PISCIS de 60 cm con sensibilidad de 0,5 cm.
- Soluciones hidropónicas provenientes del Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral (CIHNM) de la UNALM.
- Tilapias de Nilo provenientes del CINPIS de la UNALM.
- Plántulas de lechuga Tropicana provenientes del CIHNM de la UNALM.
- Alimento balanceado Corina Alimentos CoriPeces.

5.2.1. Soluciones hidropónicas

- **Solución hidropónica A**

La solución A está formulada por una mezcla de nitrato de potasio (KNO_3), nitrato de amonio (NH_4NO_3) y superfosfato triple de calcio [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] (Figura 1).

- **Solución hidropónica B**

La solución B está compuesta por sulfato de magnesio (MgSO_4) y una mezcla de micronutrientes esenciales, que incluyen hierro (Fe), boro (B), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo) y cloro (Cl).



Figura 1. Soluciones hidropónicas A y B para el tratamiento de control.

5.2.2. Selección de especies

a) Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*)

Se seleccionaron específicamente tilapias juveniles, todos provenientes de la misma cohorte y de sexo masculino, confirmados mediante la revisión manual de las papilas genitales para asegurar su género. Los individuos presentaron una talla homogénea, con longitudes comprendidas entre 17 y 21 cm. Asimismo, se verificó que cada tilapia tuviera aletas intactas, piel sin lesiones visibles y un comportamiento activo.

b) Lechuga (*Lactuca sativa*, var. *Tropicana*)

- **Características y distribución de las lechugas**

La lechuga *Tropicana* es una variedad especial para sistemas hidropónicos. Las plántulas tenían dos semanas de edad y un tamaño promedio de 5 cm al momento del trasplante. La distribución es 18 plántulas por cama hidropónica con 5 columnas y 20 cm de separación entre cada plántula como se aprecia en la Figura 2.



Figura 2. Cama hidropónica con 18 plántulas de lechuga Tropicana.

5.2.3. Alimento balanceado

Se utilizó un alimento balanceado llamado CoriPeces, el cual proporciona los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo adecuado de los peces.

La composición nutricional de este alimento está diseñada para cumplir con los requerimientos básicos de proteína, grasa y fibra de las especies en cultivo.

En la Tabla 3, se presenta la composición nutricional de CoriPeces:

Tabla 3. Composición Nutricional de CoriPeces.

Nutriente	%
Proteína (Mín)	28
Grasa (Mín)	5
Fibra (Máx)	6
Humedad (Máx)	10
Ceniza (Máx)	10

Fuente: Corina Alimentos. *Composición Nutricional CoriPeces*. Información obtenida de la página web oficial de Corina Alimentos (<https://www.corina.com.pe>).

La inclusión de valores mínimos para nutrientes como proteína y grasa garantiza que el alimento contenga al menos la cantidad necesaria para cubrir los requerimientos básicos de los peces, lo que es crucial para su crecimiento, mantenimiento de tejidos y funciones metabólicas. Por otro lado, los valores

máximos para componentes como fibra, humedad y ceniza limitan la presencia de elementos menos deseables, evitando que excedan niveles que puedan afectar la digestibilidad, la eficiencia alimenticia o la salud de los peces.

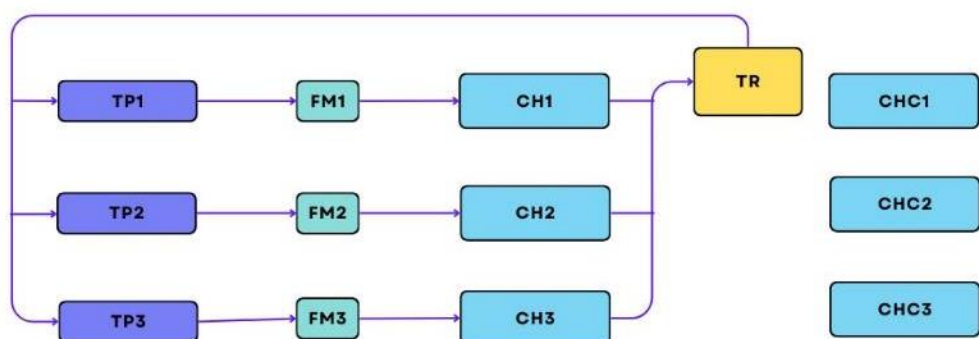
5.3. Métodos

5.3.1. Diseño experimental

Este estudio comprende tres tratamientos; un control hidropónico simple (sólo con agua), un control (con solución hidropónica) y el tratamiento sistema mixto.

- **Estructura esquemática del diseño experimental**

Los tratamientos se realizaron en un invernadero provisto de malla Raschel, sombreado del 30%. Cada sistema estuvo compuesto por: depósito para el cultivo acuícola, seguido de filtro mecánico de flujo radial, instalación hidropónica y depósito común dónde convergen los tres sistemas (Figura 3).



a)

TP1, TP2, TP3: Tanques de cultivos de peces,
FM1, FM2, FM3: Filtros mecánicos,
CH1, CH2, CH3: Camas hidropónicas,
TR: Tanque de reserva de agua,
CHC1, CHC2, CHC3: Camas hidropónicas de control.



b)

Figura 3. a) Esquema del cultivo mixto y un control y b) Sistema del cultivo mixto y un control.

5.3.2. Construcción de los sistemas

a) Preparación de los tanques de cultivo de peces

Cada tanque, fabricado en cemento asbesto y revestido con pintura epóxica con una capacidad de 329 L. Estos tanques fueron cubiertos de malla Raschel (Figura 4a), para prevenir el escape de los peces. El efluente es dirigido al filtro mecánico por el desagüe central como se observa en la Figura 4b.



a)

b)

Figura 4. a) Cubierta de malla Raschel para el tanque y b) Tanque para cultivo de tilapias de Nilo con un tubo de desagüe central de 2".

- **Preparación inicial**

Antes de introducir los peces, los tanques se limpian con una solución desinfectante de cloro para eliminar posibles contaminantes microbiológicos y químicos. Posteriormente, los tanques se enjuagan con agua potable para la eliminación completa del desinfectante. Una vez limpios, los tanques se llenan con agua potable y se instalan los sistemas de aireación y filtración, que se mantienen en funcionamiento durante 48 horas para estabilizar los parámetros fisicoquímicos del agua y crear un entorno óptimo para la introducción de los peces.

b) Operación y mantenimiento de filtros mecánicos

Los filtros mecánicos poseen una capacidad de 30 L y fueron diseñados para la remoción de sólidos de los efluentes. Cada filtro está compuesto de un colador de plástico en la parte superior, que retiene partículas grandes, y un filtro de esponja, que captura partículas más finas (Figura 5). Después de pasar por estos elementos de filtración, el efluente fluye a través de una tubería de $\frac{3}{4}$ " hacia las camas hidropónicas.



Figura 5. Filtro mecánico de flujo radial para remoción de sólidos con filtración de hasta 100 micras.

Los filtros mecánicos requieren limpieza diaria para asegurar su eficiencia. Los principales componentes que los ensucian son el excremento de los peces y el alimento no consumido. El proceso de mantenimiento incluye la extracción y lavado del filtro con agua potable, evitando así que se obstruya.

c) Camas hidropónicas

Las camas hidropónicas, con una capacidad de 405 litros, se emplean tanto en los tratamientos de control, como en el sistema mixto. Cada cama está equipada con un techo de polipropileno de 1,35 m² de área y 1,2 mm de espesor, sobre el cual se colocan 18 canastillas hidropónicas.

En el sistema mixto, los efluentes se conducen a través de tuberías de $\frac{3}{4}$ " que se conectan a un tubo de 2", terminando en el tanque de reserva. En los tratamientos de hidroponía simple y con solución nutritiva, cada sistema se maneja de manera independiente para asegurar resultados comparativos.

d) Tanque de reserva de agua

El tanque de reserva, con una capacidad de 120 litros, está equipado con una bomba sumergible, como se muestra en la Figura 6. Esta bomba recircula el efluente de vuelta a los tanques de cultivo de tilapias. El flujo se controla mediante válvulas esféricas ajustables para mantener un caudal constante de 62 litros por hora, el cual se verifica y regula periódicamente cada 2 días para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema.



Figura 6. Tanque de reserva de agua con la bomba sumergible y desagüe de las camas hidropónicas.

e) Sistema de aireación

El sistema de aireación lo compone un compresor de aire (Figura 7), que suministra oxígeno por mangueras conectadas a piedras difusoras reguladas con válvulas de control. En el sistema mixto se utilizan 10 piedras difusoras, ubicadas en el centro de los estanques de peces, las camas hidropónicas y el tanque de reserva. En los tratamientos de hidroponía simple y con solución nutritiva, se emplea una piedra difusora por cama hidropónica.

La oxigenación se verifica 2 veces por semana con un oxímetro para mantener 5,5 mg/L en los tanques y en las camas hidropónicas del sistema mixto y los tratamientos de control.

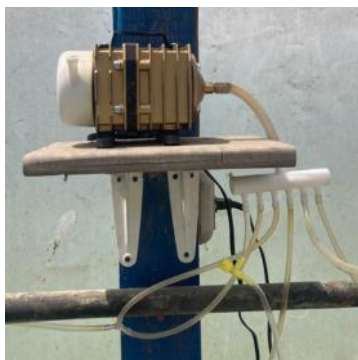


Figura 7. Compresor de aire del sistema de aireación del sistema mixto.

5.4. Análisis del agua

El análisis del agua se efectuó en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas, y Fertilizantes (LASPAF) de la UNALM. Para ello, se implementaron metodologías analíticas estandarizadas, descritas en la Tabla 4, conforme a los protocolos establecidos, con el objetivo de asegurar la reproducibilidad, exactitud y precisión de los resultados obtenidos.

Tabla 4. Métodos asociados a la determinación de parámetros fisicoquímicos del agua.

