

# **Pontificia Universidad Católica del Ecuador**

## **Sede Ibarra**

**ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y AMBIENTALES**

### **INFORME FINAL DEL PROYECTO**

**TEMA:**

“Evaluación del efecto del sistema acuapónico en dos variedades de lechuga, francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa L.*) asociada al cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*)”

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**

**INGENIERA AGROPECUARIA**

**LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Gestión sostenible y aprovechamiento de los recursos naturales.

**SUBLINEA:** Seguridad y soberanía alimentaria.

**AUTOR:** CARLA DAYANA MALES JÁTIVA

**ASESOR:** PhD. EDMUNDO RENÉ RECALDE POSSO

Ibarra, 12 de agosto de 2024

Ibarra, 12 de agosto de 2024

PhD. Edmundo Recalde Posso

ASESOR

**CERTIFICA:**

Haber revisado el presente informe final de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigente en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales (ECAA), de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI); en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.



(f).....

PhD. Edmundo Recalde Posso

C.C.: 1001774494

**PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL**

El jurado examinador, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI):



(f).....

**RECALDE POSSO EDMUNDO RENE**

C.C.: 1001774494



(f).....

**MSc. Edwin Del Pozo Villacís**

C.C.: 1001756566



(f) .....

**José Valdemar Andrade Cadena**

C.C.: 1001927167

## ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Yo CARLA DAYANA MALES JÁTIVA, declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 165 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, que manifiesta textualmente: “Se reconoce facultad de los autores y demás titulares de derecho de disponer de sus derechos o autorizar de sus obras o prestaciones, a título gratuito u oneroso, según las condiciones que determinen. Esta facultad podrá ejercerse mediante licencias libres, abiertas y otros modelos alternativos de licenciamiento o la renuncia”.

Ibarra, 12 de agosto de 2024



f): .....

CARLA DAYANA MALES JÁTIVA

C.C.: 1005209943

## AUTORÍA

Yo, CARLA DAYANA MALES JÁTIVA, portador de la cédula de ciudadanía N° 1005209943, declaró que la presente investigación es de total responsabilidad del autor, y eximo expresamente a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra de posibles reclamos o acciones legales.



f): .....

CARLA DAYANA MALES JÁTIVA

C.C.: 1005209943

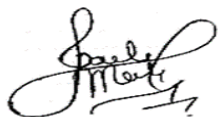
## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, CARLA DAYANA MALES JÁTIVA, con C.C.: 1005209943 , autora del trabajo de grado intitulado: “EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL SISTEMA ACUAPÓNICO EN DOS VARIETADES DE LECHUGA, FRANCESA (*Lactuca sativa*) Y CRIOLLA (*Lactuca sativa* L.)ASOCIADA AL CULTIVO DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis mossambicus*)” previo a la obtención del título profesional de Ingeniería Agropecuaria, en la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra a difundir a través del sitio web de la Biblioteca de la PUCE SI el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de la Universidad.

Ibarra, 12 de agosto de 2024



f): .....

CARLA DAYANA MALES JÁTIVA

C.C.: 1005209934

**DECLARACIÓN DE COMPORTAMIENTO ÉTICO EN LA ELABORACIÓN,  
DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Por medio de la presente declaro conocer y aplicar en la elaboración, desarrollo y evaluación de Proyecto de Titulación: “EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL SISTEMA ACUAPÓNICO EN DOS VARIEDADES DE LECHUGA, FRANCESA (*Lactuca sativa*) Y CRIOLLA (*Lactuca sativa L.*) ASOCIADA AL CULTIVO DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis sp.*)”, lo propuesto en el Código de Ética de la investigación y el aprendizaje de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, aprobado por el Consejo Superior de la PUCE con fecha 13 de febrero de 2023

Para constancia firma:



f): .....

Carla Dayana Males Játiva

Estudiante que ejecuta el trabajo de Titulación

C.C/ Pasaporte: 1005209943

Carrera: Ingeniería Agropecuaria

Ibarra, 14 de febrero de 2023

## **DEDICATORIA**

A Dios mi Señor Jesús, por su gracia inagotable, fuente de fortaleza y sabiduría. A mis padres, Efraín Males y Janeth Játiva por su amor, sacrificio y constante estímulo, mis queridas hermanas y a mis abuelos, Luis Játiva e Inés Guerra, por haberme impartido amor y sabio consejo. Finalmente, y no menos importante, mis líderes espirituales, Pastor Blake Bess y Allison Bess, por ser faros de luz en mi crecimiento espiritual, agradezco su orientación y apoyo constante.

Gracias por ser parte de este viaje.

Carla Males

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra (PUCESI) por la educación impartida.

Carla Males

## Contenido

PORTADA.....	i
CERTIFICA.....	ii
PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iii
ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS.....	iv
AUTORÍA.....	v
DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTO.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	19
CAPÍTULO I.....	20
INTRODUCCIÓN.....	20
CAPÍTULO II.....	21
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. Objetivo general.....	21
2.2. Objetivos específicos.....	21
2.3. Hipótesis.....	22
CAPÍTULO III.....	23
3. ESTADO DEL ARTE.....	23
3.1. Acuaponía.....	23
3.1.1. Origen de la Acuaponía.....	23
3.2.2. Sistema Acuapónico.....	23
3.2.3. Parámetros de Calidad del Agua.....	24
3.2.7. Principales elementos.....	26
3.2.8. Ventajas y desventajas de la acuaponía.....	28
3.2.8. Fuente de agua.....	30
3.3 Hidroponía.....	30
3.3.1 Sistema Hidropónico.....	31

3.3.2 Ventajas del Sistema Hidropónico .....	31
3.3.3 Requerimientos del Sistema Hidropónico .....	33
3.4 Lechuga .....	33
3.4.1 Requerimientos de la Lechuga .....	34
3.5 Tilapia Roja ( <i>Oreochromis sp</i> ).....	34
3.5.1 Calidad del Agua.....	35
3.5.1 Requerimientos de Calidad del Agua para la Tilapia Roja ( <i>Oreochromis sp</i> ).....	35
CAPÍTULO IV.....	37
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	37
4.1. Materiales .....	37
4.2. Metodología .....	38
4.2.1. Ubicación del área de estudio.....	38
4.2.2. Etapas del Proceso de Investigación.....	39
4.2.1.1. Etapa 1 Adecuación de Infraestructura de Sistema de Acuaponía e Hidroponía .....	40
4.2.1.2. Etapa 2 Análisis de soluciones de agua y plantas de lechuga en laboratorio .....	41
4.2.1.3. Etapa 3. Evaluación de los Parámetros Morfo Fisiológicos de las Plantas de Lechuga en el Sistema.....	42
4.2.1.4. Etapa 4. Etapa de Gabinete .....	43
4.3. Procesamiento de Datos .....	43
4.4. Diseño Experimental .....	43
4.5. Factores y Niveles de Estudio de la Investigación.....	43
4.6. Tratamientos.....	44
4.6.1. Tratamiento 1 (F1).....	44
4.6.2. Tratamiento 2 (F2).....	44
4.7. Parcela absoluta.....	45
4.9. Variables evaluadas.....	47
4.9.1. Variable/s Independiente/s .....	47
4.9.2. Variables dependientes .....	47
CAPÍTULO V.....	48
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
5.1. Variables.....	48

5.1.1. Peso de Masa Radicular (g).....	48
5.3. Largo de raíz de la lechuga (cm).....	53
5.4. Peso de la lechuga (g).....	57
5.5. Largo de hojas de la lechuga.....	61
5.6. Número de hojas.....	65
5.5. Clorofila .....	69
5.7. NPK.....	72
CAPÍTULO VI.....	98
CONCLUSIONES .....	98
CAPÍTULO VII .....	99
RECOMENDACIONES.....	99
CAPÍTULO VIII.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
Bibliografía .....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Parámetros de Calidad del Agua en un Sistema Acuapónico	27
<b>Tabla 2</b> Requerimientos para un Cultivo Optimo de Tilapia Roja	39
<b>Tabla 3</b> Ubicación y Registro Climatológico del Área de Estudio	42
<b>Tabla 4</b> Factores, Niveles de Estudio	49
<b>Tabla 5</b> Esquema de Tratamientos del Experimento	50
<b>Tabla 6</b> Análisis de Varianza de la Variable Masa Radicular	55
<b>Tabla 7</b> Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Acuapónico e Hidropónico para la Variable de Masa Radicular	55
<b>Tabla 8</b> Prueba de Tukey: Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Masa Radicular	56
<b>Tabla 9</b> Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Masa Radicular	57
<b>Tabla 10</b> Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Largo de Raíz	59
<b>Tabla 11</b> Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas de la Variable Largo de Raíz	59
<b>Tabla 12</b> Prueba de Tukey: Comparación de Variedades de la Variable Largo de Raíz	60
<b>Tabla 13</b> Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Largo de Raíz	62
<b>Tabla 14</b> Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Peso de Masa Aérea de la Lechuga	63
<b>Tabla 15</b> Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico para la Variable Peso de Masa Aérea	64
<b>Tabla 16</b> Prueba de Tukey: Comparación de Variedades para la Variable Peso de Masa Aérea	65
<b>Tabla 17</b> Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Peso de Masa Aérea	65
<b>Tabla 18</b> Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Largo de Hojas de la Lechuga	67
<b>Tabla 19</b> Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga	68
<b>Tabla 20</b> Prueba de Tukey: Comparación de Variedades de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga	69
<b>Tabla 21</b> Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la variable Largo de Hojas de la Lechuga	70

<b>Tabla 22</b> Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Número de Hojas de la Lechuga	71
<b>Tabla 23</b> Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga	72
<b>Tabla 24</b> Prueba de Tukey: Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga	73
<b>Tabla 25</b> Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Número de Hojas de la Lechuga	74
<b>Tabla 26</b> Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Clorofila de la Lechuga	75
<b>Tabla 27</b> Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico de la Variable Clorofila de la Lechuga	76
<b>Tabla 28</b> Prueba de Tukey: Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Clorofila de la Lechuga	76
<b>Tabla 29</b> Prueba de Tukey: Interacción Sistema- Variedad de la Variable Clorofila de la Lechuga	77
<b>Tabla 30</b> Determinación de Absorción de NPK	78
<b>Tabla 31</b> Promedios Semanales de Diferentes Parámetros en el Sistema Acuapónico	84
<b>Tabla 32</b> Promedios Semanales de Diferentes Parámetros en el Sistema Hidropónico	88
<b>Tabla 33</b> Resultados del efecto del sistema acuapónico e hidropónico en dos variedades de lechuga criolla y francesa.	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Mapa de Ubicación del Invernadero Granja experimental La Victoria PUCE-SI	41
<b>Figura 2</b> Diseño de Sistema Acuapónico y Distribución de Unidades Experimentales	49
<b>Figura 3</b> Diseño de Sistema Hidropónico y Distribución de Unidades Experimentales	50
<b>Gráfico 4</b> Comparación de Sistemas Acuapónico e Hidropónico para la Variable de Masa Radicular	54
<b>Gráfico 5</b> Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Masa Radicular	55
<b>Gráfico 6</b> Interacción Sistema-Variedad de la Variable Masa Radicular	56
<b>Gráfico 7</b> Comparación de Sistemas de la Variable Largo de Raíz	58
<b>Gráfico 8</b> Comparación de Variedades de la Variable Largo de Raíz	59
<b>Gráfico 9</b> Interacción Sistema-Variedad de la Variable Largo de Raíz	60
<b>Gráfico 10</b> Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico para la Variable Peso de Masa Aérea	62
<b>Gráfico 11</b> Comparación de Variedades para la Variable Peso de Masa Aérea	63
<b>Figura 12</b> Interacción Sistema-Variedad de la Variable Peso de Masa Aérea	64
<b>Figura 13</b> Comparación de Sistemas de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga	66
<b>Figura 14</b> Comparación de Variedades de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga	67
<b>Figura 15</b> Interacción Sistema-Variedad de la variable Largo de Hojas de la Lechuga	68
<b>Figura 16</b> Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga	70
<b>Figura 17</b> Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga	71
<b>Figura 18</b> Interacción Sistema-Variedad de la Variable Número de Hojas de la Lechuga	72
<b>Figura 19</b> Interacción Sistema- Variedad de la Variable Clorofila de la Lechuga	75
<b>Figura 20</b> Niveles de Absorción de NPK de los Sistemas	76
<b>Figura 21</b> Evolución del pH durante 4 Semanas	77
<b>Figura 22</b> Evolución de CE durante 4 Semanas	78
<b>Figura 23</b> Evolución de la Temperatura a lo Largo de 4 Semanas	79
<b>Figura 24</b> Concentración de Nitritos y Nitratos durante 4 Semanas	81
<b>Figura 25</b> Promedios semanales de Diferentes Parámetros en el Sistema Acuapónico	82
<b>Figura 26</b> Niveles de pH en el Sistema Hidropónico	83

<b>Figura 27</b> Niveles de CE en el Sistema Hidropónico Durante 4 Semanas	84
<b>Figura 28</b> Temperatura Semanal en el Sistema Hidropónico	85
<b>Figura 29</b> Promedios de parámetros en el Sistema Hidropónico Semanalmente	86

## ÍNDICE DE ANEXOS

**Anexo 1:** Fotografías de actividades realizadas en la investigación ..... página 108

**Anexo 2:** Tabla de medición de parámetros de calidad de agua en cada sistema de cultivo ...  
página 117

## RESUMEN

Este estudio investigó la evaluación del efecto del sistema acuapónico en dos variedades de lechuga, francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa* L.), asociada al cultivo de tilapia roja (*Oreochromis* sp.). En donde se abordaron objetivos como, evaluar parámetros agronómicos y determinar la absorción de nutrientes en los estados fenológicos de las dos variedades de lechuga bajo sistema acuapónico, frente a la necesidad de gestionar eficientemente el agua en el área agrícola. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial AxB para comparar ambos sistemas de cultivo y variedades. Se midieron variables como peso de masa radicular y aérea, longitud de raíz, número y largo de hojas, niveles de clorofila, y absorción de NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio). Los datos fueron analizados mediante ANOVA y la prueba de Tukey. Los resultados revelaron que, en el sistema acuapónico, la lechuga francesa mostró un mejor rendimiento en comparación con la criolla. La lechuga francesa presentó un peso de masa radicular de 43.99 g y una longitud de raíz de 56.11 cm, superiores a los 25.15 g y 52.82 cm de la criolla. También superó a la criolla en peso de masa aérea (148.58 g frente a 105.15 g), largo de hojas (24.04 cm frente a 20.12 cm) y número de hojas (30.18 frente a 22.30). En términos de absorción de nutrientes, la lechuga francesa absorbió mayores cantidades de NPK bajo el sistema acuapónico y en el sistema hidropónico, la lechuga francesa también mostró mejores resultados en masa aérea (18.55 g frente a 15.28 g) y largo de hojas (18.75 cm frente a 16.32 cm). Sin embargo, la lechuga criolla presentó un mejor desarrollo en masa radicular (5.30 g frente a 4.00 g) y longitud de raíz (9.81 cm frente a 8.50 cm). En cuanto a la concentración de NPK, la lechuga criolla absorbió más nutrientes en el sistema hidropónico. Concluyendo así que la lechuga francesa tuvo un mejor rendimiento general en ambos sistemas, pero la criolla mostró ventajas específicas en el sistema hidropónico en términos de desarrollo radicular.

**Palabras clave:** rendimiento agronómico, sistemas acuapónico e hidropónico, gestión del agua, variedades de lechuga, absorción de nutrientes

## ABSTRACT

This study investigated the evaluation of the effects of an aquaponic system on two lettuce varieties, French (*Lactuca sativa*) and Criolla (*Lactuca sativa* L.), associated with the cultivation of red tilapia (*Oreochromis* sp.). The objectives included evaluating agronomic parameters and determining nutrient absorption during the phenological stages of both lettuce varieties under the aquaponic system, in response to the need for efficient water management in agricultural areas. A Completely Randomized Design (CRD) with a 2x2 factorial arrangement was used to compare both cultivation systems and varieties. Variables measured included root and shoot mass, root length, leaf number and length, chlorophyll levels, and NPK (Nitrogen, Phosphorus, and Potassium) absorption. Data were analyzed using ANOVA and Tukey's test. The results revealed that in the aquaponic system, French lettuce exhibited superior performance compared to Criolla lettuce. French lettuce had a root mass of 43.99 g and a root length of 56.11 cm, which were higher than the 25.15 g and 52.82 cm observed for Criolla. French lettuce also outperformed Criolla in shoot mass (148.58 g vs. 105.15 g), leaf length (24.04 cm vs. 20.12 cm), and leaf number (30.18 vs. 22.30). In terms of nutrient absorption, French lettuce absorbed higher amounts of NPK under the aquaponic system. In the hydroponic system, French lettuce also showed better results in shoot mass (18.55 g vs. 15.28 g) and leaf length (18.75 cm vs. 16.32 cm). However, Criolla lettuce demonstrated better root development in the hydroponic system, with a root mass of 5.30 g compared to 4.00 g and a root length of 9.81 cm compared to 8.50 cm. Regarding NPK concentration, Criolla lettuce absorbed more nutrients in the hydroponic system. Thus, it is concluded that French lettuce achieved better overall performance in both systems, but Criolla lettuce exhibited specific advantages in root development within the hydroponic system.

**Keywords:** agronomic performance, aquaponic and hydroponic systems, water management, lettuce varieties, nutrient absorption

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

En un mundo donde la escasez de agua y el cambio climático se están convirtiendo en problemas cada vez más graves, encontrar soluciones innovadoras para la agricultura se vuelve crucial. En este sentido, la acuaponía se presenta como una alternativa prometedora al combinar la acuicultura y la hidroponía de manera eficiente. Este sistema integrado no solo optimiza el uso del agua al reciclarla entre los peces y las plantas, sino que también convierte los desechos de los peces en nutrientes valiosos para las plantas. Esto no solo reduce la necesidad de fertilizantes químicos, sino que también ayuda a disminuir la contaminación ambiental (Hochman et al., 2018).