Parámetro	Método de Medición	Metodología
pH	Método EPA 150.1	Mediante un potenciómetro calibrado con soluciones tampón de pH 4,0, 7,0 y 10,0.
Conductividad eléctrica	Método APHA 2510-B	Mediante un conductímetro calibrado con una solución de cloruro de potasio a 0,01 M, la cual tiene una conductividad de 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C.
Potasio	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 766,5 nm. La muestra se diluye según sea necesario para mantener la concentración en el rango de detección (1-10 mg/L).
Calcio	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 422,7 nm.
Magnesio	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 285,2 nm.
Sodio	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 589,0 nm. La muestra puede requerir dilución previa.
Nitratos	Método ISO 7890-3	Se añade ácido salicílico a la muestra en medio alcalino, formando un complejo amarillo que se mide a 410,0 nm en espectrofotómetro.
Carbonatos	Método APHA 2320-B	Se titula la muestra con una solución de ácido sulfúrico 0,02 N, usando fenolftaleína como indicador. La desaparición del color rosa indica el punto final.
Bicarbonatos	Método APHA 2320-B	Se realiza la titulación con ácido sulfúrico 0,02 N, usando anaranjado de metilo como indicador. El punto final se alcanza al cambio de color a naranja.

Continuación tabla anterior.

Sulfatos	Método APHA 4500-SO ₄ ²⁻ D	Se añade cloruro de bario a la muestra, formando una suspensión turbia. La turbidez se mide en un espectrofotómetro a 420,0 nm.
Cloruros	Método APHA 4500-Cl ⁻ B	Se titula la muestra con nitrato de plata 0,0141 N, usando cromato de potasio como indicador. El punto final es la aparición de un precipitado rojo.
Hierro	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 248,3 nm. La muestra se acidifica añadiendo 1 mL de HNO ₃ concentrado por cada 100 mL de muestra.
Cobre	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 324,8 nm. La muestra se acidifica previamente.
Zinc	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 213,9 nm.
Manganeso	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 279,5 nm.
Boro	Método APHA 4500-B B	Mediante una solución de curcumina en ácido acético glacial, formando un complejo coloreado con el boro, y se mide en un espectrofotómetro a 540,0 nm.
Plomo	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 283,3 nm. La muestra se acidifica previamente.
Cadmio	Método APHA 3111-B	Mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando una longitud de onda de 228,8 nm. La muestra se acidifica previamente.

Fuente: Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1973).

Los valores reportados para estos metales están sujetos a los límites de detección y cuantificación, definidos como L.D. (límite de detección) y L.C. (límite de cuantificación), como se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Límites de detección y cuantificación de cobre, zinc manganeso y hierro en los análisis de agua.

Parámetro	L.D. (ppm)	L.C. (ppm)
Cobre	0,00884	0,02945
Zinc	0,00084	0,00280
Manganeso	0,00894	0,02980
Hierro	0,02995	0,09983

Fuente: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes de la UNALM.

Los valores que no alcanzaron el límite de detección se han indicado como “N.D.” (no detectable).

El análisis del agua se realiza en tres momentos: al inicio de cada etapa (Día 0), a la mitad (Día 14), y al final (Día 28).

- **Monitoreo de parámetros fisicoquímicos en los estanques de peces**

Se realizaron mediciones de los parámetros fisicoquímicos del agua (pH, conductividad eléctrica, concentraciones de nutrientes y metales pesados). En principio, todo esto es para garantizar la calidad del agua y el medio en el que crecen los peces. Las mediciones de los parámetros se realizaron utilizando dispositivos específicos y con la frecuencia indicada en la siguiente tabla:

Tabla 6. Dispositivos y frecuencia de mediciones de parámetros físicos y químicos.

Parámetro	Frecuencia	Dispositivo o kit de medición
Temperatura (°C)	Diariamente a las 9:00 a.m. y a las 2:00 p.m.	OAKTON® WD-35634-35
Oxígeno disuelto (mg/L)	Dos veces por semana a las 10 a.m.	Oxímetro YSI 550A
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Diariamente a las 9:00 a.m.	OAKTON® WD-35634-35
Alcalinidad total (mgCaCO ₃ /L)	Dos veces por semana a las 10 a.m.	SALIFERT TEST KIT (KH/ALK)
Dureza total (mgCaCO ₃ /L)	Dos veces por semana a las 10 a.m.	SALIFERT TEST KIT (KH/ALK)
Nitrógeno amoniacal total (NAT) (mg/L)	Dos veces por semana a las 10 a.m.	API® FRESHWATER MASTER TEST KIT
Nitritos (N-NO ₂) (mg/L)	Dos veces por semana a las 10 a.m.	API® FRESHWATER MASTER TEST KIT
Nitratos (N-NO ₃) (mg/L)	Dos veces por semana a las 10 a.m.	API® FRESHWATER MASTER TEST KIT

Fuente: Elaboración propia.

El propósito de la frecuencia era la identificación temprana de posibles problemas y la toma de decisiones pertinentes para el mantenimiento del sistema.

5.4.2. Medición del crecimiento y desarrollo de plantas.

El crecimiento de las lechugas fue evaluado según la metodología planteada por Guerrero et al. (2014). Primero, se determinó la masa fresca total de las plantas, estas secadas con papel absorbente para eliminar el exceso de humedad superficial y luego masadas utilizando una balanza de precisión. En segundo lugar, se midió la longitud de las raíces con un ictiómetro, permitiendo

obtener datos precisos sobre el desarrollo radicular. Por último, se contabilizó el número total de hojas por cabeza de lechuga en cada planta.

A lo largo del experimento se realizaron cuatro mediciones: al inicio, en dos puntos intermedios (cada semana) y al final. Se seleccionaron aleatoriamente una muestra de 5 plantas de cada cama hidropónica. Además, en cada punto de medición se realizó un registro fotográfico para documentar visualmente el desarrollo y estado de las lechugas a lo largo del tiempo.

5.4.3. Crecimiento y desarrollo de tilapias

Para evaluar el crecimiento y desarrollo de las tilapias, se midieron tres parámetros. La talla de los peces fue determinada utilizando un ictiómetro, lo que permitió su distribución. La masa de los peces se determinó con una balanza de precisión. Además, se registró la tasa de mortalidad con el objetivo de reponer los peces fallecidos con ejemplares de peso similar, a fin de mantener la consistencia.

- **Frecuencia**

Las mediciones se realizaron en cuatro ocasiones a lo largo del experimento: al inicio, en dos puntos intermedios (cada semana) y al final. Se seleccionaron aleatoriamente una muestra de 5 peces de cada tanque de cultivo, para minimizar el estrés en los peces y evitar posibles alteraciones en su comportamiento debido a una manipulación frecuente.

5.5. Distribución de peces en los estanques

Los 52 peces utilizados en el experimento fueron distribuidos en tres tanques con el objetivo de minimizar el estrés causado por la competencia por recursos entre individuos de diferentes tamaños. En el primer tanque se colocaron 17 peces, en el segundo 13 peces, y en el tercero 22 peces, manteniendo una biomasa inicial de 2 kg por tanque. La capacidad de carga de cada tanque fue de 6 kg/m³, lo que aseguró un ambiente adecuado para el desarrollo de los peces sin comprometer su bienestar.

5.6. Tasa de supervivencia

Según Boyd (1990), la tasa de supervivencia (S) se puede calcular con la ecuación 1.

$$S(\%) = \frac{\text{Número final de peces}}{\text{Número inicial de peces}} \cdot 100 \quad [1]$$

El análisis de datos en este estudio tuvo como objetivo identificar las diferencias significativas entre los tres tratamientos evaluados (control, mixto y control negativo) en relación con la masa y el número de hojas de las lechugas. Para ello, se empleó un diseño completamente aleatorizado, considerando tres tratamientos con tres réplicas cada uno. El análisis estadístico se realizó mediante un ANOVA de una vía para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables respuesta. Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple LSD (Least Significant Difference) para identificar diferencias específicas entre los tratamientos.

Los datos fueron procesados utilizando los software Excel e InfoStat versión 2020e. Se estableció un nivel de significancia estadística de $p < 0,05$, lo que permitió evaluar de manera confiable la influencia de los tratamientos en las variables estudiadas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Desarrollo de las lechugas

- **Tratamiento hidroponía simple**

La masa de las lechugas mostró un crecimiento limitado con el paso de las semanas (Figura 8). Aunque hubo un ligero incremento inicial, entre las semanas 2 y 3 prácticamente no se observó variación en la masa, lo que indica una limitación en el desarrollo debido a la falta de nutrientes disponibles en el sistema.

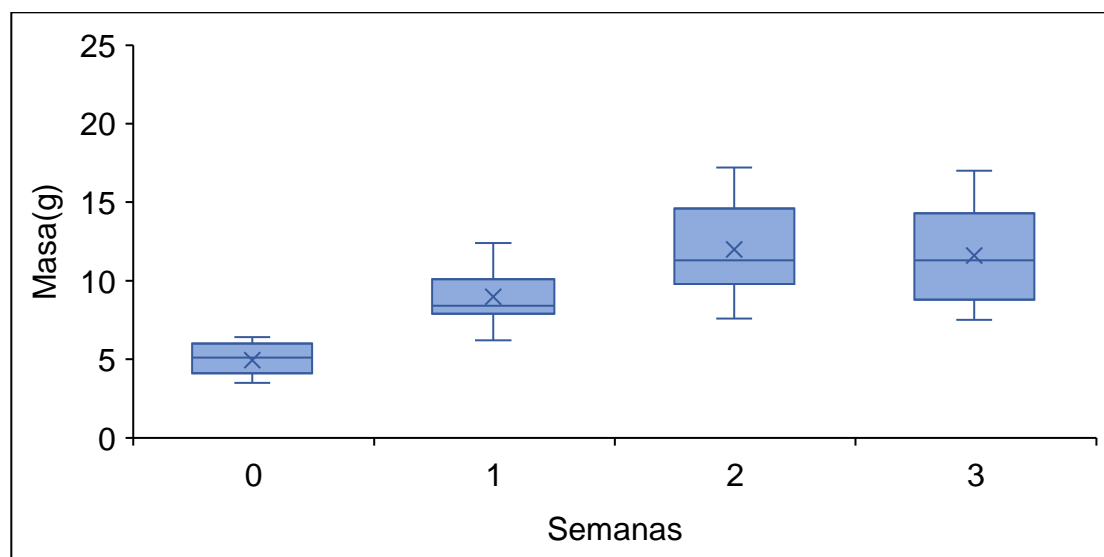


Figura 8. Rendimiento de la masa de lechugas en función de las semanas en el tratamiento de hidroponía simple (Datos Tabla I, ANEXOS).

En la Figura 9, se observa que las lechugas presentaron un crecimiento limitado y con signos visibles de estrés, como el amarillamiento de las hojas y

la escasa biomasa. Este tratamiento, que carece de nutrientes adicionales, resultó en un bajo desarrollo de las plantas.

- **Registro fotográfico**

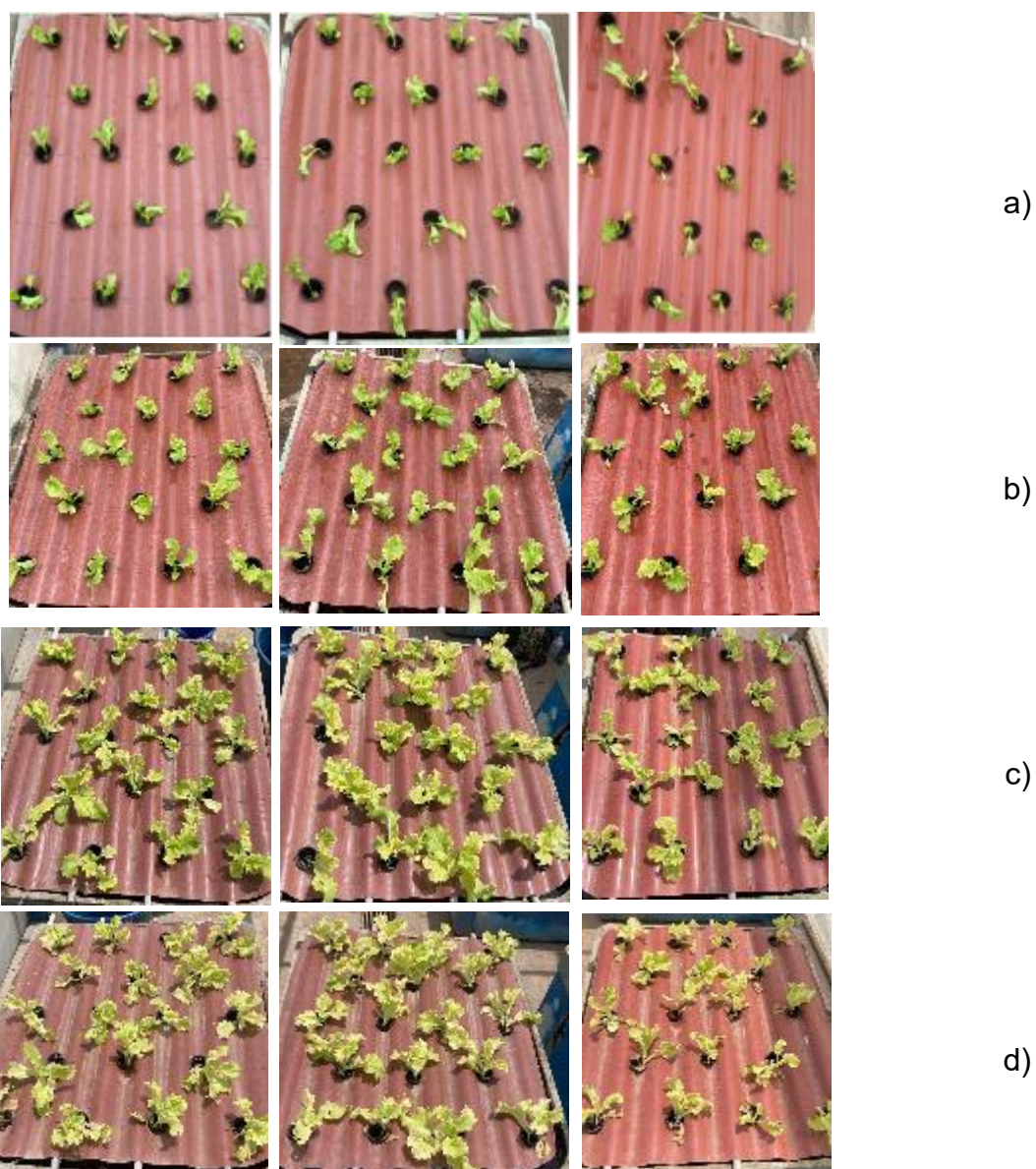


Figura 9. Registro fotográfico de las lechugas por repetición en el tratamiento de control hidropónico simple por semana dónde a), b), c) y d) corresponden a las semanas 0, 1, 2 y 3 respectivamente.

- **Tratamiento mixto**

El análisis del tratamiento mixto revela un incremento en el crecimiento de la masa vegetal, especialmente a partir de la semana 2 (Figura 10). Este aumento en rendimiento se correlaciona con los niveles de nutrientes en el agua, como calcio, magnesio, potasio, nitratos, cloruros y boro, los cuales muestran un leve incremento a lo largo del estudio. La acumulación gradual de estos nutrientes, provenientes de la acuicultura, parece compensar parcialmente las deficiencias observadas en el cultivo hidropónico simple.

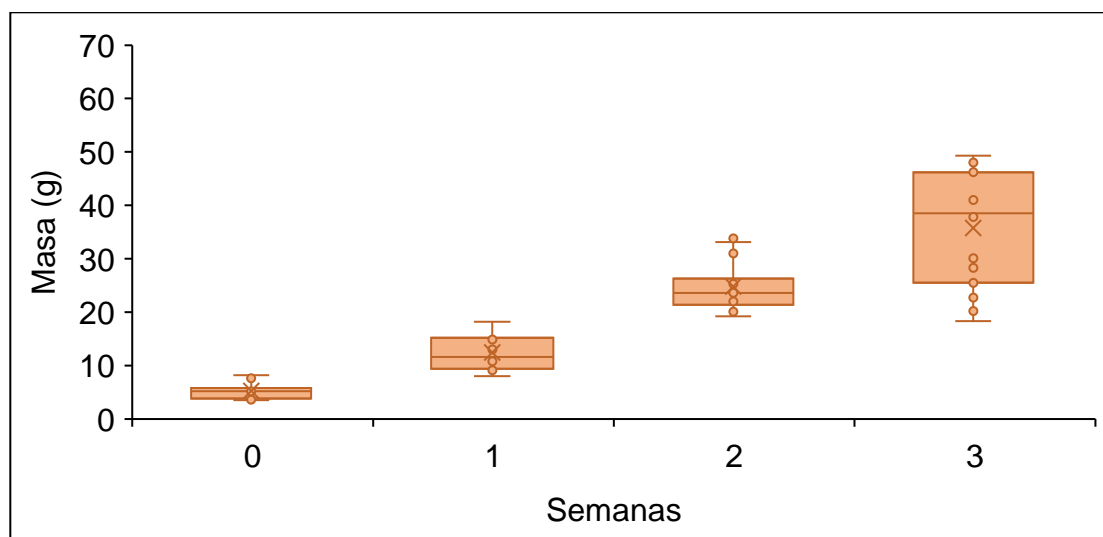


Figura 10. Rendimiento de la masa de lechugas en función de las semanas en el tratamiento mixto (Datos Tabla II, ANEXOS).

Las lechugas bajo el tratamiento mixto (Figura 11) muestran un crecimiento moderado. Aunque hubo un incremento en el tamaño a lo largo de las semanas, igualmente presentaron crecimiento limitado y pérdida de pigmentos de clorofila.