La acuaponía es particularmente relevante en áreas con problemas de agua, donde cada gota cuenta y se necesita una gestión más eficiente de los recursos. Además, este sistema puede contribuir a la seguridad alimentaria al proporcionar alimentos frescos y nutritivos en lugares con limitaciones agrícolas. La posibilidad de cultivar alimentos en entornos urbanos o periurbanos, donde el acceso al agua es limitado, representa una ventaja significativa (König et al., 2018).

Este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del sistema acuapónico en dos variedades de lechuga, francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa L.*) asociada a cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). Centrándose en evaluar parámetros agronómicos en dos variedades de lechuga bajo sistema acuapónico y determinar la absorción de nutrientes en los estados fenológicos de dos variedades de lechuga bajo el mismo sistema.

Para llevar a cabo la investigación, se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con un arreglo factorial 2x2. Se compararon las dos variedades de lechuga bajo condiciones tanto acuapónicas como hidropónicas. Se analizaron varios aspectos, como la masa de raíces y brotes, el tamaño de hojas y raíces, el contenido de clorofila y la absorción de nutrientes (NPK). Estos parámetros permiten evaluar en detalle cómo se comportan las lechugas en ambos sistemas y qué factores influyen en su crecimiento (König et al., 2018).

Los resultados mostraron que el sistema acuapónico tiene claras ventajas en el desarrollo de raíces, especialmente para la variedad criolla. Por otro lado, la variedad francesa demostró un crecimiento foliar superior y una mayor absorción de nutrientes. Estos hallazgos destacan cómo la acuaponía puede ser una solución efectiva para la agricultura sostenible, mejorando el uso de

recursos hídricos y contribuyendo a una mayor seguridad alimentaria, brinda también información importante para avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles, siendo este conocimiento esencial para enfrentar los desafíos de la escasez de agua y mejorar la producción de alimentos en regiones con recursos limitados (Hochman et al., 2018).

## CAPÍTULO II

### 2. OBJETIVOS

#### 2.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto del sistema acuapónico en dos variedades de lechuga, francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa L.*) asociada a cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra.

#### 2.2. Objetivos específicos

- Evaluar parámetros agronómicos en dos variedades de lechuga bajo sistema acuapónico.
- Determinar la absorción de nutrientes en los estados fenológicos de dos variedades de lechuga bajo sistema acuapónico.

### 2.3. Hipótesis

**Ha:** La implementación de sistema acuapónico mejora la productividad de lechuga.

**Ho:** La implementación de sistema acuapónico no mejora la productividad de lechuga.

## CAPÍTULO III

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1. Acuaponía

##### 3.1.1. Origen de la Acuaponía

En tiempos antiguos, se practicaba una forma primitiva de acuaponía. Los aztecas, por ejemplo, desarrollaron un método ingenioso mediante la construcción de balsas flotantes conocidas como chinampas, que eran estructuras hechas de troncos y varas, cubiertas con tierra y restos orgánicos. Estas chinampas se ubicaban en los lagos y lagunas de los valles centrales de México, donde cultivaban una variedad de plantas mientras recolectaban peces y lodos de los canales circundantes, los cuales se utilizaban como fertilizantes. Con el tiempo, las chinampas se expandieron y se convirtieron en un componente esencial de la agricultura azteca, ayudando a convertir a México-Tenochtitlan en una ciudad flotante y sosteniendo una gran población. Aunque hoy en día los lagos han sido en su mayoría drenados debido al crecimiento urbano, algunas chinampas todavía existen como una atracción turística conocida como los “jardines flotantes de Xochimilco” (López, 2019).

##### 3.2.2. Sistema Acuapónico

La acuaponía es un sistema de producción que combina la recirculación de acuicultura y la hidroponía, en el que el agua del tanque de peces circula a través de filtros y camas de cultivo antes de regresar a los peces. Primero, un filtro mecánico elimina los desechos sólidos, y luego un biofiltro convierte el amoníaco tóxico en nitratos, que las plantas utilizan como nutrientes. Este proceso permite que el agua enriquecida con nutrientes pase por las camas de cultivo, donde las plantas absorben estos nutrientes antes de que el agua vuelva al tanque de peces, creando un entorno en el que peces, plantas y bacterias coexisten de manera beneficiosa (Somerville et al., 2022).

Es decir, es una combinación de la producción de peces y la producción de hortalizas sin suelo mediante el medio común de “agua”. Las plantas y los peces crean una sinergia, ya que los desechos metabólicos de los peces se utilizan como nutrientes para el crecimiento de las plantas,

mientras que estas limpian el agua, eliminando compuestos tóxicos como el amonio y los nitritos, lo que reduce la necesidad de renovar el agua con frecuencia. Este sistema también involucra microorganismos que afectan los procesos de mineralización y nitrificación, principalmente bacterias nitrificantes. Aunque la acuaponía es una técnica sustentable e intensiva, requiere condiciones óptimas para garantizar la interacción eficaz entre peces, microorganismos y plantas (INTAGRI, 2017).

La acuaponía es un sistema sostenible que ofrece soluciones ambientales, biológicas, alimentarias y económicas al integrar la producción de cultivos hortícolas y acuícolas. Aunque los métodos tradicionales de producción agropecuaria y acuícola han impulsado un buen desarrollo, estos han sido afectados por prácticas inadecuadas, como el uso excesivo de agua, la aplicación de productos químicos, y la generación de grandes cantidades de desechos (Zappernick et al., 2022).

### 3.2.3. Parámetros de Calidad del Agua

Según Somerville et al. (2022), el agua desempeña un papel fundamental en los sistemas acuapónicos, comparándola con la sangre en los organismos vivos. Actúa como el medio a través del cual las plantas obtienen los nutrientes necesarios y los peces reciben oxígeno. Para gestionar adecuadamente un sistema acuapónico, es esencial comprender tanto la calidad del agua como su química básica. Existen cinco parámetros clave en acuaponía y estos son:

**Tabla 1**

*Parámetros de Calidad del Agua en un Sistema Acuapónico*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
pH	6–7
Temperatura del agua	18–30 °C
OD (Oxígeno Disuelto)	5–8 mg/litro
Amoníaco	0 mg/litro
Nitrito	0 mg/litro

Nitrato 5–150 mg/litro

*Nota:* OD se refiere al oxígeno disuelto, y KH a la dureza de carbonatos.

El oxígeno es vital para la vida de los peces, las plantas y las bacterias nitrificantes en un sistema acuapónico. Los niveles de oxígeno disuelto (OD) tienen un impacto inmediato en el bienestar de estos organismos, ya que una baja concentración de OD puede ser letal para los peces en pocas horas. Es crucial mantener niveles adecuados de OD mediante una vigilancia continua y el uso de sistemas de aireación como bombas de aire y agua. La cantidad de oxígeno disuelto en el agua varía inversamente con la temperatura: temperaturas más altas reducen el OD, mientras que temperaturas más bajas lo incrementan. Además, el requerimiento de oxígeno aumenta con la densidad de peces; por lo tanto, se debe prestar especial atención a estos factores al diseñar el sistema (Somerville y FAO, 2015).

Gleason (2016) explica que el pH mide cuántos iones de hidrógeno ( $H^+$ ) hay en una solución, y nos dice cuán ácida o alcalina es. Se mide en una escala que va de 1 a 14, donde un pH de 7 es considerado neutro. Valores menores que 7 indican acidez, mientras que valores mayores que 7 son más alcalinos. A medida que hay más iones de hidrógeno, la solución se vuelve más ácida. En un sistema acuapónico, controlar el pH es crucial para su salud general. Para que las plantas crezcan bien, el pH debe estar entre 6.0 y 6.5, ya que en este rango los nutrientes están más disponibles para ellas. Si el pH está fuera de este rango, las plantas pueden sufrir deficiencias de nutrientes como hierro, fósforo y manganeso. (p. 45).

Las bacterias nitrificantes, que ayudan a convertir el amoníaco en nitratos, también necesitan un pH adecuado para funcionar correctamente. Si el pH cae por debajo de 6.0, estas bacterias no pueden trabajar bien, lo que puede llevar a altos niveles de amoníaco y desestabilizar el sistema. Para los peces, que son una parte importante de los sistemas acuapónicos, el pH ideal está entre 6.0 y 8.5. Si el pH es demasiado alto, puede aumentar la toxicidad del amoníaco, lo que podría afectar negativamente a los peces (AquaTech, 2024).

La temperatura del agua es crucial en un sistema acuapónico, ya que influye en todos los aspectos del entorno. Las temperaturas elevadas pueden reducir el oxígeno disuelto (OD) y aumentar los niveles de amoníaco no ionizado, que es tóxico para los peces. Además, puede limitar la capacidad de las plantas para absorber calcio. Para evitar problemas, es ideal que la temperatura del agua se ajuste a la temperatura ambiente del lugar donde se encuentra el sistema. Cambiar la temperatura del agua puede ser costoso y poco eficiente energéticamente. Por ello, es

recomendable implementar estrategias para minimizar las fluctuaciones de temperatura, como el uso de aislamiento térmico, invernaderos, calentadores solares y estructuras de sombra para proteger todo el sistema, incluidos los tanques de peces, las unidades hidropónicas y los biofiltros (Rakocy, Masser, y Losordo, 2006).

Para la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO,2015) el nitrógeno total (amonio, nitrito, nitrato): El nitrógeno es un nutriente esencial para la vida, formando parte fundamental de las proteínas. En un sistema acuapónico, el nitrógeno entra al sistema a través del alimento para los peces. Parte de este nitrógeno se utiliza para el crecimiento de los peces, mientras que el resto se excreta como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a través de las branquias, la orina o como desechos sólidos. El amoníaco es procesado por bacterias en los biofiltros, convirtiéndose en nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Aunque estas formas de nitrógeno pueden ser tóxicas para los peces, son nutrientes valiosos para las plantas. Por lo tanto, es importante controlar y gestionar estos compuestos para mantener el equilibrio y la salud del sistema acuapónico.

### **3.2.7. Principales elementos**

#### **Tanque de peces**

Será el hogar de los peces durante un tiempo prolongado, debe ser elegido con mucho cuidado. Generalmente, un tanque adecuado debe cumplir con varias características importantes como estas (adaptado de Junge & Antenen, 2020):

- Primero, el volumen del tanque debe ser determinado considerando factores como la cantidad y el tipo de peces, la densidad de cría, la biomasa deseada y el método de estabilización de la temperatura del agua, siendo los tanques más grandes usualmente más estables frente a variaciones de temperatura. La forma del tanque debe ser circular o rectangular, o una combinación de ambas, teniendo en cuenta la especie de pez y la facilidad de drenaje.
- En cuanto a la altura y proporción del tanque, debe permitir al operador trabajar fácilmente con los peces, y esta altura influye también en la columna de agua y la velocidad del flujo hacia el siguiente componente del sistema. Para tanques circulares, la relación entre diámetro y altura debe oscilar entre 3:1 y 6:1 como máximo.

- Los materiales de construcción del tanque deben ser seleccionados en función del costo, la estabilidad, la facilidad de instalación, y su idoneidad para peces y plantas, comúnmente utilizando plásticos como PVC, LDPE, PP y PS, que deben ser resistentes a los rayos UV, tener baja porosidad y ofrecer estabilidad térmica.

- Además, es fundamental que los tanques estén cubiertos para evitar que los peces salten fuera, así como para prevenir la entrada de objetos extraños, y proporcionar sombra que ayude a reducir el sobrecalentamiento, el crecimiento de algas y la evaporación.

Es crucial asegurarse de que el tanque no haya sido usado previamente para transportar sustancias tóxicas, ya que los residuos de estas sustancias pueden disolverse en el agua, afectando negativamente la salud de los peces y el crecimiento de las plantas. Además, se desaconseja el uso de tanques de metal, ya que el agua puede provocar corrosión en el material, generando óxido que podría ser perjudicial para los peces y el entorno acuático (ENVIRONMENT, 2015). Por lo tanto, la elección del tanque debe hacerse con cuidado para evitar contaminaciones y asegurar un ambiente saludable para ambos organismos.

### **Biofiltro**

El biofiltro es fundamental en el proceso de nitrificación, donde se transforma el amoníaco libre, que es tóxico, en nitritos y luego en nitratos no tóxicos, que las plantas pueden absorber. Las bacterias nitrificantes son esenciales para el funcionamiento de este biofiltro, y debido a su alta sensibilidad a cambios en la temperatura y pH, es crucial evitar alteraciones bruscas en el sistema (Junge & Antenen, 2020). Existen diferentes tipos de biofiltros, como los fijos, que incluyen los filtros percoladores, y los móviles, como el filtro de lecho móvil. Los filtros percoladores, en particular, permiten una eficiente desgasificación del agua a medida que esta gotea a través de una pila de portadores de biopelícula, pero tienen la desventaja de requerir altos costos de bombeo para elevar el agua. Por otro lado, el filtro de lecho fijo, además de facilitar la nitrificación, actúa como un dispositivo de eliminación de sólidos, aunque puede obstruirse si la carga orgánica supera la capacidad de degradación natural (Junge & Antenen, 2020).

Un filtro de agua, fabricado generalmente con materiales porosos y carbón activado, está diseñado para purificar el agua que llega desde el acueducto a través de los grifos. Este aparato funciona atrapando y eliminando impurezas como arena, barro, óxido, polvo, hierro, cloro en exceso y bacterias, las cuales podrían ser perjudiciales para la salud (Weebly.com, 2015).

## Cultivo de plantas

Existen tres métodos principales en la hidroponía (adaptado de Junge & Antenen, 2020):

- **Técnica de lecho con sustrato:** Las plantas crecen en un medio sólido que proporciona soporte y nutrientes.
- **Técnica de película de nutrientes (NFT, por sus siglas en inglés):** Las raíces de las plantas están en contacto con una delgada capa de agua nutritiva que fluye constantemente a través de tubos.
- **Técnica de cultivo en aguas profundas (DWC, por sus siglas en inglés) o sistemas de balsa flotante:** Las plantas están suspendidas en un tanque de agua usando una balsa flotante que las mantiene a flote.

La investigación sugiere que las técnicas NFT y DWC ofrecen rendimientos similares, mientras que el método de lecho con sustrato tiende a producir menos. Además, se ha observado que el sistema NFT, aunque efectivo, es menos eficiente en términos de consumo de agua y costos operativos en comparación con otras técnicas (Pantarella, 2012; Maucieri et al., 2018).

### 3.2.8. Ventajas y desventajas de la acuaponía

A pesar de los posibles desafíos financieros a gran escala, la acuaponía destaca por sus significativos beneficios ambientales y sostenibles. La reutilización del agua es uno de los aspectos más destacados, ya que el sistema recircula continuamente el agua entre los cultivos de peces y las plantas, reduciendo la dependencia de nuevas fuentes de agua y ofreciendo una solución eficiente en áreas con limitada disponibilidad hídrica. Además, la fertilización en este sistema es orgánica, ya que los desechos metabólicos de los peces sirven como fuente natural de nutrientes para las plantas. Este enfoque sostenible no solo minimiza la necesidad de fertilizantes químicos, sino que también reduce significativamente el impacto ambiental al disminuir la demanda de tierras de cultivo tradicionales. La acuaponía, en definitiva, se presenta como una alternativa respetuosa con el entorno y eficiente en términos de recursos, promoviendo la producción de alimentos de manera sostenible en lugares con recursos limitados (Somerville et al., 2022).

La acuaponía emerge como un sistema altamente pertinente para la producción alimentaria a nivel mundial, especialmente en contextos donde el precio del suelo es elevado, el recurso hídrico es limitado y los suelos presentan deficiencias nutricionales. En entornos como desiertos, zonas áridas y jardines urbanos, la acuaponía se revela como una solución eficaz y sostenible. Este método innovador destaca por su capacidad para maximizar el rendimiento de alimentos utilizando una cantidad mínima de agua, lo cual resulta fundamental en regiones caracterizadas por la escasez hídrica. Al aprovechar la sinergia entre la acuicultura y la hidroponía, la acuaponía no solo optimiza los recursos disponibles, sino que también ofrece una respuesta práctica a la problemática de suelos empobrecidos. En este sentido, la adopción de la acuaponía representa un enfoque prometedor para abordar los desafíos alimentarios en condiciones ambientales y geográficas adversas, contribuyendo así a la seguridad alimentaria global (Castro, 2023).

Las principales ventajas de la acuaponía frente a los métodos tradicionales de agricultura incluyen su capacidad para ser un sistema sostenible e intensivo de producción de alimentos. Este enfoque permite la producción simultánea de plantas y peces utilizando una única fuente de alimento, lo que lo hace altamente eficiente en el uso del agua. Además, al no depender del suelo, la acuaponía puede implementarse en terrenos no cultivables como desiertos, suelos degradados o salinos, e incluso en zonas urbanas o edificaciones. Otra ventaja significativa es que no requiere el uso de fertilizantes ni pesticidas químicos, facilitando así una producción más "orgánica". Este sistema también ofrece un mayor control sobre la producción, lo que se traduce en rendimientos más altos, mejor calidad y menores pérdidas. Además, al generar pocos residuos y tener un menor riesgo de plagas, enfermedades y contaminantes externos, la acuaponía se posiciona como una opción viable para una producción agrícola más segura y eficiente. Finalmente, existe una amplia cantidad de información disponible sobre este sistema en el mercado, lo que facilita su implementación y podría potencialmente generar nuevos empleos, especialmente en áreas con baja actividad económica (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015).