- Registro fotográfico

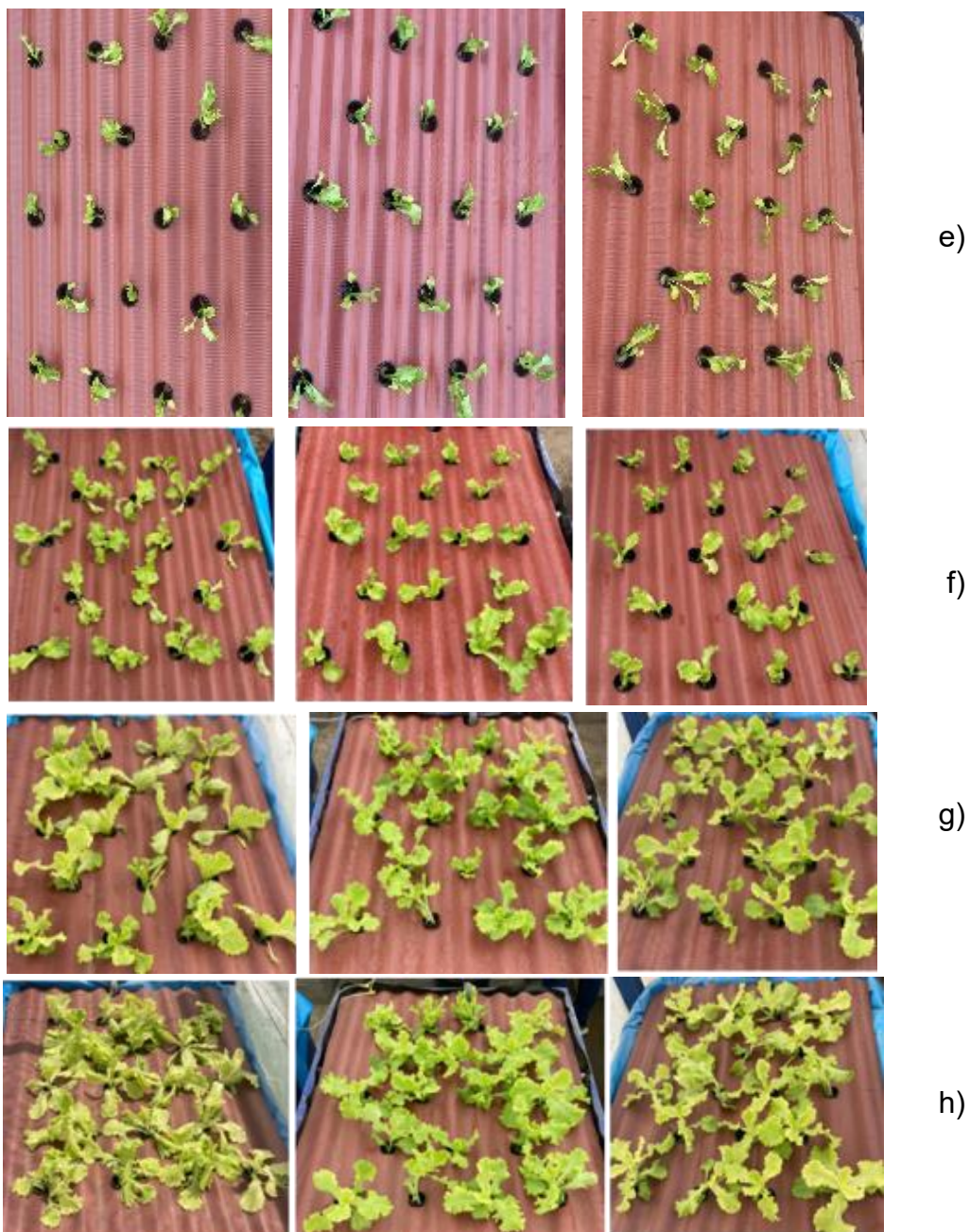


Figura 11. Registro fotográfico de las lechugas por repetición en el tratamiento mixto por semana dónde e), f), g) y h) corresponden a las semanas 0, 1, 2 y 3 respectivamente.

- **Tratamiento control**

El tratamiento control demostró la mayor eficiencia en términos de acumulación de biomasa promedio (Figura 12). La masa de las lechugas en la semana 3, comparada con la de otros tratamientos, destaca la superioridad del sistema hidropónico con los nutrientes necesarios para optimizar el crecimiento vegetal.

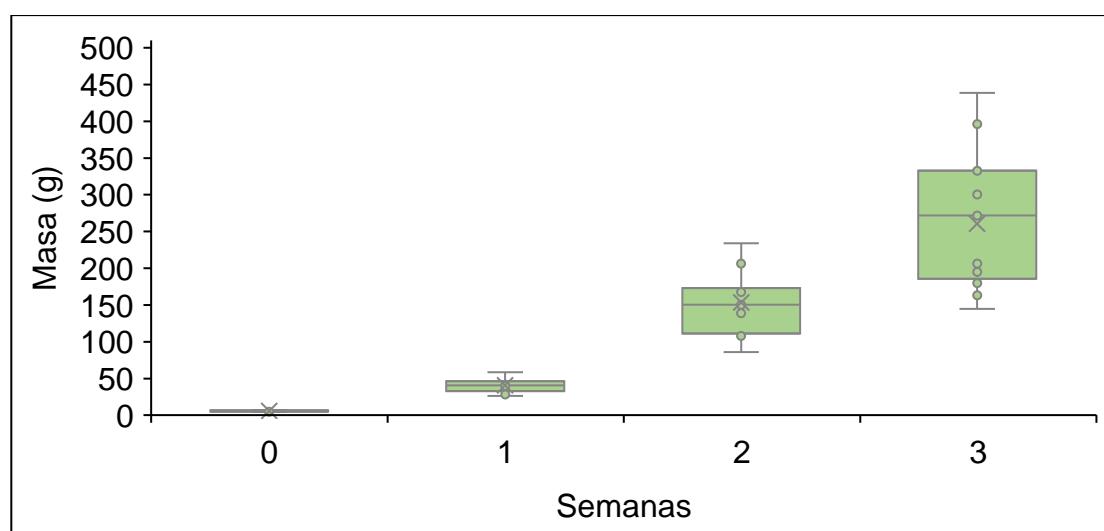


Figura 12. Rendimiento de la masa de lechugas en función de las semanas en el tratamiento control (Datos Tabla III, ANEXOS).

En el tratamiento control (Figura 13), que incluye una solución nutritiva completa, demuestra ser efectivo para el cultivo hidropónico de lechugas. Las diferencias en el color, tamaño y densidad de las hojas son evidentes al comparar las imágenes de este tratamiento con las de los otros dos tratamientos.

- Registro fotográfico

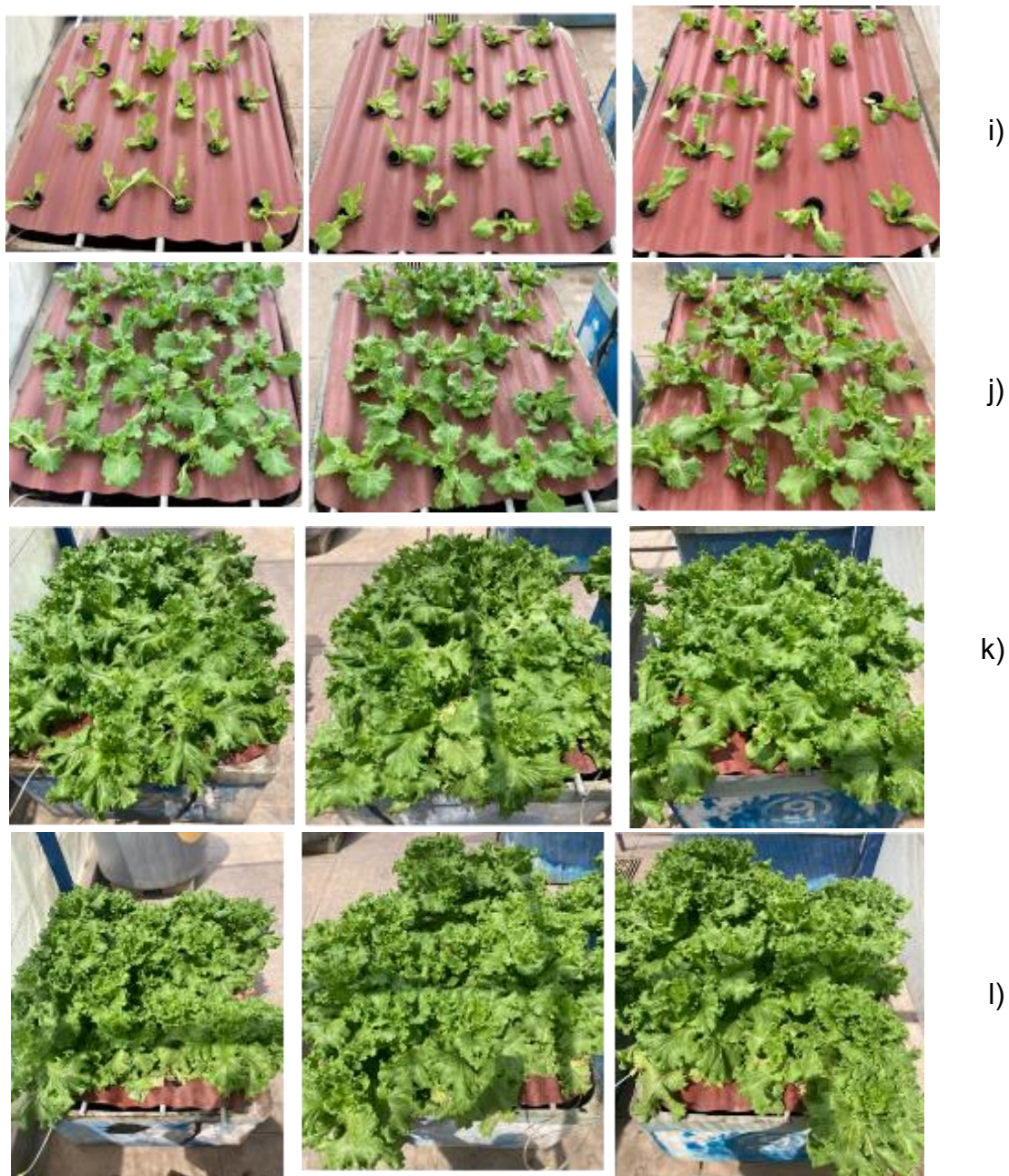


Figura 13. Registro fotográfico de las lechugas por repetición en el tratamiento control por semana dónde i), j), k) y l) corresponden a las semanas 0, 1, 2 y 3 respectivamente.

La evolución del rendimiento en masa de las lechugas a lo largo de las semanas en los tres tratamientos evaluados: cultivo hidropónico simple (control negativo), mixto y control. Los datos se expresan en términos de masa promedio y del error estándar correspondiente, como se presenta en la Figura 14.

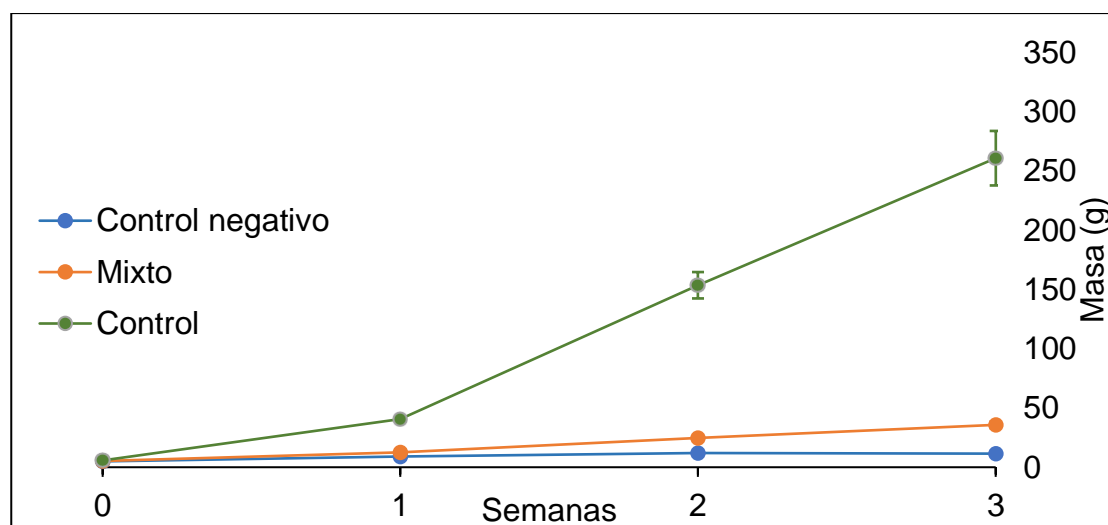


Figura 14. Evolución de la masa promedio de las repeticiones de los cultivos de lechugas con barras de error en los tratamientos: control negativo, mixto y control a lo largo de las semanas.

Desde la primera semana, se comienza a observar una diferencia entre el tratamiento mixto respecto del control, la cual se incrementa con el paso de las semanas. Esto sugiere que el cultivo mixto no ofrece los nutrientes necesarios para el crecimiento adecuado de las lechugas y muestra un comportamiento más cercano al control negativo, característico de una situación de inanición.

6.2. Supervivencia de las tilapias en el sistema mixto

Los resultados indican una tasa de supervivencia del 100% en todas las repeticiones, lo que refleja la efectividad del sistema mixto para proporcionar un ambiente óptimo que garantiza la viabilidad de las tilapias.

Tabla 7. Distribución, tasa de supervivencia de los peces en los estanques.

Repetición	Número de peces				Tasa de supervivencia (%)
	Semana 0	Semana 1	Semana 2	Semana 3	
1	17	17	17	17	100
2	13	13	13	13	100
3	22	22	22	22	100

Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, la agrupación de los peces por talla dentro de los estanques minimizó el estrés asociado a la competencia por recursos, como alimento y espacio, que podría ocurrir entre individuos de diferentes tamaños. Además, el mantenimiento de una buena calidad del agua, con niveles adecuados de oxígeno y un manejo cuidadoso de la alimentación, contribuyó a garantizar condiciones ambientales favorables para los peces. Las tasas de supervivencia obtenidas en el sistema mixto son consistentes con estudios previos de Shamsuddin et al. (2022), quienes reportan una tasa de supervivencia del $97,00 \pm 0,42\%$ en un sistema similar.

6.3. Masa de las lechugas

El análisis de varianza (ANOVA) para la masa de las lechugas revela que tanto las semanas como los tratamientos, además de su interacción, tienen un efecto significativo en la masa de las lechugas (Tabla 8 y Tabla 9). Esto indica que las diferencias observadas en el crecimiento están influenciadas por el paso del tiempo y las condiciones específicas de cada tratamiento.

Tabla 8. Resultados del ANOVA para la masa de las lechugas.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Masa (g)	180	0,88	0,87	60,18

Tabla 9. Cuadro de análisis de la varianza de la masa (SC III).

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1020296,76	11	92754,25	110,97	<0,0001
Semana	260897,82	3	86965,94	244,59	<0,0001
Tratamiento	408884,01	2	204442,01	104,05	<0,0001
Semana*Tratamiento	350514,93	6	58419,16	69,89	<0,0001
Error	140422,28	168	835,85		
Total	1160719,04	179			

- **Desarrollo semanal**

El efecto del tiempo en el crecimiento de las lechugas mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$). Como se observa en la Tabla 10, las lechugas experimentaron un aumento progresivo en la masa a medida que avanzaban las semanas. En la primera semana, el peso promedio fue de 20,71 g, mientras que al final del período de evaluación (semana 3), alcanzó 102,71 g. Este resultado es coherente con el desarrollo esperado de las lechugas, ya que su biomasa naturalmente incrementa a lo largo del ciclo de crecimiento.

Tabla 10. Análisis de comparación múltiple de LSD entre semanas para el crecimiento de lechugas en función a la masa.

Semana	Medias	n	E.E.	
0	5,32	45	4,31	D
1	20,71	45	4,31	C
2	63,44	45	4,31	B
3	102,71	45	4,31	A

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos.

- **Efecto del tratamiento**

Los tratamientos aplicados también revelaron diferencias significativas en la masa de las lechugas (Tabla 11). El tratamiento con solución hidropónica presentó el mayor incremento en la biomasa, con una media de 115,19 g, mientras que el sistema mixto y el control negativo alcanzaron pesos promedio de 19,56 g y 9,38 g, respectivamente. Aunque el sistema mixto mostró un ligero incremento en comparación con el control negativo, las diferencias entre ambos no fueron significativas. Esto sugiere que el sistema mixto no logró proporcionar nutrientes suficientes para satisfacer las necesidades de crecimiento de las lechugas, mostrando un rendimiento limitado similar al del control negativo.

Tabla 11. Análisis de comparación múltiple de LSD entre tratamientos para el crecimiento de lechugas en función a la masa.

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Control negativo	9,38	60	3,73	B
Mixto	19,56	60	3,73	B
Control	115,19	60	3,73	A

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos.

- **Efecto de la interacción de semana y tratamiento en la masa**

La interacción entre las semanas y los tratamientos permitió observar diferencias específicas en el crecimiento de las lechugas (Tabla 12). Durante las primeras dos semanas, no hubo diferencias significativas en la masa de las lechugas entre los tratamientos, lo que indica que, en las etapas iniciales, el aporte de nutrientes del sistema mixto y el control negativo fue insuficiente para distinguirlos del sistema hidropónico.

A partir de la tercera semana, las diferencias entre tratamientos comenzaron a ser evidentes. El tratamiento hidropónico alcanzó un promedio de 260,75 g/planta en la tercera semana, mientras que el sistema mixto registró 35,76 g/planta. Aunque el sistema mixto proporcionó un aumento en comparación con el control negativo (11,61 g/planta), este crecimiento fue limitado y no logró satisfacer completamente las demandas nutricionales de las lechugas. Estos resultados evidencian las limitaciones del sistema mixto para soportar un desarrollo adecuado de las lechugas en comparación con el tratamiento hidropónico.

Tabla 12. Análisis de comparación múltiple de LSD entre la interacción de semanas y tratamientos para el crecimiento de lechugas en función de la masa.

Semana	Tratamiento	Medias	n	E.E.	
0	Control negativo	4,94	15	7,46	D
0	Mixto	5,26	15	7,46	D
0	Control	5,75	15	7,46	D
1	Control negativo	8,97	15	7,46	D
3	Control negativo	11,61	15	7,46	D
2	Control negativo	12,00	15	7,46	D

Continuación tabla anterior.

1	Mixto	12,45	15	7,46	D	
2	Mixto	24,77	15	7,46	D	C
3	Mixto	35,76	15	7,46		C
1	Control	40,71	15	7,46		C
2	Control	153,55	15	7,46		B
3	Control	260,75	15	7,46		A

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos.

Los resultados obtenidos pueden compararse con los reportados por Mancilla-Morales (2022), donde se evaluaron sistemas acuapónicos y de SAR. En su estudio, el sistema acuapónico alcanzó un peso fresco promedio de 321,31 g/planta, utilizando una densidad de peces de 4 kg/m³. En contraste, el SAR mostró un peso fresco promedio significativamente menor, de 10,73 g/planta, con una densidad de peces de 3 kg/m³.

En esta investigación, se utilizó una densidad de peces de 6 kg/m³, lo que podría haber incidido en las diferencias observadas en los resultados. El sistema mixto alcanzó un peso fresco promedio de 35,76 g/planta, lo que representa un rendimiento ligeramente superior al SAR, pero sigue siendo considerablemente menor en comparación con el sistema acuapónico reportado por Mancilla-Morales, o este sistema hidropónico logró un peso fresco promedio de 260,75 g/planta.

Las diferencias pueden atribuirse a las limitaciones del sistema mixto en la provisión de nutrientes, incluso con una mayor densidad de peces. Este comportamiento es consistente con los hallazgos de Mancilla-Morales, donde

el SAR también mostró restricciones en la disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes para el desarrollo óptimo de las plantas.

6.4. Número de hojas de las lechugas

El número de hojas de las lechugas mostró diferencias significativas entre los tratamientos, las semanas y su interacción (Tabla 13 y 14). Esto sugiere que tanto el tratamiento aplicado como el momento de la medición influyen en el número de hojas producidas por las lechugas. A continuación, se presentan los resultados del ANOVA, que muestran los parámetros principales y la interacción entre las variables independientes en relación con el número de hojas.

Tabla 13. Resultados del ANOVA para el número de hojas de las lechugas.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Número de hojas	180	0,85	0,84	25,45

Tabla 14. Cuadro de análisis de la varianza del número de hojas (SC tipo III).

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4715,08	11	428,64	88,48	<0,0001
Semana	1425,17	3	475,06	98,06	<0,0001
Tratamiento	2092,63	2	1046,32	215,98	<0,0001
Semana*Tratamiento	1197,28	6	199,55	41,19	<0,0001
Error	813,87	168	4,84		
Total	5528,95	179			

- **Efecto de las semana con relación al número de hojas**

El número de hojas de las lechugas registró un incremento continuo a lo largo de las semanas, independientemente del tratamiento aplicado. Como se observa en la Tabla 15, el peso promedio aumentó significativamente en cada etapa.

Tabla 15. Análisis de comparación múltiple de LSD entre semanas para el crecimiento de lechugas en función del número de hojas.

Semana	Medias	n	E.E.	
0	4,78	45	0,33	D
1	7,62	45	0,33	C
2	9,76	45	0,33	B
3	12,44	45	0,33	A

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos.

- **Efecto de los tratamientos con relación al número de hojas**

Se observaron diferencias significativas en el número de hojas entre los tratamientos, como se muestra en la Tabla 16. El tratamiento hidropónico presentó el mayor número de hojas, con una media de 13,35, seguido por el sistema mixto con 7,23. El control negativo mostró el menor desarrollo foliar, con un promedio de 5,37 hojas.

Tabla 16. Análisis de comparación múltiple de LSD entre tratamientos para el crecimiento de lechugas en función del número de hojas.

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Control negativo	5,37	60	0,28	C
Mixto	7,23	60	0,28	B
Control	13,35	60	0,28	A

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos.

El sistema mixto mostró un mejor rendimiento que el control negativo en términos de número de hojas, pero sigue siendo inferior al tratamiento control, el cual demostró ser más eficiente en proporcionar las condiciones óptimas para el desarrollo foliar.