Sin embargo, la acuaponía también enfrenta algunas debilidades y desafíos importantes. Uno de los principales obstáculos es el alto costo inicial en comparación con la producción tradicional en suelo e incluso con la hidroponía. Además, el éxito en la acuaponía requiere un conocimiento considerable en la producción de peces, bacterias y plantas, ya que los requisitos

para la producción de estos no siempre coinciden. En los sistemas tradicionales de acuaponía, los nutrientes producidos por los peces pueden no ser siempre los óptimos para las plantas, lo que añade complejidad al manejo del sistema (Somerville et al.,2022).

Además, este método no es recomendable en regiones donde las condiciones de temperatura no son óptimas para las especies de peces y plantas que se cultivan. La acuaponía también presenta limitaciones en cuanto a la capacidad de decisión y gestión en comparación con la hidroponía o la acuicultura. Los errores o accidentes pueden causar daños significativos e incluso el colapso del sistema, lo que requiere una supervisión y manejo diario constantes. Por último, este sistema demanda un alto consumo de energía y depende de la disponibilidad confiable de electricidad, alevines y semillas o plántulas, lo que puede ser un desafío en algunas áreas (Goddek et al., 2019).

### **3.2.8. Fuente de agua**

Somerville et al. (2022) mencionan que, en promedio, un sistema de acuaponía utiliza entre el 1% y el 3% del volumen total de agua por día, dependiendo del tipo de plantas y su ubicación. Las plantas absorben agua a través de la evapotranspiración y la retienen en sus tejidos, mientras que se pierde agua adicional por evaporación y salpicaduras. Por lo tanto, es necesario reponer el agua periódicamente. La fuente de agua utilizada puede afectar la composición química del sistema. Por ello, es fundamental medir el pH, la dureza, la salinidad, el cloro y los contaminantes en cualquier nueva fuente de agua.

La recolección de agua de lluvia es una excelente opción para acuaponía, ya que suele tener un pH neutro, baja dureza y casi nula salinidad, lo que es ideal para mantener el equilibrio del sistema y evitar la acumulación de sales, consiste en almacenar agua de lluvia para poder utilizarla en la temporada seca o cuando sea necesario (Hernández, 2022).

### **3.3 Hidroponía**

La hidroponía es una técnica de cultivo que no requiere tierra, permitiendo el crecimiento de plantas en soluciones nutritivas. Aunque el cultivo hidropónico tiene sus raíces en el pasado, se remonta a tiempos antiguos, posiblemente incluso a los primeros días de la formación de la Tierra. Se cree que la práctica comenzó con el cultivo en grandes cuerpos de agua primitivos. Los primeros ejemplos de cultivo sin suelo pueden encontrarse en la antigua Babilonia, famosa por los Jardines Colgantes, uno de las siete maravillas del mundo antiguo. Estos jardines,

construidos por el rey Nabucodonosor II entre 605 y 562 a.C. para su esposa Amytis, eran una muestra temprana de técnicas que podrían considerarse hidroponía. Aunque el sistema exacto de riego utilizado en estos jardines no está completamente documentado, se sabe que consistían en terrazas escalonadas regadas por una noria que trasladaba agua desde el río Éufrates. A pesar de diversas interpretaciones arquitectónicas, el término "Jardines Colgantes" se refiere más a un concepto de terrazas sobresalientes en lugar de estructuras realmente colgantes (Beltrano y Giménez, 2015).

### **3.3.1 Sistema Hidropónico**

La hidroponía es un método de cultivo en el que las plantas crecen sin necesidad de suelo, obteniendo los nutrientes necesarios directamente del agua. Entre las ventajas de esta técnica se destacan la reducción del espacio necesario para el cultivo, la mejora en la higiene de los cultivos, mayor comodidad para el trabajador, la optimización del uso del agua, la posibilidad de cultivar en áreas sin tierra o con suelos de baja calidad, y la capacidad de producir en diversos climas. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones, como la necesidad de una inversión inicial significativa, una mayor demanda de especialización, dependencia energética y el requisito de disponer de agua de alta calidad (Castañares, 2020).

La hidroponía es una técnica intensiva de cultivo de plantas que se distingue por el control preciso del suministro de agua y nutrientes, ajustando las concentraciones y proporciones de elementos esenciales como N, P, K, Ca, Mg, y S, para optimizar el crecimiento de las plantas. En lugar de suelo, se utilizan sustratos inertes a los que se les añade de manera constante una solución nutritiva elaborada con fertilizantes comerciales. Este enfoque crea un ambiente físico, químico y sanitario óptimo para el desarrollo de los cultivos (Sagacarpa, 2007).

### **3.3.2 Ventajas del Sistema Hidropónico**

Beltrano (2015) menciona que la hidroponía ofrece múltiples beneficios que la hacen una opción atractiva para el cultivo de plantas. Entre las ventajas destacan:

- La producción de cultivos libres de parásitos, bacterias, hongos y contaminantes, lo que contribuye a una mayor higiene y sanidad en la producción. Además, se logran reducir los costos de producción, se alcanza independencia de las condiciones meteorológicas, y se pueden obtener cosechas fuera de temporada.
- Este método también requiere menos espacio y capital para una mayor producción, permite un ahorro significativo de agua, que puede ser reciclada, y

reduce el uso de fertilizantes e insecticidas. Al eliminar la necesidad de maquinaria agrícola como tractores, se simplifica el manejo de los cultivos, lo que se traduce en un entorno más limpio e higiénico.

- La hidroponía también permite una mayor automatización y precocidad en los cultivos, lo que resulta en productos de mejor calidad y en altos rendimientos por unidad de superficie.
- El proceso de cultivo se acelera, permitiendo múltiples cosechas de la misma especie en un año, y se consigue una estandarización en el tamaño y la calidad del fruto gracias al control sobre la nutrición vegetal a través de soluciones nutritivas.
- Una de las grandes ventajas de la hidroponía es que se puede implementar en espacios pequeños, como en casa, en el jardín o en la azotea, permitiendo el cultivo de hortalizas, flores, pequeños arbustos o frutillas.
- Este método no solo proporciona productos saludables, sino que también actúa como una forma de terapia, ayudando a reducir el estrés. Comparado con el cultivo en suelo, la hidroponía permite una mayor concentración de plantas por metro cuadrado, como se observa en el caso de fresas y lechugas, y en el cultivo de forraje hidropónico.
- Además, se logra una notable reducción en el tiempo de desarrollo de las plantas; por ejemplo, mientras que una lechuga cultivada en suelo puede tardar alrededor de 3.5 meses hasta estar lista para el consumo, en hidroponía utilizando la técnica de raíz flotante, el tiempo se reduce a solo 1.5 meses desde la germinación.
- El uso eficiente del agua es otro aspecto fundamental, ya que en la hidroponía se evita la infiltración de agua en las capas inferiores del suelo y se minimiza la evapotranspiración al cultivar en ambientes controlados con alta humedad relativa.
- Como resultado, los cultivos hidropónicos presentan una mejor calidad y sanidad, lo que es altamente valorado por los consumidores. La importancia de utilizar sustratos desinfectados se destaca en este método, ya que la hidroponía permite trabajar en un entorno estéril, garantizando productos de alta calidad y seguros para el consumo.

### 3.3.3 Requerimientos del Sistema Hidropónico

Para (Castañares, 2020) menciona que los requerimientos importantes en este sistema son :

- El pH en sistemas hidropónicos, es común que, debido a la alcalinidad natural del agua y la reacción de los fertilizantes, sea necesario reducir el pH. Esto se logra generalmente mediante la adición de ácido nítrico o fosfórico, ambos de uso agrícola.
- Es importante no ajustar el pH directamente en el tanque de nutrientes; en su lugar, se recomienda tomar un pequeño volumen de la solución (1 a 2 litros), agregar el ácido de manera gradual con una jeringa, y medir el pH con un peachímetro hasta alcanzar el nivel deseado. Luego, la cantidad de ácido utilizada se extrapola para ajustar el pH en todo el tanque.
- La conductividad eléctrica (CE), que mide la concentración de sales disueltas en el agua, es otro parámetro crucial en la hidroponía. Se mide utilizando un conductímetro, con resultados expresados en unidades como milisiemens por centímetro (mS/cm), decisiemens por metro (dS/m), o microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S/cm}$ ).
- Una baja CE puede indicar insuficiente concentración de nutrientes, lo que puede retardar el crecimiento de las plantas. Por el contrario, una CE demasiado alta puede causar toxicidad y competencia entre nutrientes. La CE debe ser monitoreada diariamente, y se ajusta agregando nutrientes para aumentarla o añadiendo agua para disminuirla.
- La temperatura de la solución nutritiva también es fundamental, ya que influye en la disponibilidad de nutrientes, el nivel de oxígeno disuelto y la actividad de las raíces. Idealmente, la temperatura debería estar entre 20 y 25 °C, cercana a la temperatura ambiente. En días calurosos, una temperatura demasiado baja en la zona radicular puede estresar a las plantas y causar la precipitación de sales, dificultando su absorción y ralentizando el crecimiento.
- Por último, la oxigenación de la solución nutritiva es esencial para el correcto funcionamiento de las raíces, especialmente en lo que respecta a la absorción de agua y nutrientes. En sistemas de raíz flotante, la oxigenación se puede lograr utilizando bombas aireadoras o centrífugas, mientras que en sistemas NFT (Nutrient Film Technique), el movimiento de la solución y su retorno al tanque son generalmente suficientes para mantener un buen nivel de oxígeno.

### 3.4 Lechuga

La lechuga es una planta herbácea que puede ser anual o bienal, caracterizada en su etapa juvenil por la presencia de un jugo lechoso en sus tejidos, que disminuye a medida que la planta envejece. Sus raíces principales, encargadas de la absorción, se encuentran a profundidades de

entre 5 y 30 cm, aunque la raíz principal puede alcanzar hasta 1,80 m de longitud, lo que explica su notable resistencia a la sequía. Esta planta puede crecer hasta 80 cm de altura y pertenece a la clase Magnoliopsida, del orden Asterales, dentro de la familia Asteraceae, género *Lactuca L.* y especie *Sativa L.* (Alvarado y Chávez, 2001).

La lechuga es una hortaliza anual que se consume principalmente fresca, formando parte del grupo de hortalizas de hoja. Su relevancia ha crecido en los últimos años debido a la diversificación de variedades, que incluyen tipos como la Batavia, la lechuga lisa o mantequilla, la Romana o Cos, así como minihortalizas tipo Baby Leaf y variedades foliares lisas y crespas en diferentes tonos de verde, rojo y morado. Además, su importancia ha aumentado con el crecimiento del mercado de la cuarta gama, donde las diferentes clases de lechuga son comúnmente empacadas para consumo inmediato (Jaramillo, Aguilar y Tamayo, 2016, pág. 7).

### **3.4.1 Requerimientos de la Lechuga**

Taiz y Zeiger (2019) indican que de los 92 elementos naturales que se conocen, solo 17 son considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo óptimo de la mayoría de las plantas. Estos elementos se dividen en dos categorías: macronutrientes y micronutrientes. Los macronutrientes, que son necesarios en mayores cantidades, incluyen Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Azufre (S), y Magnesio (Mg). Estos son fundamentales para procesos vitales como la fotosíntesis, la síntesis de proteínas y la estructura celular. Por otro lado, los micronutrientes, aunque requeridos en cantidades menores, son igualmente cruciales para la salud y el desarrollo de las plantas. Estos incluyen Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Boro (B), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Cobalto (Co), y Cloro (Cl). Cada uno de estos elementos desempeña un papel específico y vital en la fisiología de la planta, contribuyendo a su crecimiento, resistencia a enfermedades, y producción de frutos de calidad (p. 95).

### **3.5 Tilapia Roja (*Oreochromis sp*)**

La Tilapia roja (*Oreochromis sp.*) se destaca como una de las especies acuáticas más cultivadas en Colombia debido a sus notables características de crecimiento y adaptación. Esta especie es conocida por su rápido desarrollo y su habilidad para prosperar con dietas suplementarias. Su alta tolerancia a densidades de cultivo elevadas y a condiciones adversas, como bajas concentraciones de oxígeno y variaciones en el pH del agua, la convierte en una

opción popular para la acuicultura. Su capacidad para manejar estas condiciones sin complicaciones hace que la Tilapia roja sea considerada una especie de manejo relativamente sencillo. Soporta bien las manipulaciones durante las etapas de siembra, cosecha y manejo de reproductores, lo cual es crucial para los agricultores que buscan una especie resistente y adaptable (Betancur , 2018).

Desde el punto de vista morfológico, la Tilapia roja presenta características distintivas que la hacen adecuada para diferentes entornos acuáticos. Su cuerpo está provisto de un orificio nasal a cada lado de la cabeza, lo que facilita el paso del agua a través de la cavidad nasal para la respiración. Aunque su cuerpo no es extremadamente alargado, está equipado con aletas tanto pares (pectorales y ventrales) como impares (dorsales, caudal y anal). La boca es amplia y protractil, con labios gruesos, y su mandíbula posee dientes cónicos, que en algunos casos incluyen incisivos. Estas adaptaciones morfológicas no solo contribuyen a su eficacia en el cultivo, sino que también destacan su versatilidad y robustez, factores que refuerzan su popularidad y éxito en la acuicultura (Saavedra, 2006).

### **3.5.1 Calidad del Agua**

La calidad del agua es fundamental para el desarrollo y bienestar de las especies en cultivos acuícolas, afectando directamente tanto el crecimiento de los peces como la calidad del producto final. Es crucial realizar un seguimiento y control preciso de parámetros como el pH y la temperatura para asegurar el buen estado de los organismos acuáticos y mejorar la productividad. La falta de monitoreo adecuado y la adopción de prácticas incorrectas pueden llevar al deterioro del agua, lo que a su vez perjudica el crecimiento de los peces, aumenta el riesgo de infecciones y afecta la eficiencia del proceso comercial (Feest, Gutierrez, y Briceño, 2018). Los sistemas de recirculación de agua (RAS) tienen la ventaja de permitir un control más riguroso de la calidad del agua debido a su diseño cerrado o semi-cerrado. No obstante, dado que estos sistemas no cuentan con un flujo de agua abierto, existe un mayor riesgo de que la calidad del agua se degrade, afectando negativamente a las especies cultivadas y requiriendo una supervisión constante para prevenir problemas (Feest, Gutierrez, y Briceño, 2018).

#### **3.5.1 Requerimientos de Calidad del Agua para la Tilapia Roja (*Oreochromis sp*)**

La Tilapia roja (*Oreochromis sp*), un híbrido derivado del cruce de diversas especies africanas e israelíes, destaca por sus características zootécnicas que le confieren ventajas significativas sobre otras

especies de consumo. Para asegurar un cultivo óptimo de Tilapia roja, es crucial cumplir con ciertos requisitos específicos del agua, los cuales se detallan a continuación adaptado de (Betancur, 2018):

**Tabla 2**

*Requerimientos para un Cultivo Optimo de Tilapia Roja*

<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Óptimo</b>	<b>Máximo</b>
Temperatura (°C)	18	28 – 32	42
pH	4.5	6.0 – 8.5	10.5
Salinidad (ppm)	330	500	700
Amonio (ppm)	0	0	2.0
Nitritos (ppm)	0	0	5
Nitratos (ppm)	0	0	300 - 400

## CAPÍTULO IV

### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 4.1. Materiales

##### Material vegetativo

- Plántulas de lechuga francesa (*Lactuca sativa*) (V1)
- Plántulas de lechuga Criolla (*Lactuca sativa* L.) (V2)

##### Material acuapónico

- Tilapia roja de 3 meses de edad, 5 cm con un peso de 15 gramos

##### Infraestructura para la investigación

- Invernadero con sistema hidropónico
- Tanque para sistema de biofiltro
- Tapas de botella (como material de biofiltro)
- Tubos para instalación del sistema

##### Materiales de papelería

- Libreta de campo
- Letreros para identificación
- Marcadores permanentes
- Esferos
- Flexómetro.

##### Máquinas y equipos

- Bomba de agua para circulación
- Potenciómetro
- Conductímetro
- Balanza electrónica
- Medidor de clorofila SPAD 502 Plus
- SMART3 colorimeter

##### Insumos

- Desinfectante hipoclorito
- Solución nutritiva fórmula HHP (F2)

- Alimento de peces

## 4.2. Metodología

### 4.2.1. Ubicación del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la Granja Experimental ECAA de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra (PUCE Ibarra). Siendo de relevancia las instalaciones para el estudio de sistemas acuapónicos, con un entorno adecuado para la implementación y observación de prácticas sostenibles de acuaponía.

**Tabla 3**

*Ubicación y Registro Climatológico del Área de Estudio*

<b>UBICACIÓN POLÍTICA</b>	
<b>Provincia</b>	Imbabura
<b>Cantón</b>	Ibarra
<b>Parroquia</b>	San Francisco
<b>Sector</b>	La Victoria
<b>UBICACIÓN GEOGRÁFICA</b>	
<b>Latitud</b>	0° 21'01"N
<b>Longitud</b>	78°06'24"W
<b>Altitud</b>	2221 msnm
<b>CARACTERÍSTICAS AGROCLIMÁTICAS DEL LUGAR</b>	
<b>Temperatura media anual</b>	17.0 °C
<b>Temperatura mínima anual</b>	5.2 °C
<b>Temperatura media mínima</b>	11.0 °C
<b>Precipitación anual acumulada</b>	763.0 mm

**Humedad relativa media**

80.89 %

*Nota.* Datos adaptados de *Anuario agroclimático 2016-2023* (Recalde, Arciniegas y Pusdá, 2024). Centro de Publicaciones PUCE.

## Figura 1

*Mapa de Ubicación del Invernadero Granja experimental La Victoria PUCE-SI*



*Nota.* Tomado de Google Earth 2021

### 4.2.2. Etapas del Proceso de Investigación

La presente investigación se realizó en 4 etapas

Etapa 1 Adecuación de infraestructura de sistema de acuaponía e hidroponía

Etapa 2. Análisis de soluciones de agua y plantas de lechuga en laboratorio

Etapa 3. Evaluación del desarrollo morfo fisiológico de las plantas de lechuga

Etapa 4. Etapa de gabinete

#### **4.2.1.1. Etapa 1 Adecuación de Infraestructura de Sistema de Acuaponía e Hidroponía Implementación de Sistema Acuapónico en la Granja de la PUCESI**

Se estableció un sistema acuapónico en el invernadero dedicado a la cría de tilapias en la Granja de la PUCESI, integrando un estanque de tilapias con estructuras de PVC (sistema hidropónico) y biofiltro para optimizar la gestión del agua y mejorar la calidad del entorno acuático con las siguientes actividades:

##### **Preparación del invernadero**

- Se realizó la limpieza y desinfección del invernadero
- Se ubicó y evaluó el sistema acuapónico con el estanque de tilapias dentro del invernadero.
- Se limpió y aseguró el área de las instalaciones de las estructuras de PVC y de los tanques de acuaponía.

##### **Instalación de estructuras de PVC**

- Se trasladó las estructuras de PVC, destinadas a la hidroponía al invernadero.
- Se implementó instalaciones de tubería que permitió la circulación eficiente del agua que permite reinstalar el sistema hidropónico para el crecimiento de las plantas de lechuga con las variedades en estudio.

##### **Colocación de tanques**

- Se instalaron dos tanques, uno destinado al biofiltro y otro para las tilapias.
- Se ubicaron estratégicamente los dos tanques para facilitar las conexiones y el flujo del agua.

##### **Preparación del biofiltro**

- Se recolectó tapas de botella de material utilizado para biofiltradores tomando en cuenta lo que mencionan Somerville et al. (2022) que hay un tipo de filtro comúnmente utilizado en acuaponía son las Bioballs®, que se pueden adquirir en tiendas especializadas en acuicultura, aunque también hay opciones genéricas similares disponibles. Estos filtros están diseñados para funcionar como biofiltros efectivos, ya que están hechos de pequeños artículos plásticos con formas especiales que proporcionan una superficie extremadamente amplia en relación con su volumen, aproximadamente entre 500 y 700 m<sup>2</sup> por metro cúbico. Además de las Bioballs®, se pueden usar otros materiales para la filtración, como grava

volcánica, tapas de botellas plásticas, redes o virutas de cloruro de polivinilo (PVC).

- Se aseguró que las tapas de botellas estén libres de residuos desinfectando antes de su colocación en el tanque de biofiltro.
- Se realizó conexiones entre el estanque de tilapias y el tanque de biofiltro utilizando una bomba de agua para transferir y recircular el agua en la tubería de las estructuras de PVC (sistema hidropónico).
- Se implementó mangueras y válvulas para controlar el flujo del agua entre los componentes del sistema.

### **Pruebas y ajustes**

- Se realizó pruebas de flujo de agua para asegurar un funcionamiento adecuado del sistema acuapónico e hidropónico.
- Se calibraron las válvulas para optimizar la circulación y la filtración en sistema acuapónico para el cultivo de lechugas.

### **Simbra de lechugas**

Se utilizaron vasos desechables a los cuales se les hicieron perforaciones. Dentro de cada vaso, se colocó una esponja rectangular semi cortada, diseñada para alojar la plántula de lechuga. Esta configuración permite ubicar los vasos en los orificios de los tubos de PVC, destinados a sistemas de acuaponía e hidroponía.

#### **4.2.1.2. Etapa 2 Análisis de soluciones de agua y plantas de lechuga en laboratorio**

En el laboratorio, se llevó a cabo una evaluación de la absorción de nutrientes en las dos variedades de lechuga mediante análisis foliar. Se enfocaron en los minerales Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Para esta evaluación, se utilizaron kits de reactivos SMART3 colorímetro para medir los niveles de estos elementos.

El proceso consistió en las siguientes etapas:

- **Muestra de Lechuga:**

Se tomaron 400 gramos de masa aérea de lechuga de cada variedad correspondiente a los dos sistemas de cultivo, hidropónico y acuapónico.

En el laboratorio, se realizaron cenizas a partir de las muestras de masa aérea.

Con el extracto obtenido de las cenizas, se usaron los kits de reactivos SMART3 colorímetro para medir los niveles de N, P y K.

- **Análisis del Agua:**

Se tomaron muestras de agua del sistema acuapónico cada tres días durante un mes.

Se midieron los niveles de nitritos y nitratos en estas muestras utilizando el SMART3 colorímetro.

- **Medición de Parámetros del Agua:**

Se determinaron diariamente durante un mes el pH, la Conductividad Eléctrica (CE) y la temperatura de las muestras de agua tomadas tanto del sistema hidropónico como del acuapónico.

Estas mediciones se realizaron con equipos de laboratorio proporcionados por la Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales (ECAA) de la PUCE Ibarra.

Este procedimiento permitió evaluar de manera integral la absorción de nutrientes en las lechugas y monitorizar la calidad del agua en los sistemas de cultivo estudiados.

#### **4.2.1.3. Etapa 3. Evaluación de los Parámetros Morfo Fisiológicos de las Plantas de Lechuga en el Sistema**

- **Peso de Masa Radicular (g)**

El peso de las raíces de cada planta de lechuga se midió al inicio y al final del ciclo de investigación utilizando una balanza electrónica de precisión. Esta medición precisa permitió evaluar el desarrollo de las raíces en los diferentes sistemas de cultivo (Gómez & Álvarez, 2021).

- **Largo de Raíz (cm)**

La longitud de la raíz de cada planta experimental se determinó al inicio y al final del estudio utilizando un flexómetro. Esta medición se tomó desde la base del tallo hasta la punta de la raíz más larga, siguiendo los protocolos establecidos por la FAO (2019).

- **Largo de las Hojas (cm)**

La longitud de las hojas se midió al inicio y al final del ciclo de investigación utilizando un flexómetro. Estas mediciones se realizaron en la fase de cosecha para evaluar el crecimiento de las hojas en las diferentes variedades y sistemas de cultivo, según lo descrito por Pérez et al. (2018).

- **Peso de Masa Aérea (g)**

El peso de la parte aérea de cada planta se evaluó al inicio y en la fase de cosecha del ciclo de investigación. Se utilizó una balanza electrónica para obtener medidas precisas del desarrollo de la biomasa aérea (Gómez & Álvarez, 2021).

- **Clorofila**

El contenido de clorofila en las hojas se midió al final del estudio utilizando el medidor de clorofila SPAD 502 Plus de Minolta. Cada planta fue evaluada para determinar sus niveles de clorofila, siguiendo el protocolo de medición establecido por Minolta (2017).

#### **4.2.1.4. Etapa 4. Etapa de Gabinete**

En la etapa de gabinete se realizó la sistematización y ordenación de los datos que se obtuvo en el trabajo de campo que se lo recolectó en matrices del cuaderno de campo, para su validación e interpretación de los resultados y proceder a la redacción e informe final del documento de la tesis (Sánchez et al., 2018).

### **4.3. Procesamiento de Datos**

Los datos obtenidos en campo se ordenaron utilizando el programa Microsoft Excel 2019, también R Studio donde se cumplió el análisis estadístico de cada variable dependiente estudiada, se inició con la prueba de análisis de varianza (ANOVA), estadísticamente se determinó la significancia de los tratamientos investigados mediante la prueba de Tukey (Jiménez y Pérez, 2023).

### **4.4. Diseño Experimental**

Para la ejecución de la investigación se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial A x B, (2x2) donde se evaluó 4 tratamientos con 4 repeticiones, los tratamientos propuestos del factor A, sistema acuapónico (residuos metabólicos de tilapia roja) y sistema hidropónico (solución nutritiva) factor B con dos variedades de lechuga (francesa y criolla) (Unocc, 2022).

### **4.5. Factores y Niveles de Estudio de la Investigación**

#### **Tabla 4**

### Factores, Niveles de Estudio

Factores	Niveles	Descripción
A: Sistemas	F1	Sistema acuapónico (residuos metabólicos de tilapia roja)
	F2	sistema hidropónico (solución nutritiva)
B: Variedades	V1	Variedad de lechuga francesa ( <i>Lactuca sativa</i> )
	V2	Variedad de lechuga criolla ( <i>Lactuca sativa L.</i> )

*Nota.* Esta tabla muestra lo factores, niveles y la descripción de estudio.

## 4.6. Tratamientos

### 4.6.1. Tratamiento 1 (F1)

Se empleó un tanque de 500 litros de capacidad, albergando 70 tilapias rojas de 3 meses de edad con un promedio de peso de 10 a 15 g y alimentadas 3 veces al día con 30 g de “alimento comercial”. El tanque rectangular se conectó a otro tanque de 500 litros destinado al proceso de biofiltro mediante tapas de envases desechables. Dos conexiones derivaron agua del tanque hacia dos módulos de hidroponía, donde se cultivaron lechuga de la variedad francesa y criolla, respectivamente. Se utilizó una bomba para transferir agua desde el tanque de tilapias hasta el tanque de biofiltro y otra bomba para distribuir el agua a los módulos. Donde se logró el sistema de recirculación (Somerville, 2022).

### 4.6.2. Tratamiento 2 (F2)

Se instalaron dos módulos de hidroponía. En el primer módulo se cultivó lechuga francesa y en la segunda lechuga criolla, utilizando la fórmula “Huerta Hidropónica Popular” (HHP), para la solución nutritiva en ambos casos. Cada módulo tiene un tanque de 25 litros de capacidad para la alimentación de las plantas. La preparación de la solución nutritiva se llevó a cabo meticulosamente siguiendo la fórmula “Huerta Hidropónica Popular” (HHP). La solución A consistió en 56 g de fosfato monoamónico, 346, 6 g de nitrato de calcio y 183 g de nitrato de

potasio, mientras que la solución B incluyó 123 g de sulfato de magnesio, 0,12 g de sulfato de cobre, 0,62 g de sulfato de manganeso, 0,3 g de sulfato de zinc, 1,5 g de ácido bórico, 0,005 g de molibdato de amonio y 12,5 g de sulfato de hierro. Tras un reposo de tres días, se añadieron 125 ml de solución A, a cada tanque, seguido de 50 ml de solución B después de 15 minutos, completando así la preparación de la solución nutritiva para el sistema hidropónico según la fórmula HHP (Marulanda y Izquierdo, 2003).

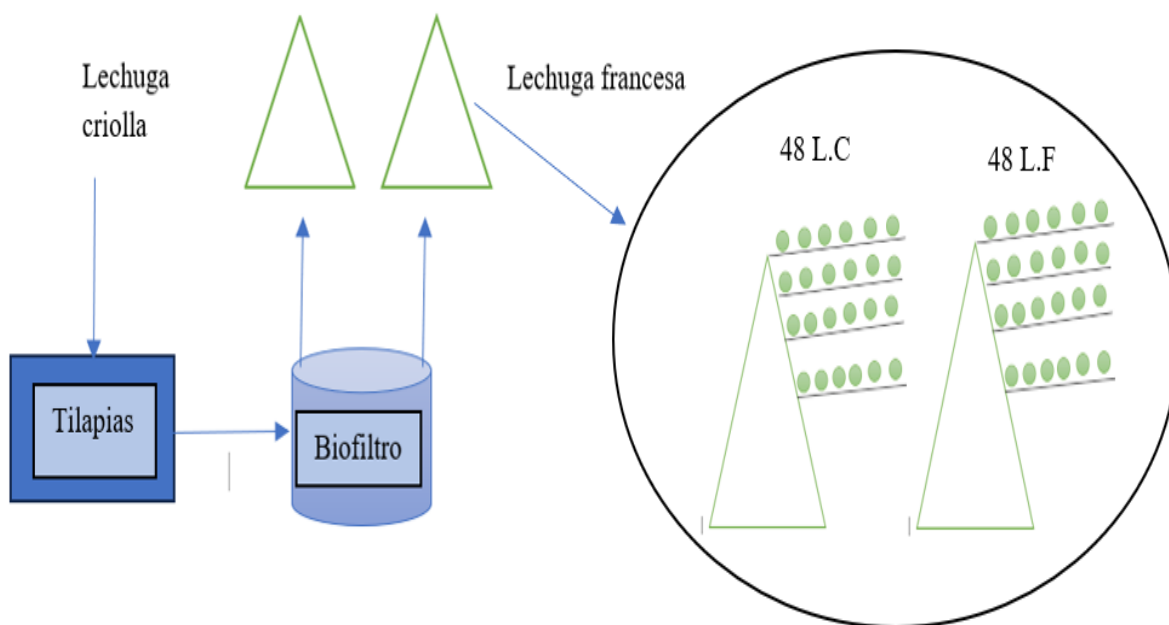
**Tabla 5**

*Esquema de Tratamientos del Experimento*

<b>Tratamientos</b>	<b>Códigos</b>	<b>Descripción</b>
<b>T1</b>	F1V1	Solución de agua de sistema acuapónico más lechuga francesa
<b>T2</b>	F1V2	Solución de agua de sistema acuapónico más lechuga criolla
<b>T3</b>	F2V1	Sistema hidropónico con solución nutritiva más lechuga francesa
<b>T4</b>	F2V2	Sistema hidropónico con solución nutritva más lechuga criolla

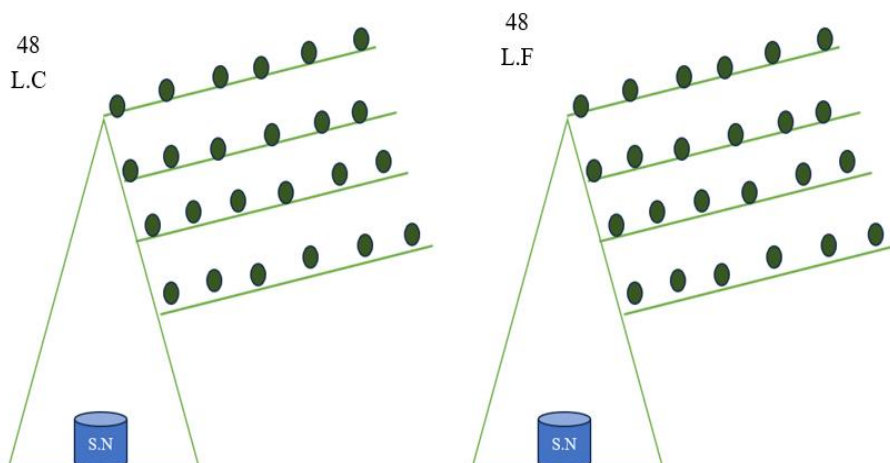
#### **4.7. Parcela absoluta**

Para la presente investigación se consideró a la parcela absoluta el invernadero de hidroponía de la granja experimental ECAA, en donde se instaló el sistema de acuaponía del cultivo de tilapias y el sistema hidropónico con solución nutritiva fórmula “Huerta Hidropónica Popular” (HHP) aplicadas al cultivo de las dos variedades de lechugas con condiciones controladas de temperatura, humedad, luminosidad y plagas y enfermedades (López y González, 2016).

**Figura 2***Diseño de Sistema Acuapónico y Distribución de Unidades Experimentales*

La figura 2 muestra el esquema del sistema acuapónico y los elementos utilizados, muestra también como fueron distribuidas las unidades experimentales, en cada lado de la estructura fueron ubicadas 24 unidades.

**Figura 3** *Diseño de Sistema Hidropónico y Distribución de Unidades Experimentales*



La imagen 3 muestra el esquema del sistema hidropónico y la distribución de unidades experimentales, donde se colocaron 24 unidades por lado y de cada variedad respectivamente en cada módulo.

#### 4.9. Variables evaluadas

##### 4.9.1. Variable/s Independiente/s

- V1 Lechuga Francesa (*Lactuca sativa*)
- V2 Lechuga Criolla (*Lactuca sativa* L.)

##### 4.9.2. Variables dependientes

- **Peso de Masa Radicular (g)**

El peso de las raíces de cada planta de lechuga se midió al inicio y al final del ciclo de investigación utilizando una balanza electrónica de precisión. Esta medición precisa permitió evaluar el desarrollo de las raíces en los diferentes sistemas de cultivo (Gómez y Álvarez, 2021).

- **Largo de Raíz (cm)**

La longitud de la raíz de cada planta experimental se determinó al inicio y al final del estudio utilizando un flexómetro. Esta medición se tomó desde la base del tallo hasta la punta de la raíz más larga, siguiendo los protocolos establecidos por la FAO (2019).

- **Largo de las Hojas (cm)**

La longitud de las hojas se midió al inicio y al final del ciclo de investigación utilizando un flexómetro. Estas mediciones se realizaron en la fase de cosecha para evaluar el crecimiento

de las hojas en las diferentes variedades y sistemas de cultivo, según lo descrito por Pérez et al. (2018).

- **Peso de Masa Aérea (g)**

El peso de la parte aérea de cada planta se evaluó al inicio y en la fase de cosecha del ciclo de investigación. Se utilizó una balanza electrónica para obtener medidas precisas del desarrollo de la biomasa aérea (Gómez & Álvarez, 2021).

- **Clorofila**

El contenido de clorofila en las hojas se midió al final del estudio utilizando el medidor de clorofila SPAD 502 Plus de Minolta. Cada planta fue evaluada para determinar sus niveles de clorofila, siguiendo el protocolo de medición establecido por Minolta (2017).