- **Efecto de la interacción de semana y tratamiento con relación al número de hojas**

La interacción entre semanas y tratamientos permitió observar patrones en el desarrollo foliar de las lechugas (Tabla 17). A partir de la segunda semana, el sistema mixto mostró un número de hojas superior al del control negativo. Sin embargo, esta ventaja fue menor en comparación con el tratamiento hidropónico, que presentó un crecimiento significativamente mayor a partir de la misma etapa.

Tabla 17. Análisis de comparación múltiple de LSD entre la interacción de semanas y tratamientos para el crecimiento de lechugas en función del número de hojas.

Semana	Tratamiento	Medias	n	E.E.	
0	Mixto	4,60	15	0,57	E
0	Control negativo	4,80	15	0,57	E
0	Control	4,93	15	0,57	E
2	Control negativo	5,27	15	0,57	E
3	Control negativo	5,40	15	0,57	E
1	Control negativo	6,00	15	0,57	E
1	Mixto	6,13	15	0,57	E
2	Mixto	8,20	15	0,57	D
3	Mixto	10,00	15	0,57	C
1	Control	10,73	15	0,57	C
2	Control	15,80	15	0,57	B
3	Control	21,93	15	0,57	A

Letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos.

En la tercera semana, el tratamiento hidropónico alcanzó un promedio de 21,93 hojas/planta, mientras que el sistema mixto logró 10,00 hojas/planta, y el control negativo, 5,40 hojas/planta. Esto evidencia que, aunque el sistema mixto proporciona un aporte de nutrientes superior al del control negativo,

sigue siendo insuficiente para igualar el desarrollo foliar observado en el tratamiento hidropónico.

Los resultados sobre el número de hojas de las lechugas son comparables con los reportados por Soza Morales y Suazo Salgado (2023). En dicho estudio, se evaluaron diferentes sistemas acuícolas de recirculación (NFT, sustrato y raíz flotante), donde la lechuga alcanzó un promedio de 11,22 hojas/planta.

En comparación, con esta investigación obtuvo un promedio de 10,00 hojas/planta en el sistema mixto. Aunque este valor es ligeramente inferior, se encuentra dentro de un rango cercano al reportado en el estudio mencionado. Esta diferencia podría explicarse por la limitada disponibilidad de nutrientes en el sistema mixto, lo que afecta el desarrollo foliar de las lechugas.

Por otro lado, en Cisneros Ruiz (2021), el sistema hidropónico control alcanzó un promedio de 22,80 hojas/planta, resultado que coincide con los 21,93 hojas/planta obtenidos en el sistema hidropónico de este estudio.

6.5. Calidad de agua

El análisis de los macro y micronutrientes en los tres tratamientos (cultivo hidropónico simple, mixto, y control) es necesario para comprender cómo la disponibilidad y dinámica de estos nutrientes influyen en el crecimiento y desarrollo de las lechugas.

- **Cultivo hidropónico simple**

Este tratamiento (Tabla 18) sirve como línea base para evaluar los cambios naturales en los parámetros del agua sin intervención adicional.

Tabla 18. Evolución de los parámetros fisicoquímico y metales pesados del agua en el tratamiento cultivo hidropónico simple.

Parámetro	Inicio	Intermedio	Final
pH	7,56	7,90	8,23
C.E. (dS/m)	0,74	1,00	1,01
Calcio (mg/L)	92,79	111,22	89,57
Magnesio (mg/L)	11,30	15,19	22,85
Potasio (mg/L)	2,74	4,69	5,08
Sodio (mg/L)	55,64	91,04	97,48
Nitratos (mg/L)	24,18	27,90	31,00
Bicarbonatos (mg/L)	197,69	201,97	197,69
Sulfatos (mg/L)	63,40	179,15	99,90
Cloruros (mg/L)	86,14	109,90	141,80
Boro (mg/L)	0,38	0,58	0,48
Cobre (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.
Zinc (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.
Manganeso (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.
Hierro (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.

Fuente: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes de la UNALM.

Algunos nutrientes se encuentran por debajo de los niveles recomendados para el cultivo óptimo de lechugas. Específicamente, el potasio alcanza 5,08 mg/L al final, comparado con los 210 mg/L sugeridos. El calcio también es insuficiente, disminuyendo a 111,22 mg/L frente a los 150 mg/L. El magnesio se incrementa hasta 22,85 mg/L, aún por debajo de los 45 mg/L requeridos, y los nitratos alcanzan 31 mg/L, en comparación de 554 mg/L. Además, los

micronutrientes críticos (hierro, cobre, manganeso, zinc) no se detectaron, lo que pudo afectar el desarrollo de las plantas.

- **Tratamiento mixto**

En el tratamiento mixto (Tabla 19) los parámetros fisicoquímicos del agua reflejan una diferencia entre el tratamiento hidropónico simple y tratamiento control. A continuación, se presentan los resultados del análisis.

Tabla 19. Evolución de los parámetros fisicoquímico y metales pesados del agua en el tratamiento mixto.

Parámetro	Inicio	Intermedio	Final
pH	7,56	6,93	7,39
C.E. (dS/m)	0,74	1,01	1,08
Calcio (mg/L)	92,79	117,23	105,81
Magnesio (mg/L)	11,30	18,23	22,85
Potasio (mg/L)	2,74	7,43	8,60
Sodio (mg/L)	55,64	88,97	95,64
Nitratos (mg/L)	24,18	42,16	55,80
Bicarbonatos (mg/L)	197,69	192,20	216,00
Sulfatos (mg/L)	63,40	146,01	88,38
Cloruros (mg/L)	86,14	132,94	151,02
Boro (mg/L)	0,38	0,71	0,66
Cobre (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.
Zinc (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.
Manganeso (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.
Hierro (mg/L)	N.D.	N.D.	N.D.

Fuente: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes de la UNALM.

Con respecto a la Tabla 19, el calcio es ligeramente más alto en el sistema mixto, alcanzando 105,81 mg/L frente a 89,57 mg/L en el simple. Sin embargo, ambos están por debajo de los niveles recomendados. El potasio también es mayor en el sistema mixto (8,6 mg/L) en comparación con el simple (5,08

mg/L), pero sigue siendo insuficiente frente a los 210 mg/L requeridos. Los nitratos muestran una mayor concentración en el sistema mixto, alcanzando 55,8 mg/L, en contraste con los 31 mg/L del simple, aunque ambos están lejos del necesario (554 mg/L). Estas diferencias en los niveles de nutrientes se atribuyen a la producción acuícola.

Los resultados obtenidos presentan similitudes y diferencias con los reportados por Cisneros Ruiz (2021), donde se evaluó un sistema acuapónico con adición de nutrientes deficitarios. En ambos estudios, se observó una acumulación progresiva de potasio, alcanzando 8,60 mg/L en el sistema mixto y 6,24 mg/L iniciales en el sistema de Cisneros Ruiz, aunque este último requirió suplementación para cumplir con los niveles óptimos. Sin embargo, en el sistema mixto, nutrientes como hierro, cobre, zinc y manganeso no fueron detectados (N.D.), reflejando una deficiencia más marcada en comparación con las concentraciones iniciales bajas, pero detectables, reportadas por Cisneros Ruiz (hierro: 0,1 mg/L; cobre: 0,01 mg/L; zinc: 0,02 mg/L; manganeso: 0,05 mg/L). Estas carencias podrían explicar las limitaciones en el desarrollo de las plantas en el sistema mixto. Además, aunque ambos estudios comparten la necesidad de ajustar los aportes de micronutrientes, los resultados de Cisneros Ruiz destacan cómo la suplementación de estos elementos mejoró la productividad vegetal sin afectar la salud de los peces, lo que sugiere un camino viable para optimizar el rendimiento en sistemas mixtos como el evaluado en este estudio.

- **Tratamiento control**

La Tabla 20 presenta los resultados obtenidos del análisis de agua en el tratamiento con la adición de solución hidropónica

Tabla 20. Evolución de los parámetros fisicoquímico y metales pesados del agua en el tratamiento control.

Parámetro	Inicio	Intermedio	Final
pH	5,14	5,98	6,13
C.E. (dS/m)	2,28	2,51	2,88
Calcio (mg/L)	309,6	209,41	234,26
Magnesio (mg/L)	52,62	69,27	80,45
Potasio (mg/L)	207,22	213,48	231,46
Sodio (mg/L)	117,94	140,47	180,57
Nitratos (mg/L)	787,46	710,58	997,66
Bicarbonatos (mg/L)	97,02	55,25	70,78
Sulfatos (mg/L)	330,45	325,16	196,92
Cloruros (mg/L)	797,63	190,72	187,89
Boro (mg/L)	2,43	2,62	2,58
Cobre (mg/L)	0,121	0,118	1,131
Zinc (mg/L)	0,043	0,009	N.D.
Manganeso (mg/L)	0,624	0,077	N.D.
Hierro (mg/L)	1,155	1,104	1,208

Fuente: Laboratorio de análisis de suelos, plantas, agua y fertilizantes de la UNALM.

Los macronutrientes analizados cumplen con los niveles recomendados para el cultivo hidropónico (Tabla 2); no obstante, los micronutrientes como el zinc (0,043 y 0,009 mg/L) y el manganeso (0,077 mg/L) se encuentran por debajo de las concentraciones óptimas sugeridas (1,15 mg/L para el zinc y 0,5 mg/L para el manganeso). A pesar de estas deficiencias, la solución hidropónica utilizada en el tratamiento control demostró ser suficiente para garantizar un adecuado desarrollo y producción de biomasa en las lechugas. Esto podría

indicar que las plantas de lechuga poseen cierta tolerancia a bajas concentraciones de zinc y manganeso durante las etapas finales del crecimiento, o bien que otros factores presentes en la solución hidropónica compensaron parcialmente estas carencias.

7. CONCLUSIONES

El sistema mixto de acuicultura e hidroponía no logró asemejarse al tratamiento con solución hidropónica en términos de crecimiento y acumulación de biomasa en las lechugas. A su vez, este sistema no presentó diferencias frente al control negativo, lo que evidencia que la disponibilidad de nutrientes esenciales como calcio, potasio, magnesio y nitratos fue insuficiente para satisfacer las demandas de las plantas y promover un crecimiento vegetal adecuado.