## CAPÍTULO V

### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 5.1. Variables

##### 5.1.1. Peso de Masa Radicular (g)

El análisis de varianza (ANOVA) de la tabla 6 evalúa el peso de la masa radicular en dos variedades de lechuga, francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa L.*), bajo diferentes sistemas de cultivo, reveló resultados significativos que destacan la influencia de estos factores agronómicos. Los resultados indicaron una diferencia altamente significativa entre los sistemas de cultivo evaluados ( $F(1, 12) = 11.138, p = 0.00592$ ), demostrando que el tipo de sistema, ya sea acuapónico (F1) o hidropónico (F2), afecta de manera significativa la masa radicular de las plantas de lechuga. Así mismo, se observó una diferencia considerable entre las variedades de

lechuga ( $F(1, 12) = 42.324, p < 0.0001$ ), subrayando la importancia de la variedad específica, ya sea francesa (v1) o criolla (v2), en la determinación del peso de la masa radicular. La interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga mostró una tendencia a ser significativa ( $F(1, 12) = 4.434, p = 0.05696$ ), sugiriendo que la combinación específica de sistema y variedad podría influir en la respuesta agronómica observada, aunque esta interacción no alcanzó un nivel de significancia convencional.

**Tabla 6** *Análisis de Varianza de la Variable Masa Radicular*

F. V	GL	SC	CM	F value	P-value
Sistema	1	213.3	213.3	11.138	0.00592 **
Variedad	1	810.5	810.5	42.324	$2.91 \times 10^{-5}$ ***
Sistema: Variedad	1	84.9	84.9	4.434	0.05696 .
Residuales	12	229.8	19.2		
C.V	14.15%				

*Nota.* FV = Fuentes de variación, GL = Grados de libertad, SC = Suma de cuadrados, CM = Cuadrados medios, F value = Valor de la Prueba F (cociente de dos varianzas), P-value = Valor P. ,\*:  $P < 0.05$  (significativo), \*\*:  $P < 0.01$  (muy significativo), .:  $P < 0.1$  (marginamente significativo).

### **Comparación de sistemas de la variable masa radicular**

La tabla 7 revela los resultados obtenidos indicando diferencias significativas en el peso promedio de la masa radicular entre ambos sistemas. Concretamente, se observó que las plantas de lechuga cultivadas en el sistema acuapónico mostraron un peso promedio de la masa radicular significativamente mayor en comparación con aquellas cultivadas en el sistema hidropónico. La diferencia estadísticamente significativa encontrada entre los dos sistemas de cultivo sugiere que el sistema acuapónico puede promover un desarrollo más robusto de la masa radicular en las plantas de lechuga evaluadas en este estudio.

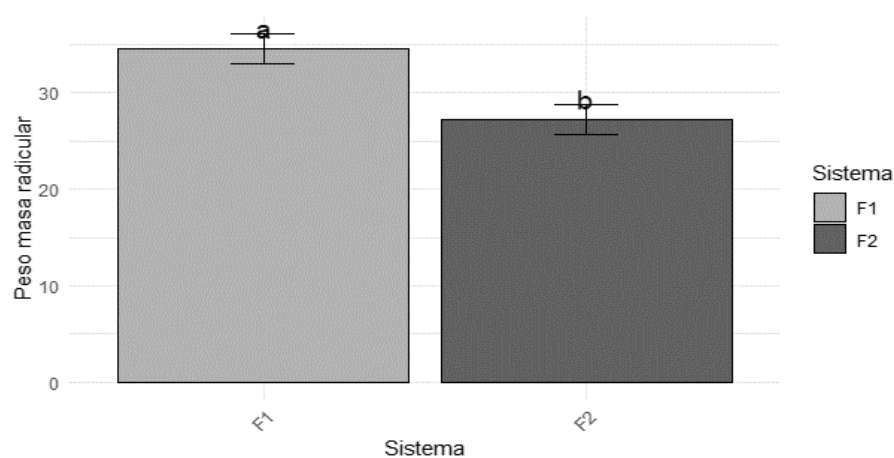
**Tabla 7**

*Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Acuapónico e Hidropónico para la Variable de Masa Radicular*

Sistema	Peso (g)	
Acuapónico	34.57	a
Hidropónico	27.27	b

**Figura 4**

*Comparación de Sistemas Acuapónico e Hidropónico para la Variable de Masa Radicular*



**Comparación de variedades de la variable masa radicular**

La tabla 8 y gráfico 5 muestran la comparación del peso promedio de la masa radicular entre dos variedades de lechuga, francesa (V1) y Criolla (V2). Los resultados indican que la variedad francesa tiene un peso promedio de masa radicular significativamente mayor (38,04 g) en comparación con la variedad Criolla (23,80 g). Las letras 'a' y 'b' junto a los valores indican que estas diferencias son estadísticamente significativas, con 'a' representando un valor significativamente mayor que 'b'.

El análisis comparativo del peso de la masa radicular entre dos variedades de lechuga, francesa (V1) y Criolla (V2), reveló diferencias significativas. La variedad francesa presentó un peso promedio de masa radicular de 38,04 g, mientras que la variedad criolla mostró un peso promedio de 23,80 g. Según la prueba Tukey, estas diferencias son estadísticamente significativas, con la variedad francesa superando considerablemente a la variedad criolla en términos de desarrollo radicular. Estos resultados sugieren que la variedad francesa tiene una mayor capacidad para desarrollar una masa radicular más robusta en comparación con la variedad criolla.

### **Tabla 8**

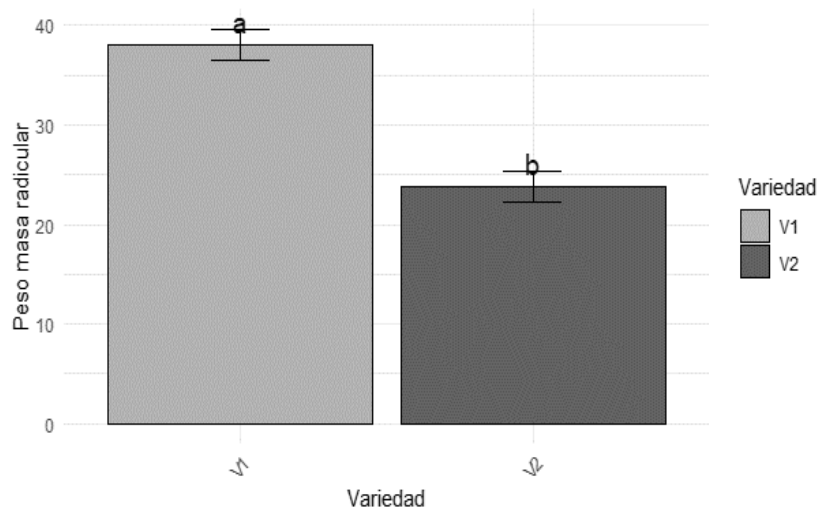
*Prueba de Tukey: Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Masa*

*Radicular*

Variedades	Peso (g)
(V1) Francesa	38,04 a
(V2) Criolla	23,80 b

### **Figura 5**

*Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Masa Radicular*



### Interacción Sistema-Variedad de la variable masa radicular

La tabla 9 y gráfico 6 muestra el análisis de la interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga mostró diferencias significativas en el peso de la masa radicular. La lechuga francesa cultivada en el sistema acuapónico presentó el mayor peso promedio de masa radicular (43.99 g), significativamente mayor que las demás combinaciones. La misma variedad en el sistema hidropónico tuvo un peso menor (32.08 g), pero aún superior a la lechuga criolla en ambos sistemas. La lechuga criolla en el sistema acuapónico mostró un peso de 25.15 g, mientras que en el sistema hidropónico tuvo el menor peso (22.45 g). Estos resultados indican que la combinación de la variedad francesa con el sistema acuapónico es la más efectiva para maximizar el desarrollo radicular.

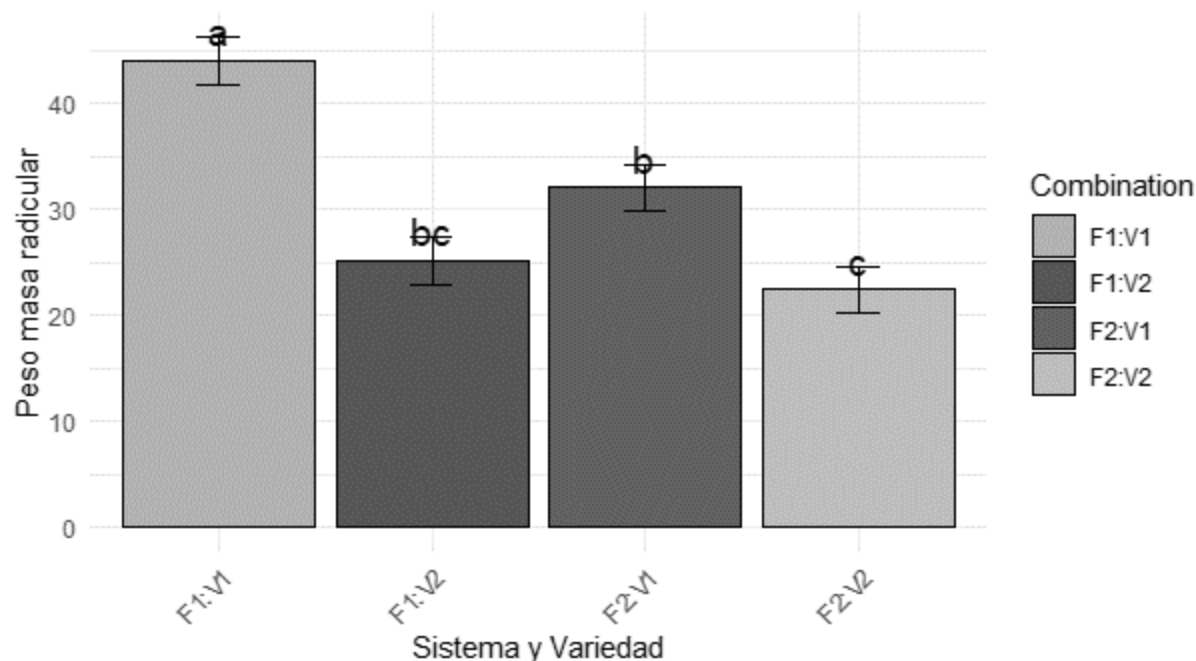
### Tabla 9

*Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Masa Radicular*

Sistema:Variedad	Peso (g)	
Sist. Acuap: L. Francesa	43.99	a
Sist. Hidrop: L. Francesa	32.08	b
Sist. Acuap: L. Criolla	25.15	bc
Sist. Hidrop: L. Criolla	22.45	c

### Figura 6

*Interacción Sistema-Variedad de la Variable Masa Radicular*



### 5.3. Largo de raíz de la lechuga (cm)

El análisis de varianza (ANOVA) de la tabla 10 realizado para la variable largo de raíz en las variedades de lechuga francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa* L.) bajo sistemas de cultivo acuapónico (F1) e hidropónico (F2) reveló resultados altamente significativos, destacando la influencia crítica de estos factores en el crecimiento radicular. Se encontró una diferencia extremadamente significativa entre los sistemas de cultivo ( $F(1, 12) = 456.86$   $p = 6.4 \times 10^{-11}$ ), indicando que el tipo de sistema afecta notablemente el largo de raíz, con el sistema acuapónico mostrando un impacto positivo superior. Asimismo, la variedad de lechuga demostró una diferencia significativa ( $F(1, 12) = 15.37$ ,  $p = 0.00203$ ), sugiriendo que la lechuga francesa y la criolla responden de manera diferente en términos de crecimiento radicular. Sin embargo, la interacción entre el sistema de cultivo y la variedad no fue significativa ( $F(1, 12) = 1.992$ ,  $p = 0.18349$ ), lo que implica que el efecto del sistema de cultivo sobre el largo de raíz es consistente independientemente de la variedad de lechuga.

**Tabla 10**

*Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Largo de Raíz*

F. V	GL	SC	CM	F value	P-value
Sistema	1	3156.2	3156.2	456.866	$6.41 \times 10^{-11}$ ***
Variedad	1	106.2	106.2	15.372	0.00203 **
Sistema: Variedad	1	13.8	13.8	1.992	0.18349
Residuales	12	82.9	6.9		
CV	6.50				

*Nota:* ANOVA: análisis de varianza. *F. V:* fuente de variación. *GL:* grados de libertad. *SC:* suma de cuadrados. *CM:* cuadrado medio.

### **Comparación de sistemas de la variable largo de raíz**

La prueba de Tukey realizada para comparar los sistemas de cultivo acuapónico e hidropónico, en términos del largo de raíz de las lechugas mostró diferencias significativas entre ambos sistemas. Según los resultados presentados en la Tabla 11 y gráfico 7, el sistema acuapónico registró un largo promedio de raíz de 54.46 cm, mientras que el sistema hidropónico presentó un largo promedio de 26.37 cm. Las letras diferentes (a y b) asignadas a los valores indican que estas medias son significativamente diferentes entre sí. Específicamente, el sistema acuapónico resultó en un largo de raíz significativamente mayor que el sistema hidropónico. Este hallazgo sugiere que el sistema acuapónico proporciona condiciones más favorables para el crecimiento radicular de las lechugas en comparación con el sistema hidropónico.

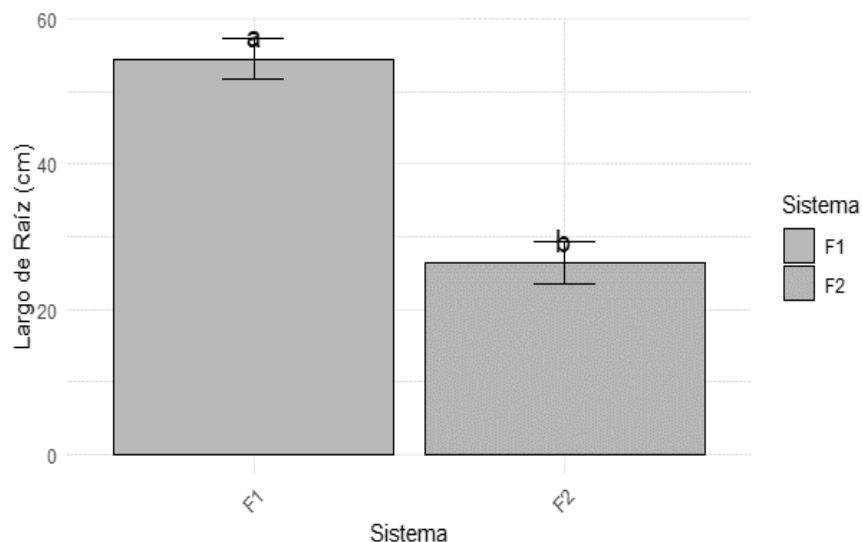
### **Tabla 11**

*Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas de la Variable Largo de Raíz*

Sistema	Largo (cm)
Acuapónico	54.46 a
Hidropónico	26.37 b

**Figura 7**

*Comparación de Sistemas de la Variable Largo de Raíz.*



### **Comparación de variedades de la variable largo de raíz**

La prueba de Tukey realizada para comparar las variedades de lechuga francesa (v1) y criolla (v2) en términos del largo de raíz reveló diferencias significativas entre ambas variedades. Según los resultados presentados en la Tabla 12, la variedad criolla (v2) registró un largo promedio de raíz de 43.00 cm, mientras que la variedad francesa (v1) presentó un largo promedio de raíz de 37.85 cm. Las letras diferentes (a y b) asignadas a los valores indican que estas medias son significativamente diferentes entre sí. Específicamente, la variedad criolla resultó en un largo de raíz significativamente mayor que la variedad francesa. Este hallazgo sugiere que la lechuga criolla tiene una mayor capacidad de desarrollo radicular en comparación con la lechuga francesa bajo las condiciones de los sistemas de cultivo evaluados.

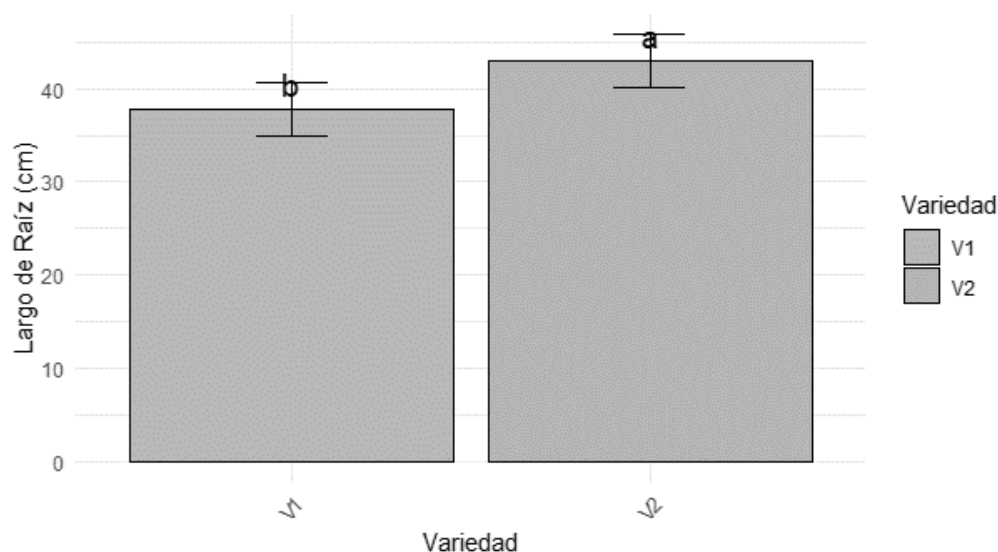
**Tabla 12**

*Prueba de Tukey: Comparación de Variedades de la Variable Largo de Raíz*

Variedades	Largo (cm)	
(V2) Criolla	43.00	a
(V1) Francesa	37.84	b

**Figura 8**

### Comparación de Variedades de la Variable Largo de Raíz



### Interacción Sistema-Variedad de la variable largo de raíz

La prueba de Tukey realizada para evaluar la interacción entre el sistema de cultivo (acuapónico e hidropónico) y las variedades de lechuga (francesa y criolla) en términos del largo de raíz reveló diferencias significativas que destacan la influencia combinada de estos factores. Según los resultados presentados en la Tabla 13, la lechuga criolla cultivada en el sistema acuapónico alcanzó el mayor largo promedio de raíz con 56.12 cm, seguida de cerca por la lechuga francesa en el mismo sistema con 52.82 cm. Ambas combinaciones (Sist. Acuap: L. criolla y Sist. Acuap: L. Francesa) no mostraron diferencias significativas entre sí, como indican las letras a, pero sí presentaron diferencias significativas cuando se comparan con las demás combinaciones.

Por otro lado, la lechuga criolla en el sistema hidropónico tuvo un largo promedio de raíz de 29.88 cm, y la lechuga francesa en el sistema hidropónico registró el menor largo promedio de raíz con 22.88 cm. Estas combinaciones (Sist. Hidrop: L. Criolla y Sist. Hidrop: L. Francesa) mostraron diferencias significativas entre sí, así como con las combinaciones en el sistema acuapónico, con las letras b y c indicando estas diferencias.

Estos resultados sugieren que el sistema acuapónico proporciona un entorno más favorable para el desarrollo radicular en ambas variedades de lechuga en comparación con el sistema hidropónico. Además, mientras que la variedad criolla tiende a tener un desarrollo radicular

superior en ambos sistemas, la diferencia es más pronunciada en el sistema hidropónico, donde la variedad francesa muestra un rendimiento significativamente menor.

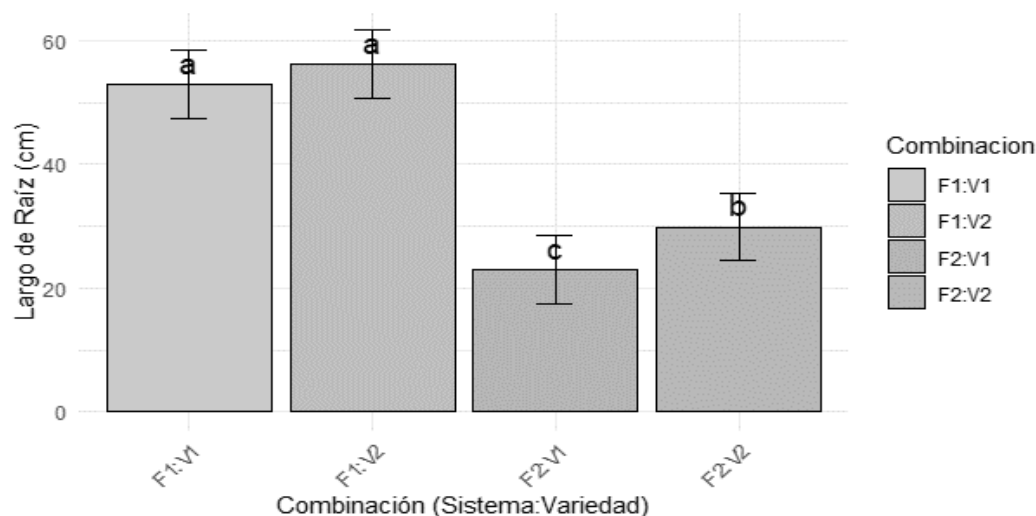
**Tabla 13**

*Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Largo de Raíz*

Sistema:Variedad	Largo (cm)	
Sist. Acuap: L. criolla	56.11	a
Sist. Acuap: L. Francesa	52.82	a
Sist. Hidrop: L. Criolla	29.88	b
Sist. Hidrop: L. francesa	22.87	c

**Figura 9**

*Interacción Sistema-Variedad de la Variable Largo de Raíz*



#### 5.4. Peso de la lechuga (g)

El análisis de varianza (ANOVA) de la tabla 14 para la variable peso de masa aérea de las variedades de lechuga francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en sistemas acuapónico (F1) e hidropónico (F2) mostró resultados estadísticamente significativos. El efecto del sistema de cultivo fue significativo ( $F(1, 12) = 21.67, p = 0.000556$ ), indicando que existe una diferencia notable en el peso de la masa aérea entre las plantas cultivadas en sistemas acuapónicos y las cultivadas en sistemas hidropónicos. La variedad de lechuga también tuvo un efecto altamente significativo ( $F(1, 12) = 146.47, p = 4.4 \cdot 10^{-8}***$ ), lo que sugiere que las

diferencias genéticas entre las variedades francesa y criolla resultan en variaciones significativas en el peso de la masa aérea. Además, la interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga fue significativa ( $F(1, 12) = 17.76$ ,  $p = 0.001202$ ), indicando que la combinación específica de sistema de cultivo y variedad afecta de manera importante el peso de la masa aérea.

**Tabla 14**

*Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Peso de Masa Aérea de la Lechuga*

F. V	GL	SC	CM	F value	P-value	
Sistema		1	3419	3419	21.67	0.000556 ***
Variedad		1	23112	23112	146.47	$4.4 \times 10^{-8}$ ***
Sistema: Variedad		1	2802	2802	17.76	0.001202 **
Residuales		12	1894	158		
CV	9.07					

*Nota.* ANOVA: análisis de varianza. F. V: fuente de variación. GL: grados de libertad. SC: suma de cuadrados. CM: cuadrado medio.

### **Comparación de sistemas de la variable peso de masa aérea**

La comparación de sistemas de cultivo para la variable peso de masa aérea de la lechuga, basada en la prueba de Tukey, revela diferencias significativas entre los sistemas acuapónico e hidropónico. Según los resultados presentados en la Tabla 15, las lechugas cultivadas en el sistema hidropónico tienen un peso promedio de masa aérea de 153.05 gramos, mientras que las lechugas cultivadas en el sistema acuapónico presentan un peso promedio de 123.82 gramos. Las letras "a" y "b" indican que estos valores son significativamente diferentes entre sí al nivel de significancia del 5%, lo que implica que el sistema hidropónico permite un mayor desarrollo de la masa aérea en comparación con el sistema acuapónico.

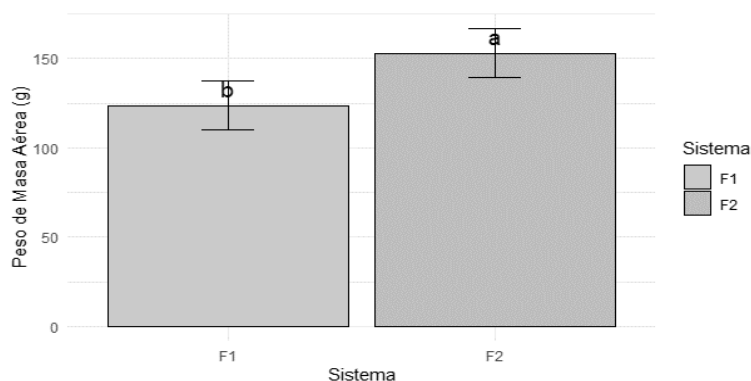
**Tabla 15**

*Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico para la Variable Peso de Masa Aérea*

Sistema	Peso (g)
Hidropónico	153.05 a
Acuapónico	123.81 b

**Figura 10**

*Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico para la Variable Peso de Masa Aérea*



**Comparación de variedades de la variable peso de masa aérea**

La comparación de las variedades de lechuga francesa (V1) y criolla (V2) para la variable peso de masa aérea, basada en la prueba de Tukey, revela diferencias significativas entre ambas variedades. Según los resultados presentados en la Tabla 16, la lechuga francesa (V1) tiene un peso promedio de masa aérea de 176.44 gramos, mientras que la lechuga criolla (V2) presenta un peso promedio de 100.43 gramos. Las letras "a" y "b" indican que estos valores son significativamente diferentes entre sí al nivel de significancia del 5%, lo que implica que la variedad francesa produce una masa aérea significativamente mayor que la variedad criolla, en términos de desarrollo de la masa aérea, la lechuga francesa es más productiva que la lechuga criolla.

**Tabla 16**

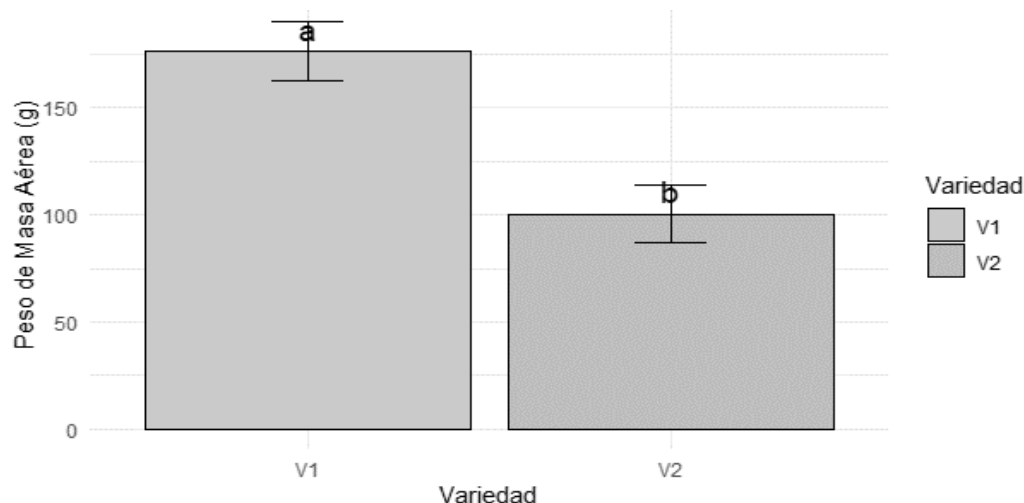
*Prueba de Tukey: Comparación de Variedades para la Variable Peso de Masa Aérea*

Variedades	Peso (g)
------------	----------

(V1) Francesa	176.43	a
(V2) Criolla	100.42	b

**Figura 11**

*Comparación de Variedades para la Variable Peso de Masa Aérea*



### **Interacción Sistema-Variedad de la variable peso de masa aérea**

La tabla 17 presenta los promedios de peso de masa aérea para diferentes combinaciones de tratamientos en un estudio que compara el sistema hidropónico (F2) y acuapónico (F1) con dos variedades de lechuga: francesa (V1) y criolla (V2). Los valores indican que las plantas de lechuga francesa en sistema hidropónico tienen el mayor peso promedio (204.29 g), seguidas por las de lechuga francesa en sistema acuapónico (148.59 g). Las lechugas criollas, tanto en hidropónico (101.81 g) como en acuapónico (99.04 g), muestran pesos de masa aérea menores, con las combinaciones de lechuga criolla compartiendo el mismo grupo estadístico (c), indicando similitudes en este aspecto entre ambos sistemas de cultivo.

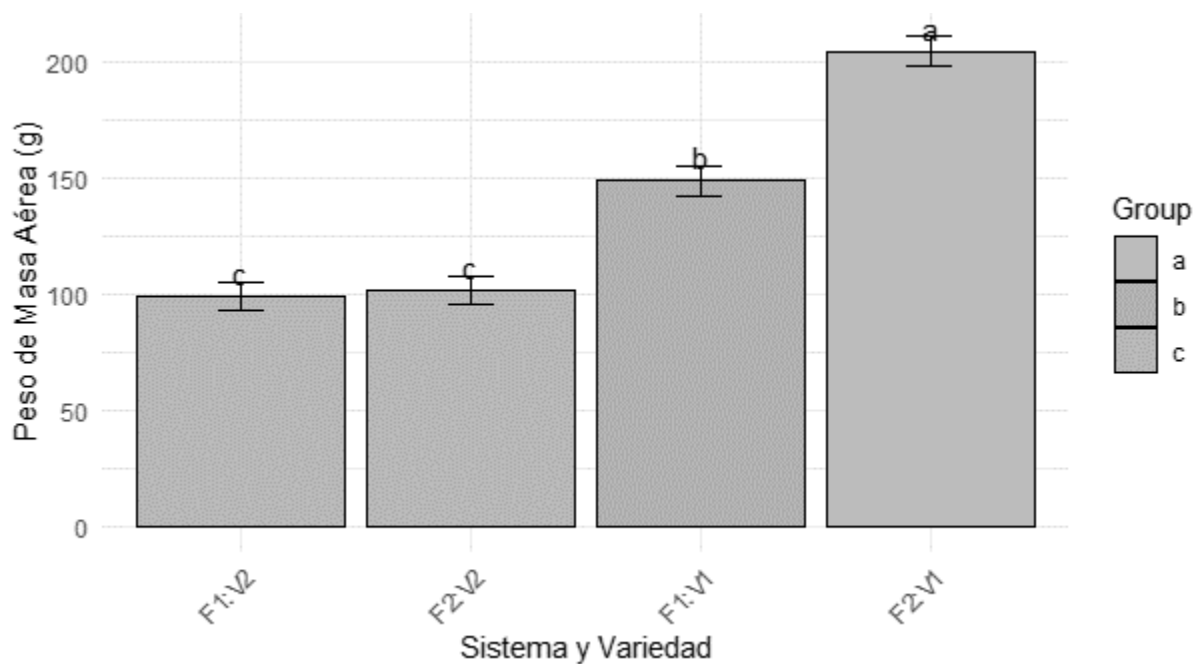
**Tabla 17**

*Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Peso de Masa Aérea*

Sistema:Variedad	Peso (g)	Grupo Estadístico
F2:V1	204.29	a
F1:V1	148.58	b
F2:V2	101.81	c
F1:V2	99.04	c

**Figura 12**

*Interacción Sistema-Variedad de la Variable Peso de Masa Aérea*



### 5.5. Largo de hojas de la lechuga

La tabla 18 presenta resultados significativos que destacan la influencia diferencial del sistema de cultivo y la variedad de lechuga en esta característica morfológica. Primero, el sistema de cultivo muestra un efecto altamente significativo ( $F = 62.348, p < 0.0001$ ), indicando que las condiciones de acuaponía e hidroponía afectan de manera notable la longitud de las hojas, con diferencias estadísticamente significativas entre ambos sistemas. Segundo, la variedad de lechuga también tiene un efecto significativo ( $F = 96.451, p < 0.0001$ ), subrayando que las variedades francesa y criolla exhiben diferencias marcadas en términos de longitud foliar. Además, la interacción entre sistema de cultivo y variedad es significativa ( $F = 9.938, p = 0.00834$ ), lo cual indica que el tipo específico de cultivo puede modular cómo cada variedad responde en cuanto al crecimiento de las hojas.

#### Tabla 18

*Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Largo de Hojas de la Lechuga*

F. V	GL	SC	CM	F value	P-value
Sistema	1	85.19	85.19	62.348	$4.30 \cdot 10^{-6} **$ *
Variedad	1	131.79	131.79	96.451	$4.35 \cdot 10^{-7} **$ *
Sistema: Variedad	1	13.58	13.58	9.938	0.00834 **
Residuales	12	16.40	1.37		
CV	4.79				

*Nota.* ANOVA: análisis de varianza. F. V: fuente de variación. GL: grados de libertad. SC: suma de cuadrados. CM: cuadrado medio.

### Comparación de sistemas de la variable largo de hojas

La Tabla 19 presenta una comparación del largo de las hojas de la lechuga en dos sistemas de cultivo: hidropónico y acuapónico. Los resultados muestran que el sistema hidropónico tiene un largo promedio de hojas de 26.70 cm, mientras que el sistema acuapónico tiene un promedio de 22.09 cm. La prueba de Tukey se utiliza para determinar si estas diferencias son estadísticamente significativas. En esta tabla, las letras "a" y "b" indican que los promedios no comparten la misma letra, lo que sugiere una diferencia significativa entre los sistemas. En otras palabras, el largo de las hojas en el sistema hidropónico es significativamente mayor que en el sistema acuapónico.

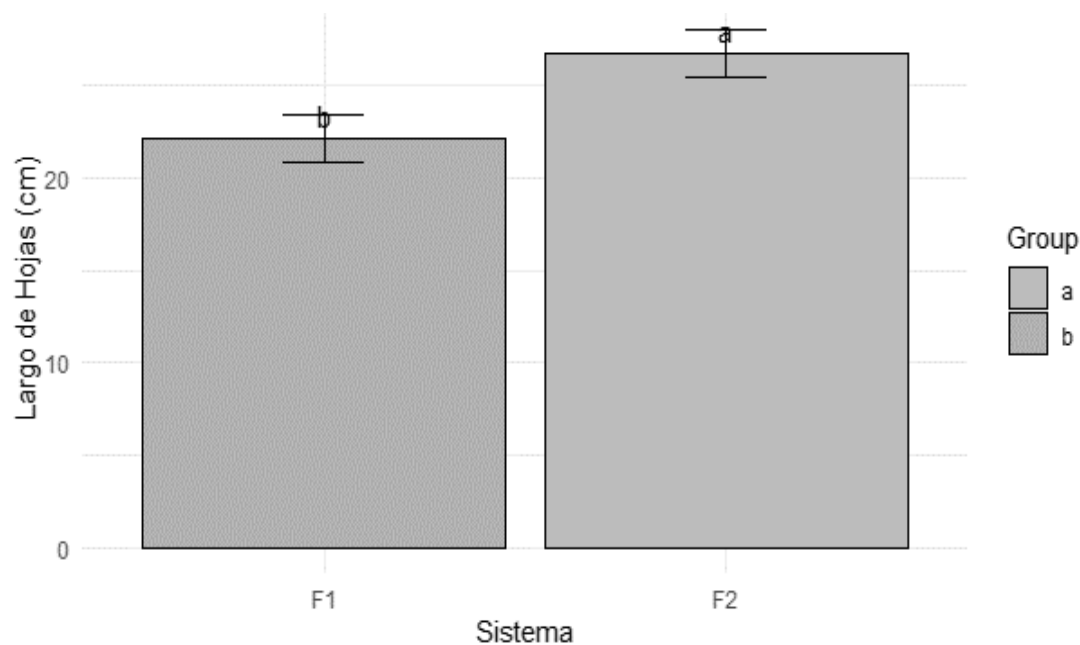
### Tabla 19

*Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga*

Sistema	Largo (cm)
Hidropónico	26.70 a
Acuapónico	22.09 b

### Figura 13

*Comparación de Sistemas de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga*



### Comparación de variedades de la variable largo de hojas

La Tabla 20 muestra una comparación del largo de las hojas de dos variedades de lechuga: francesa (V1) y criolla (V2). Los resultados indican que la variedad francesa tiene un largo promedio de hojas de 27.27 cm, mientras que la variedad criolla tiene un promedio de 21.53 cm. La prueba de Tukey se empleó para determinar si estas diferencias son estadísticamente significativas. En esta tabla, las letras "a" y "b" indican que los promedios no comparten la misma letra, lo que sugiere una diferencia significativa entre las variedades. Específicamente, el largo de las hojas de la variedad francesa es significativamente mayor que el de la variedad criolla. Esta diferencia significativa implica que la variedad francesa de lechuga es más efectiva en desarrollar un mayor largo de hojas en comparación con la variedad criolla.