La tasa de supervivencia de la tilapia del Nilo en el sistema mixto indica que, este sistema permite un desarrollo adecuado para el cultivo de peces. Sin embargo, para optimizar la producción en conjunto, es necesario realizar ajustes adicionales que equilibren tanto la producción acuícola como la hidropónica.

El análisis de la calidad del agua reveló que, si bien el sistema mixto produjo un aumento en macronutrientes como nitratos, calcio y potasio, provenientes de la actividad acuícola, lo cual contribuye a una calidad de agua con más nutrientes. Sin embargo, estos niveles son insuficientes para satisfacer las necesidades de las lechugas en el sistema mixto. Además, los micronutrientes esenciales estuvieron ausentes en el sistema.

Es recomendable realizar estudios adicionales con adición de nutrientes que permitan equilibrar la producción de biomasa vegetal y el desarrollo de peces en el sistema mixto. Lograr este balance es necesario para establecer un

sistema de producción sustentable, en el que ambos componentes se beneficien mutuamente y maximicen el uso de recursos.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alloway, B. J. (2008). *Zinc in Soils and Crop Nutrition* (2nd ed.). IZA and IFA. <http://doi.org/10.1002/9780470960707.ch16>
- Barbeau, C. D., Oelbermann, M., Karagatzides, J. D., & Tsuji, L. J. S. (2015). Sustainable Agriculture and Climate Change: Producing Potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and Bush Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) for Improved Food Security and Resilience in a Canadian Subarctic First Nations Community. *Sustainability*, 7(5), 5664-5681. <https://doi.org/10.3390/su7055664>
- Boyd, C. E. (1990). *Water quality in ponds for aquaculture*. Auburn University, Alabama.
- Briat, J. F., & Lobreaux, S. (1997). *Iron Transport and Storage in Plants*. Trends in Plant Science, 2(6), 187-193. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)85225-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)85225-9)
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). *Function of Nutrients: Micronutrients*. In *Marscher's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
- Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1973). *Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas*. Editorial Trillas.
- Cisneros Ruiz, K. L. (2021). *Producción acuapónica de tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus) y lechuga (Lactuca sativa) con adición de nutrientes deficitarios en el sistema* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4915>
- Corina Alimentos. (2024, 18 de octubre). *Composición Nutricional CoriPeces*. <https://www.corina.com.pe>
- Endut, A., Jusoh, A., & Ali, N. (2013). Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. *Desalination And Water Treatment*, 52(4-6), 744-752. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.826336>

- FAO. (2022). *Preguntas frecuentemente planteadas sobre la tilapia del Nilo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/fishery/affris/perfiles-de-las-especies/nile-tilapia/preguntas-frecuentemente-planteadas/es>.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199-224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1-3), 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>
- Guerrero, E., Revelo, J., Benavides, O., Chaves, G., Moncayo, C. (2014). Evaluación de sustratos en un cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de pasto. *Ciencias Agrícolas*, 31(1), 3-16. <https://doi.org/0.22267/rcia.143101.38>
- Jafri, N., & Mazid, M. (2015). Augmentation of Dry Matter Production, Photosynthetic Enzymes, Yield Attributes and Quality Parameters of Sunflower through Seed Priming Effect of Gibberellic Acid—A Multifaceted Hormone. *OALib*, 02(04), 1-18. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101442>
- Lennard, W. A., & Leonard, B. V. (2006). A Comparison of Three Different Hydroponic Sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic Test System. *Aquaculture International*, 14(6), 539-550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- Lennard, W. A., & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The Basics. En *Springer eBooks* (pp. 113-143). https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5
- Mancilla-Morales, A. (2022). *Evaluación de biofloc fortificado para la producción de lechuga en sistema de acuaponía* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/2306>

- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Obirikorang, K. A., Sekey, W., Gyampoh, B. A., Ashiagbor, G., & Asante, W. (2021). Aquaponics for Improved Food Security in Africa: A Review. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.705549>
- Okomoda, V. T., Oladimeji, S. A., Solomon, S. G., Olufeagba, S., Ogah, S. I., & Ikhwanuddin, M. (2022). Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption. *Food Science & Nutrition*, 11(3), 1157-1165. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3154>
- Rakocy, J., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics - Integrating fish and plant culture* (Publication No. 454). SRAC Publication.
- Shamsuddin, M., Hossain, M. B., Rahman, M., Kawla, M. S., Tazim, M. F., Albeshr, M. F., & Arai, T. (2022). Effects of Stocking Larger-Sized Fish on Water Quality, Growth Performance, and the Economic Yield of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in Floating Cages. *Agriculture*, 12(7), 942. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070942>
- Singh, H., Dunn, B. L., & Payton, M. E. (2019). Hydroponic pH Modifiers affect Plant Growth and Nutrient Content in Leafy Greens. *Journal Of Horticultural Research*, 27(1), 31-36. <https://doi.org/10.2478/johr-2019-0004>
- Soza Morales, M. O., & Suazo Salgado, K. K. (2023). *Comportamiento agronómico de cuatro cultivos: Lechuga (Lactuca sativa L.), Apio (Apium graveolens L.), Hierba buena (Mentha spicata L.) y Cilantro (Cilantro cimarron L.), en tres sistemas acuapónicos, Managua, 2022* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/4634/1/tnf02s731.pdf>
- Stoyanova, S., Sirakov, I., & Velichkova, K. (2024). Sustainable Production: Integrating Medicinal Plants with Fish Farming in Aquaponics—A Mini Review. *Sustainability*, 16(15), 6337. <https://doi.org/10.3390/su16156337>

- Teixeira, I. R., Borém, A., De Andrade Araújo, G. A., & Fontes, R. L. F. (2004). Manganese and zinc leaf application on common bean grown on a «Cerrado» soil. *Scientia Agricola*, 61(1), 77-81. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162004000100013>
- Thompson, H., Langhans, R. W., Both, A., & Albright, L. D. (1998). Shoot and Root Temperature Effects on Lettuce Growth in a Floating Hydroponic System. *Journal Of The American Society For Horticultural Science*, 123(3), 361-364. <https://doi.org/10.21273/jashs.123.3.361>
- Valverde, K., Chang M., Rodriguez D.A. (2009). Effect of the Light Quality on the Nitrate Reductase Activity in Lettuce Plants Grown in NFT. *Acta Horticulturae*, 98, 89-96. <https://doi.org/0.17660/ActaHortic.2009.843.9>
- Yildiz, H. Y., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. *Water*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>
- Penn State Extension. (2024, marzo 18). Sistemas hidropónicos: Programas y recetas de soluciones nutritivas. Penn State Extension. <https://extension.psu.edu/sistemas-hidroponicos-programas-y-recetas-de-soluciones-nutritivas>

9. ANEXOS

Tabla I. Longitud de raíz, número de hojas y masa de las lechugas de las camas hidropónicas de cultivo hidropónico simple a lo largo de las tres semanas.

Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas	Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas	Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas
Semana 0								
5,4	8,0	5	4,3	13,0	5	3,7	11,5	5
5,3	9,0	4	6,1	10,0	5	4,1	13,5	5
3,7	6,5	4	4,7	11,0	6	5,1	9,5	4
3,5	7,5	4	6,4	12,5	6	5,1	9,0	4
4,6	9,0	4	6,1	12,0	5	6,0	13,0	6
Semana 1								
7,4	17,0	6	12,4	14,0	7	8,3	11,5	7
6,2	14,0	5	11,6	15,0	7	9,1	17,0	6
9,4	16,0	5	11,4	14,5	6	8,0	15,5	7
7,9	11,0	5	8,4	12,5	6	7,9	11,0	6
7,1	12,0	6	9,4	13,0	5	10,1	12,0	6
Semana 2								
10,1	16,5	6	14,1	14,5	6	8,1	30,0	3
10,3	20,0	6	16,6	19,0	7	14,6	30,0	5
12,7	20,0	6	10,7	21,0	6	12,3	15,5	3
16,0	22,5	7	17,2	24,5	7	11,3	20,0	5
7,6	14,5	4	8,6	19,0	4	9,8	18,0	4
Semana 3								
7,5	10,5	3	11,3	44,0	6	8,7	16,0	3

Continuación tabla anterior.

8,5	20,0	5	9,8	18,5	6	10,6	15,5	4
8,8	19,5	6	17,0	20,0	6	14,3	20,0	6
11,4	14,0	6	13,3	12,0	6	15,4	25,0	5
12,0	16,5	6	15,9	22,5	7	9,6	13,5	6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II. Longitud de raíz, número de hojas y masa de las lechugas de las camas hidropónicas del tratamiento mixto a lo largo de las tres semanas.

Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas	Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas	Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas
Semana 0								
3,6	9,5	5	7,6	10,5	6	4,7	11,5	5
3,8	8,0	4	8,2	16,5	6	5,8	8,0	3
3,5	9,0	4	5,4	16,0	6	5,2	9,5	4
4,6	8,0	4	5,7	19,5	5	6,5	13,5	5
5,2	8,5	4	3,8	8,5	3	5,3	11,5	5
Semana 1								
11,0	10,0	5	18,2	19,0	7	11,6	12,5	6
8,9	13,0	5	15,6	16,5	7	10,8	13,0	6
13,0	15,0	6	14,9	20,5	7	16,2	16,0	6
9,1	12,0	7	15,2	16,5	7	9,4	15,5	6
10,5	13,0	5	8,0	11,0	6	14,4	13,0	6
Semana 2								
20,5	14,0	6	22,0	17,0	8	33,1	23,5	11

Continuación tabla anterior.

25,5	16,5	8	33,8	25,0	9	26,3	18,5	10
23,6	20,5	8	22,6	20,5	9	24,9	21,5	7
21,4	18,5	7	31,0	20,0	9	20,1	22,0	9
19,2	13,5	7	25,3	19,5	8	22,3	16,5	7
Semana 3								
30,1	19,5	10	28,3	17,5	9	41,5	22,5	10
46,2	20,0	10	42,3	26,0	10	49,3	16,5	7
25,5	17,5	8	46,7	20,0	10	20,2	18,0	11
18,3	14,5	7	22,7	16,0	7	38,5	25,0	10
37,8	22,5	12	48,0	26,5	16	41,0	22,0	13

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III. Longitud de raíz, número de hojas y masa de las lechugas de las camas hidropónicas del control a lo largo de las tres semanas.

Repetición 1			Repetición 2			Repetición 3		
Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas	Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas	Masa (g)	Longitud Raíz (cm)	Número de hojas
Semana 0								
4,9	11,0	4	5,0	11,0	5	5,6	12,0	5
4,6	10,0	5	6,8	15,5	6	5,0	12,0	4
4,6	12,0	6	5,2	13,0	5	7,0	10,5	5
5,5	11,0	5	6,5	15,0	5	6,2	13,0	5
5,0	12,0	4	7,2	10,0	5	7,1	16,5	5
Semana 1								
40,0	15,5	10	30,1	14,5	8	47,3	19,0	10
40,6	14,5	11	40,2	20,5	11	49,1	17,0	9

Continuación tabla anterior.

45,3	15,5	10	28,4	15,5	12	41,1	23,5	11
46,4	13,5	11	33,0	25,5	8	26,1	14,5	8
46,1	14,5	12	38,7	18,5	13	58,3	24,5	17
Semana 2								
145,5	25,0	20	117,5	20,0	14	214,2	35,0	16
111,2	20,5	13	107,8	21,0	15	169,8	30,0	16
138,8	20,0	14	167,7	18,5	20	173,2	30,0	15
150,2	14,0	15	110,5	30,5	12	86,0	21,5	11
170,2	17,0	20	206,5	26,5	16	234,1	40,0	20
Semana 3								
279,7	25,0	21	179,8	33,0	18	144,7	36,0	24
206,5	26,5	16	196,3	30,5	20	300,6	40,5	26
194,9	27,0	16	277,1	30,0	18	438,7	33,0	32
343,2	27,0	20	332,8	31,0	22	163,3	33,0	18
396,4	30,0	22	185,5	32,0	21	271,8	53,0	35

Fuente: Elaboración propia.

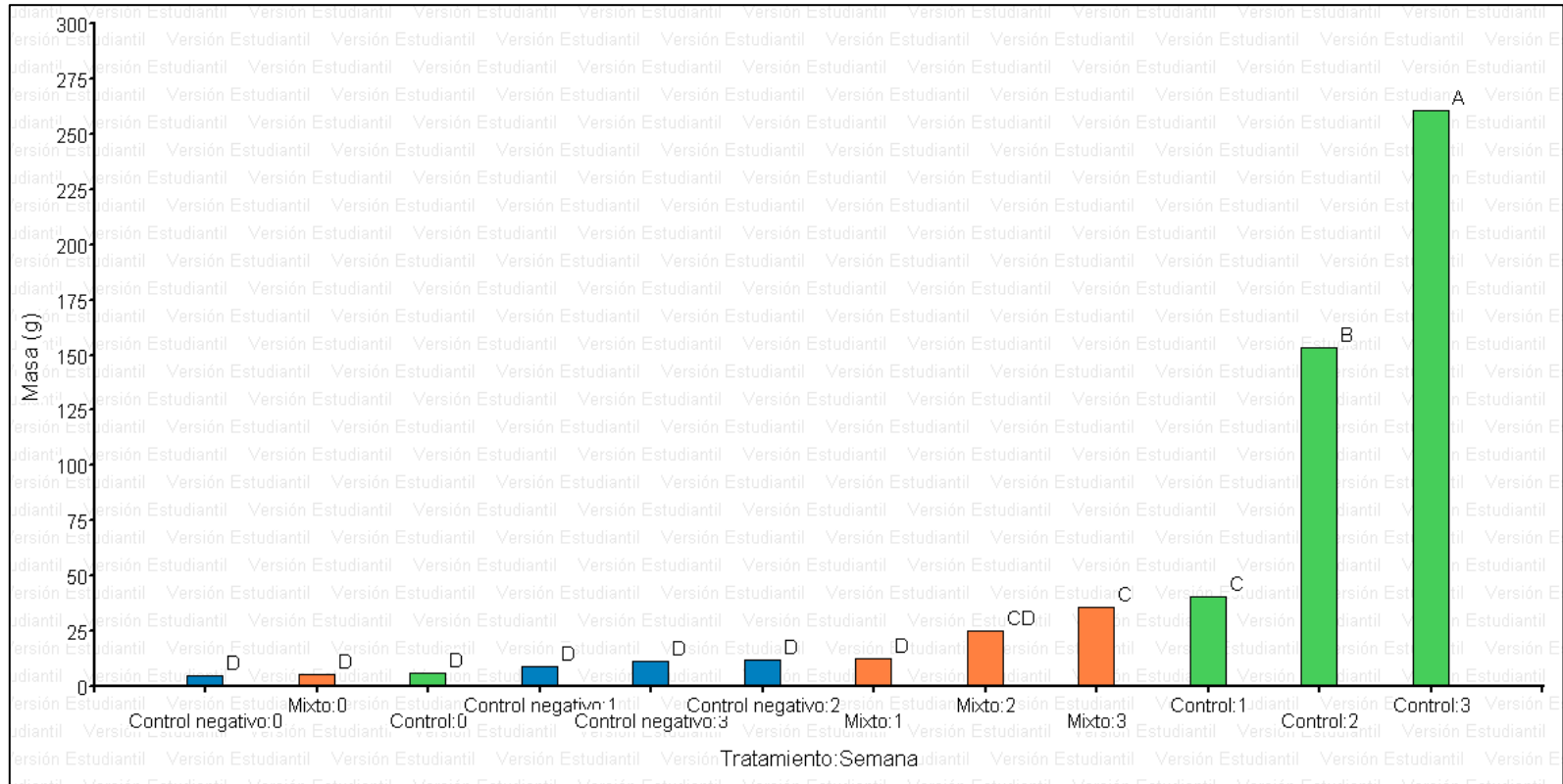


Figura I. Análisis post hoc de LSD para el rendimiento en masa de lechugas en función de los tratamientos y semanas.

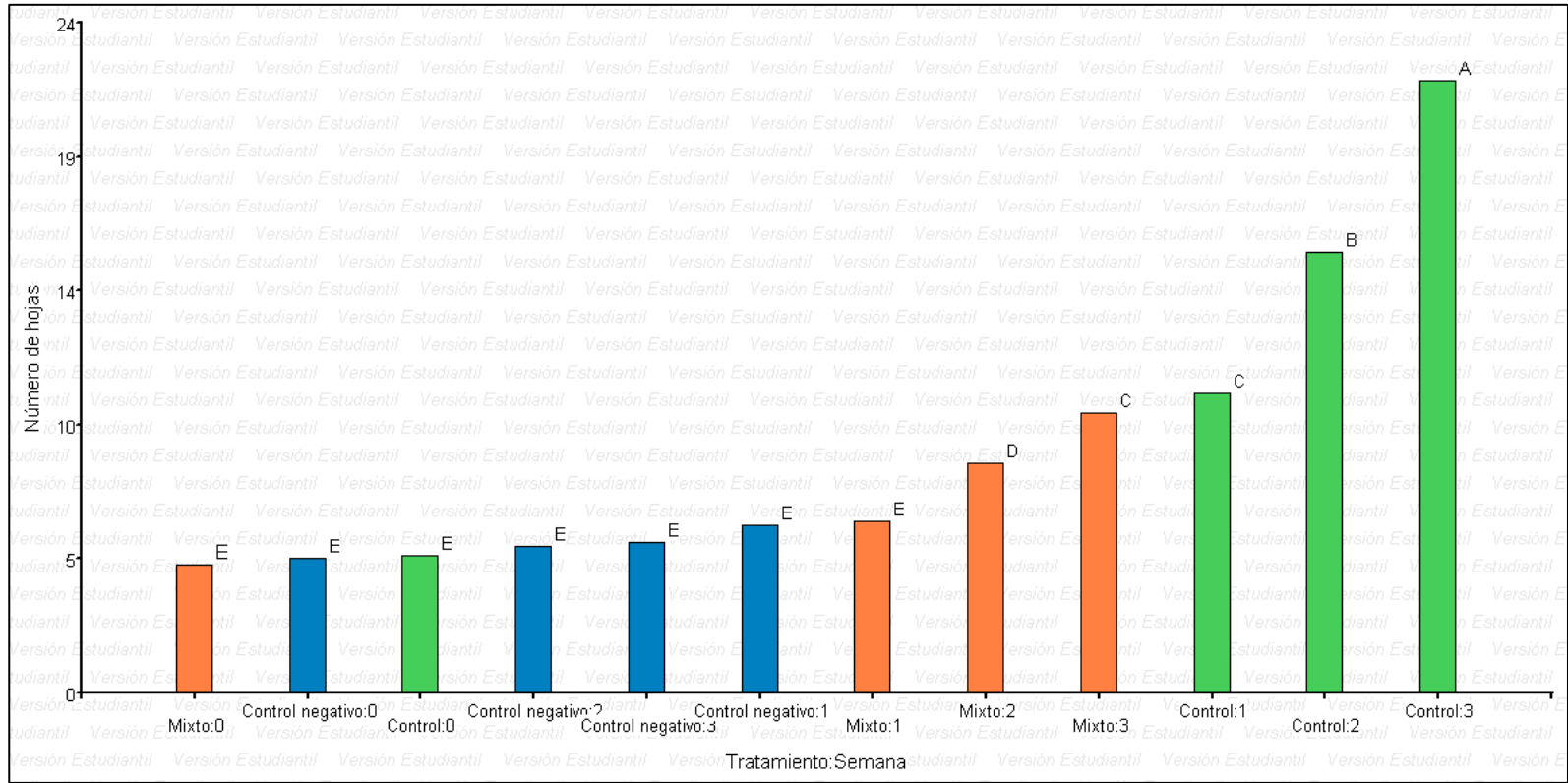


Figura II. Análisis post hoc de LSD para el rendimiento en número de hojas en función de los tratamientos y semanas.