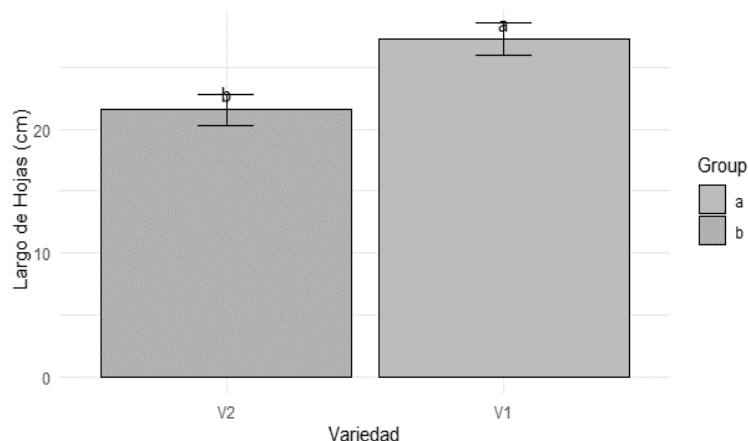
**Tabla 20**

*Prueba de Tukey: Comparación de Variedades de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga*

Variedades	Largo (cm)	Group
(V1) Francesa	27.27	a
(V2) Criolla	21.53	b

**Figura14**

*Comparación de Variedades de la Variable Largo de las Hojas de la Lechuga*



### **Interacción Sistema-Variedad de la variable largo de hojas**

La Tabla 21 muestra la interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga en relación con el largo de las hojas, donde F1 se refiere al sistema acuapónico, F2 al sistema hidropónico, V1 a la variedad francesa y V2 a la variedad criolla. Los resultados indican que la combinación F2 (sistema hidropónico, variedad francesa) tiene el mayor largo promedio de hojas con 30.50 cm, seguido por las combinaciones F1 (acuapónico, francesa) y F2 (hidropónico, criolla) con 24.04 cm y 22.91 cm respectivamente, que no presentan diferencias significativas entre sí. Finalmente, la combinación F1 (acuapónico, criolla) tiene el menor largo promedio de hojas con 20.14 cm. La prueba de Tukey confirma que estas diferencias son estadísticamente significativas, con F2 significativamente superior a las demás combinaciones, F1 y F2 significativamente superiores a F1, pero sin diferencias significativas entre ellas. Esto sugiere que el sistema hidropónico combinado con la variedad francesa es la opción más efectiva para obtener un mayor largo de hojas de lechuga, mientras que el sistema acuapónico combinado con la variedad criolla resulta en el menor largo de hojas.

**Tabla 21**

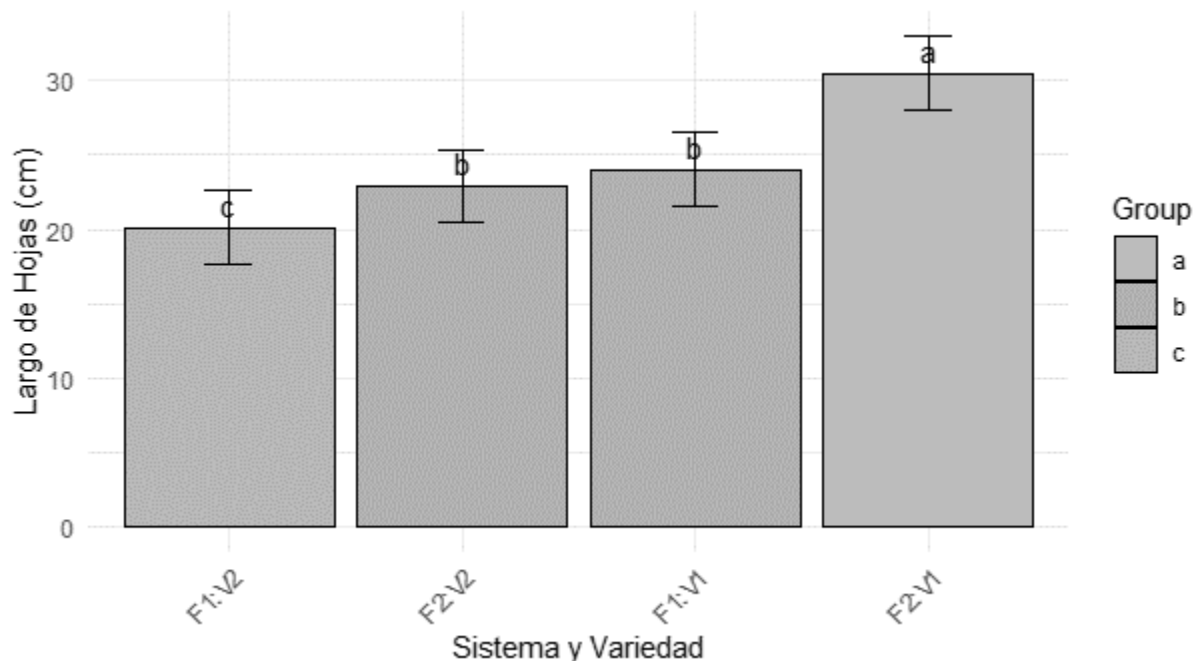
*Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la variable Largo de Hojas de la Lechuga*

Sistema:Variedad	Lago (cm)	
F2:V1	30.50	a
F1:V1	24.04	b

F2:V2	22.91	b
F1:V2	20.14	c

**Figura 15**

*Interacción Sistema-Variedad de la variable Largo de Hojas de la Lechuga*



## 5.6. Número de hojas

La Tabla 22 presenta el análisis de varianza (ANOVA) para la variable número de hojas de la lechuga, considerando los factores Sistema, Variedad y su interacción. El factor Sistema tiene un efecto significativo en el número de hojas, con un *p-value* de 0.01005, menor que el nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , lo que indica diferencias significativas entre los sistemas acuapónico e hidropónico. El factor Variedad muestra un efecto altamente significativo, con un *p-value* de  $4.13 \times 10^{-6}$ , mucho menor que  $\alpha = 0.05$ , evidenciando diferencias significativas entre las variedades francesa y criolla. Además, la interacción entre el Sistema y la Variedad también es significativa, con un *p-value* de 0.00347, menor que  $\alpha = 0.05$ , lo que sugiere que el efecto del sistema de cultivo varía según la variedad de lechuga. Los residuales, que representan la variabilidad no explicada por los factores y su interacción, tienen un cuadrado medio de 28.0. Entonces tanto el sistema de cultivo como la variedad, así como su interacción, influyen significativamente en el número de hojas de la lechuga.

**Tabla 22**

*Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Número de Hojas de la Lechuga*

F. V	GL	SC	CM	F value	P-value
Sistema	1	260.7	260.7	9.314	0.01005 *
Variedad	1	1758.5	1758.5	62.838	4.13 x 10 <sup>-6</sup> ***
Sistema: Variedad	1	368.1	368.1	13.152	0.00347 **
Residuales	12	335.8			28.0
CV	18.53				

*Nota.* ANOVA: análisis de varianza. F. V: fuente de variación. GL: grados de libertad. SC: suma de cuadrados. CM: cuadrado medio.

### **Comparación de sistemas de la variable número de hojas**

La Tabla 23 muestra los resultados de la prueba de Tukey para comparar el número de hojas de la lechuga entre los sistemas de cultivo hidropónico y acuapónico. Los valores promedio indican que el sistema hidropónico tiene significativamente más hojas con un promedio de 32.57, mientras que el sistema acuapónico muestra un promedio de 24.50 hojas. La letra "a" asignada al sistema hidropónico y "b" al acuapónico señala que estas diferencias son estadísticamente significativas. Este resultado sugiere que el sistema hidropónico ha proporcionado condiciones de cultivo más favorables para el desarrollo foliar de la lechuga en comparación con el sistema acuapónico.

**Tabla 23**

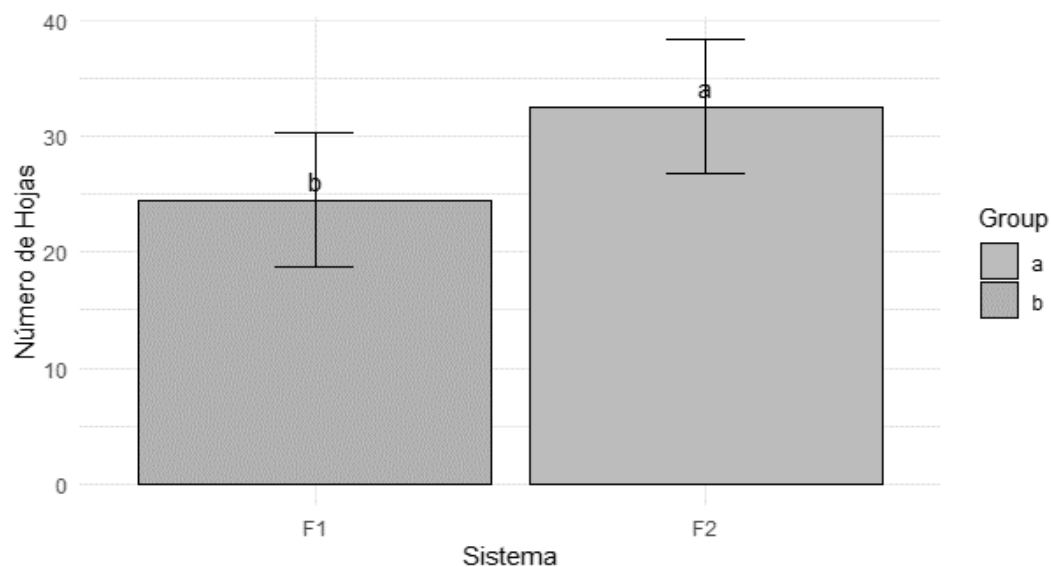
*Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga*

Sistema	Número de Hojas
---------	-----------------

Hidropónico	32.57	a
Acuapónico	24.50	b

**Figura 16**

*Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga*



### **Comparación de variedades de la variable número de hojas**

Los valores promedio de la tabla 24 muestran claramente que la variedad francesa (V1) de lechuga presenta un número promedio significativamente mayor de hojas, con un valor de 39.02, en comparación con la variedad criolla (V2), que tiene un promedio considerablemente menor de 18.05 hojas. Las letras "a" asignadas a la variedad francesa y "b" a la criolla indican diferencias estadísticamente significativas entre ambas variedades. Estos resultados dicen que la variedad francesa exhibe un mayor potencial para producir un mayor número de hojas de lechuga en comparación con la variedad criolla, lo cual es relevante para la selección adecuada de variedades en términos de rendimiento foliar en cultivos de lechuga.

**Tabla 24**

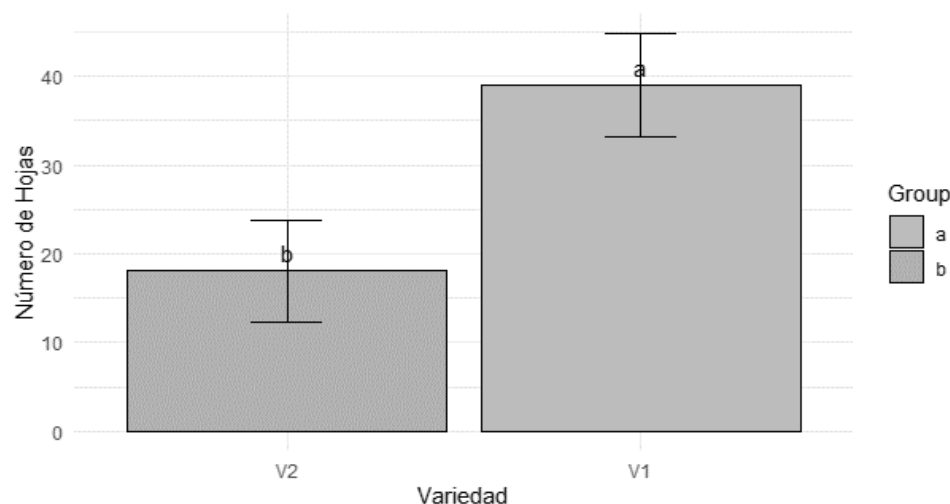
*Prueba de Tukey: Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga*

Variedades	Número de Hojas
------------	-----------------

(V1) Francesa	39.02	a
(V2) Criolla	18.05	b

**Figura 17**

*Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Número de las Hojas de la Lechuga*



### **Interacción Sistema-Variedad de la variable número de hojas**

La Tabla 24 revela cómo diferentes combinaciones de sistemas de cultivo (F1: acuapónico y F2: hidropónico) y variedades de lechuga (V1: francesa y V2: criolla) afectan el número promedio de hojas de la lechuga. La combinación F2 muestra el mayor promedio de hojas con 47.85, lo cual indica que el sistema hidropónico junto con la variedad francesa produce significativamente más hojas en comparación con las otras combinaciones. Por otro lado, F1 exhibe un promedio de 30.18 hojas, mostrando que el sistema acuapónico con la variedad francesa también genera un número considerable de hojas, aunque menor que F2. En contraste, las combinaciones F1 y F2 muestran valores más bajos de 18.81 y 17.29 respectivamente, indicando que tanto el sistema acuapónico como el hidropónico con la variedad criolla producen menos hojas en comparación con las variedades francesas. Las letras "a", "b" y "c" asignadas a cada combinación reflejan diferencias estadísticamente significativas entre los grupos.

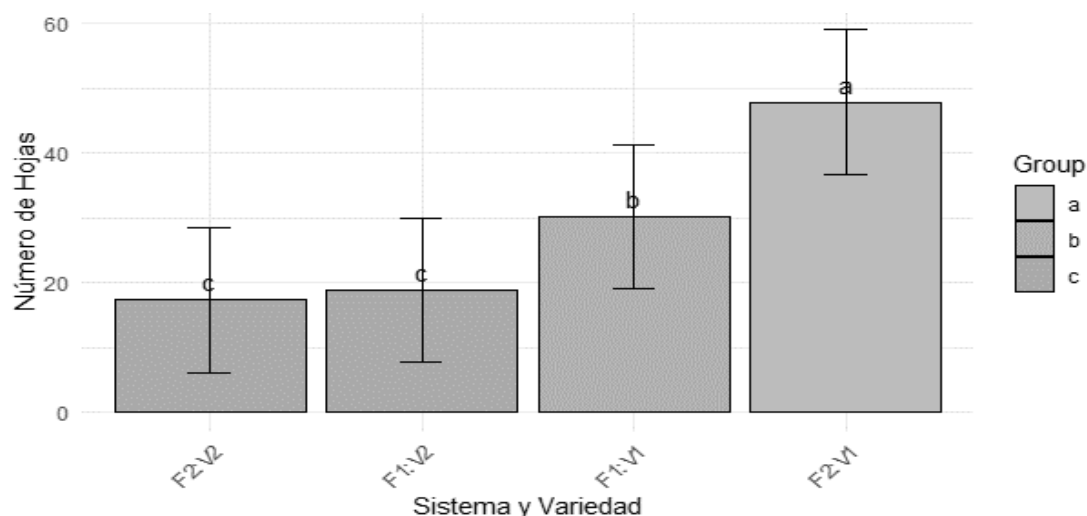
### **Tabla 25**

*Prueba de Tukey: Interacción Sistema-Variedad de la Variable Número de Hojas de la Lechuga*

Sistema:Variedad	Número de Hojas	
F2:V1	47.85	a
F1:V1	30.18	b
F1:V2	18.81	c
F2:V2	17.29	c

**Figura 18**

*Interacción Sistema-Variedad de la Variable Número de Hojas de la Lechuga*



### 5.5. Clorofila

El análisis de varianza (ANOVA) de la variable clorofila de la lechuga, como se presenta en la Tabla 26, revela factores que influyen en los niveles de clorofila en las hojas de lechuga. Primero, el factor sistema no muestra efectos significativos ( $F = 0.271$ ,  $p = 0.6124$ ), indicando que no hay diferencias estadísticamente significativas en los niveles de clorofila entre los sistemas acuapónico e hidropónico empleados en este estudio. En contraste, el factor Variedad sí tiene un efecto significativo ( $F = 7.294$ ,  $p = 0.0193$ ), destacando diferencias marcadas en los niveles de clorofila entre las variedades francesa y criolla de lechuga utilizadas. Esta diferencia sugiere que la selección de la variedad puede influir significativamente en la acumulación de clorofila en las hojas. Por otro lado, la interacción entre Sistema y Variedad no es significativa ( $F = 1.370$ ,  $p = 0.2646$ ), lo que indica que el tipo de sistema de cultivo no modula de manera significativa los efectos de la variedad en los niveles de clorofila observados.

**Tabla 26**

*Análisis de Varianza (ANOVA) entre Sistemas, Variedad y Sistema-Variedad, de la Variable Clorofila de la Lechuga*

F. V	GL	SC	CM	F value	P-value
Sistema	1	6.76	6.76	0.271	0.6124
Variedad	1	182.25	182.25	7.294	0.0193 *
Sistema: Variedad	1	34.22	34.22	1.370	0.2646
Residuales	12	299.83		24.99	
CV	15.82				

**Comparación de sistemas de la variable clorofila**

La tabla 27 proporciona resultados de una prueba de Tukey que compara los niveles de clorofila entre dos sistemas de cultivo de lechuga: hidropónico y acuapónico. Ambos sistemas muestran valores de clorofila muy cercanos, con un promedio de 32.23 para el hidropónico y 30.93 para el acuapónico. Las letras "a" asignadas a ambos sistemas indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellos en cuanto a la acumulación de clorofila. Esto sugiere que, en el contexto de este estudio, tanto el sistema hidropónico como el acuapónico proporcionan condiciones similares para la producción de clorofila en las hojas de lechuga, reflejando una estabilidad en este aspecto fisiológico bajo ambas condiciones de cultivo.

**Tabla 27**

*Prueba de Tukey: Comparación de Sistemas Hidropónico y Acuapónico de la Variable Clorofila de la Lechuga*

Sistema	Clorofila
Hidropónico	32.23 a
Acuapónico	30.93 a

**Comparación de variedades de la variable clorofila**

La Tabla 28 muestra los resultados de la comparación de los niveles de clorofila entre dos variedades de lechuga: la variedad francesa (V1) y la variedad criolla (V2). Según los datos presentados, la variedad francesa tiene un nivel promedio de clorofila de 34.96, mientras que la variedad criolla tiene un nivel promedio de 28.21. Las letras "a" asignada a la variedad francesa y "b" a la criolla indican que estas diferencias son estadísticamente significativas según la prueba de Tukey. Por lo tanto, los resultados sugieren que la variedad francesa de lechuga presenta niveles significativamente más altos de clorofila en comparación con la variedad criolla.

### **Tabla 28**

*Prueba de Tukey: Comparación de Variedades Francesa y Criolla de la Variable Clorofila de la Lechuga*

Variedades	Clorofila	
(V1) Francesa	34.96	a
(V2) criolla	28.21	b

### **Interacción sistema-variedad de la variable clorofila**

La Tabla 29 muestra la interacción entre el sistema de cultivo (F1: acuapónico y F2: hidropónico) y la variedad de lechuga (V1: francesa y V2: criolla) en relación con los niveles de clorofila. Los resultados indican que la combinación F2 tiene el mayor nivel promedio de clorofila con 37.07, seguida por F1 con 32.85. Las combinaciones F1y F2 muestran niveles promedio más bajos de 29.02 y 27.40 respectivamente. Las letras "a" asignadas a cada combinación indican que todas estas diferencias son estadísticamente significativas según la prueba de Tukey. Por lo tanto, estos resultados sugieren que el sistema hidropónico combinado con la variedad francesa de lechuga (F2) produce los niveles más altos de clorofila, mientras que el sistema acuapónico con la variedad criolla (F1) resulta en los niveles más bajos de clorofila en comparación con las otras combinaciones.

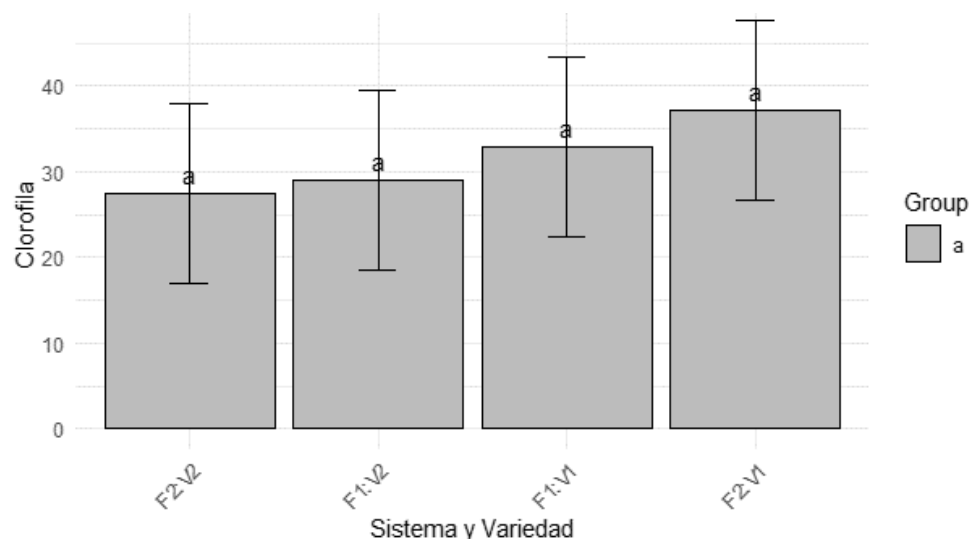
### **Tabla 29**

*Prueba de Tukey: Interacción Sistema- Variedad de la Variable Clorofila de la Lechuga*

Sistema-Variedad	Clorofila	
F2:V1	37.07	a
F1:V1	32.85	a
F1:V2	29.02	a
F2:V2	27.40	a

**Figura 19**

*Interacción Sistema- Variedad de la Variable Clorofila de la Lechuga*



## 5.7. NPK

La tabla 30 y la figura 6 muestran los niveles de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) absorbidos por lechugas en dos sistemas de cultivo: acuapónico e hidropónico, para las variedades V1 (francesa) y V2 (criolla). En general, el sistema hidropónico exhibe mayores concentraciones de N, P y K en comparación con el acuapónico para ambas variedades. Específicamente, las lechugas en el sistema hidropónico absorben 333.36 ppm de N, 60.48 ppm de P y 35.71 ppm de K en promedio para V1, y 286.52 ppm de N, 45.36 ppm de P y 30.92 ppm de K para V2. En contraste, en el sistema acuapónico, los valores promedio son 298.75 ppm de N, 49.96 ppm de P y 29.92 ppm de K para V1, y 265 ppm de N, 38.75 ppm de P y 24.11 ppm de K para V2. Esta diferencia puede atribuirse a las características específicas de cada sistema de cultivo que afectan la disponibilidad y la absorción de nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo vegetal. La literatura respalda esta observación, señalando que los sistemas hidropónicos pueden ofrecer condiciones óptimas para la absorción de nutrientes debido al control preciso del medio de cultivo, mientras que las variedades de plantas también pueden

influir significativamente en la capacidad de absorción de NPK según sus características genéticas y fisiológicas específicas (Marschner, 2012; Malavolta et al., 1997).

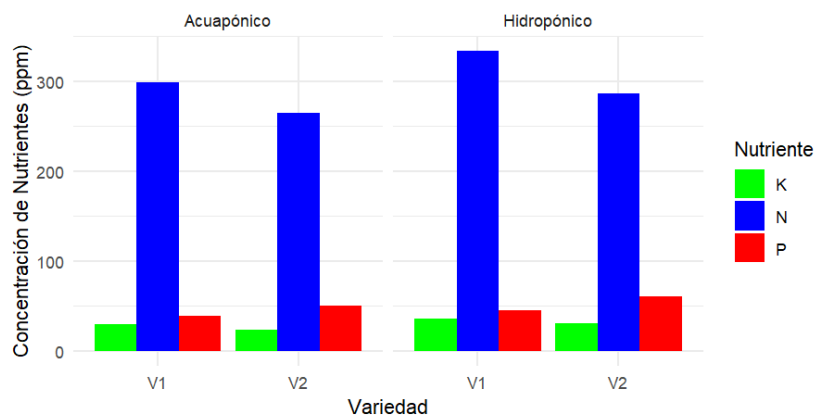
**Tabla 30**

*Determinación de Absorción de NPK*

		N (ppm)	P (ppm)	K (ppm)
Sistema acuapónico	V1	298.75	49.96	29.92
	V2	265	38.75	24,11
Sistema hidropónico	V1	333.36	60.48	35,71
	V2	286.52	45.36	30,92

**Figura 20**

*Niveles de Absorción de NPK de los Sistemas*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

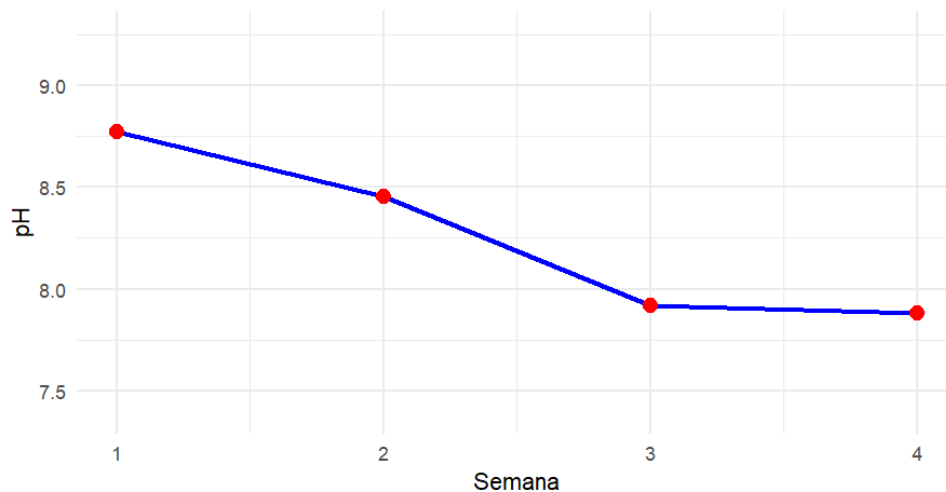
### 5.8. Niveles de pH, CE, temperatura, nitritos y nitratos

En la Tabla 31, se observan los promedios semanales de varios parámetros en sistema acuapónico.

**pH:**

- Semana 1: 8.77
- Semana 2: 8.454
- Semana 3: 7.92
- Semana 4: 7.88

**Figura 21** Evolución del pH durante 4 Semanas



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

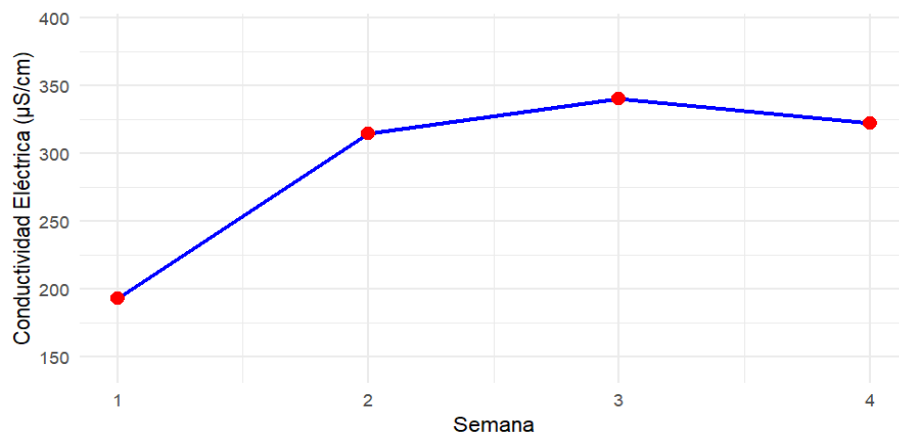
El pH en las semanas 3 y 4 muestra una ligera tendencia hacia la acidez, siendo 7.92 y 7.88 respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del rango aceptable para la mayoría de los cultivos hidropónicos y acuapónicos, que generalmente prefieren un pH entre 6.5 y 7.5 (Rakocy, 2012).

**CE (Conductividad Eléctrica):**

- Semana 1: 192.66  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Semana 2: 314.14  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Semana 3: 339.86  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Semana 4: 321.86  $\mu\text{S}/\text{cm}$

**Figura 22**

*Evolución de CE durante 4 Semanas*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

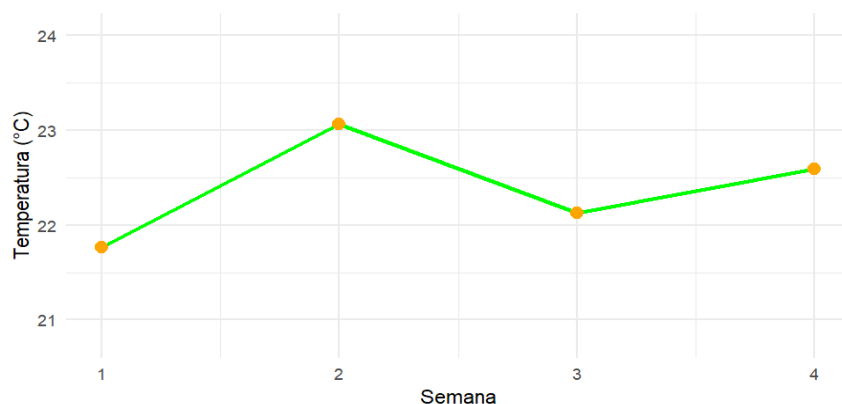
La CE aumenta gradualmente a lo largo de las semanas, indicando una acumulación de sales en el sistema. Sin embargo, los valores están dentro de un rango aceptable para cultivos hidropónicos y acuapónicos, que generalmente pueden tolerar CE entre 500 y 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dependiendo de la etapa de crecimiento y la especie de planta (FAO, 2020).

#### **Temperatura (Temp):**

- Semana 1: 21.76°C
- Semana 2: 23.06°C
- Semana 3: 22.13°C
- Semana 4: 22.59°C

#### **Figura 23**

*Evolución de la Temperatura a lo Largo de 4 Semanas*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

Las temperaturas del agua en el sistema acuapónico fluctuaron entre 21.76°C y 23.06°C a lo largo de las cuatro semanas. Estos valores se encuentran dentro del rango óptimo recomendado para la mayoría de los cultivos acuáticos, que oscila entre 20°C y 26°C (Florida Cooperative Extension Service, 2021).

Esta estabilidad térmica es beneficiosa tanto para el crecimiento de las tilapias como para el desarrollo de las lechugas, ya que temperaturas dentro de este intervalo favorecen un metabolismo eficiente y una absorción adecuada de nutrientes. Mantener la temperatura del agua en este rango asegura un ambiente propicio para el crecimiento de los cultivos y minimiza el riesgo de estrés térmico, contribuyendo así a un rendimiento óptimo del sistema acuapónico.

#### **Nitritos:**

- Semana 1: 0.67 ppm
- Semana 2: 0.203 ppm
- Semana 3: 0.075 ppm
- Semana 4: 0.10 ppm

Los niveles de nitritos están dentro de los rangos aceptables para sistemas acuapónicos, que generalmente deben mantenerse por debajo de 1 ppm para evitar efectos tóxicos en los peces y las plantas (Rakocy, 2012).

#### **Nitratos:**

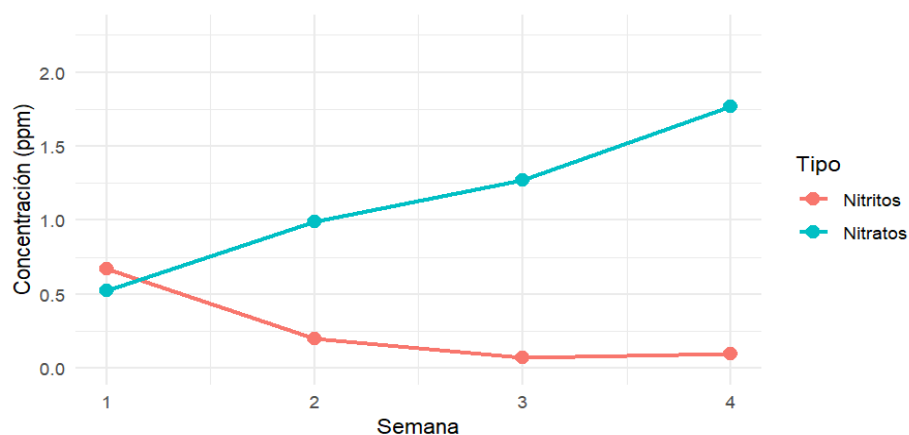
- Semana 1: 0.525 ppm
- Semana 2: 0.99 ppm
- Semana 3: 1.27 ppm

- Semana 4: 1.77 ppm

Los niveles de nitratos también están dentro de los rangos aceptables para sistemas acuapónicos, que generalmente pueden manejar concentraciones de nitratos hasta 100 ppm, dependiendo de la especie cultivada y el tamaño del sistema (FAO, 2020).

## Figura 24

### Concentración de Nitritos y Nitratos durante 4 Semanas



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

La figura 8 que cruza los datos de nitritos y nitratos muestra una evolución interesante a lo largo del período de estudio.

**Nitritos:** Al inicio de la investigación, los niveles de nitritos eran relativamente altos, alcanzando 0.67 ppm en la primera semana. Sin embargo, se observa una notable disminución en la semana 2, con los niveles bajando a 0.203 ppm. Esta tendencia a la baja continúa en la semana 3, donde los niveles de nitritos se reducen aún más a 0.075 ppm, aunque hay un pequeño aumento a 0.10 ppm en la semana 4. Este patrón sugiere que el sistema está funcionando bien en la conversión de nitritos a nitratos, gracias a la actividad de las bacterias nitrificantes. El ligero incremento al final podría indicar que es necesario ajustar el sistema para mantener el equilibrio óptimo (FAO, 2015).

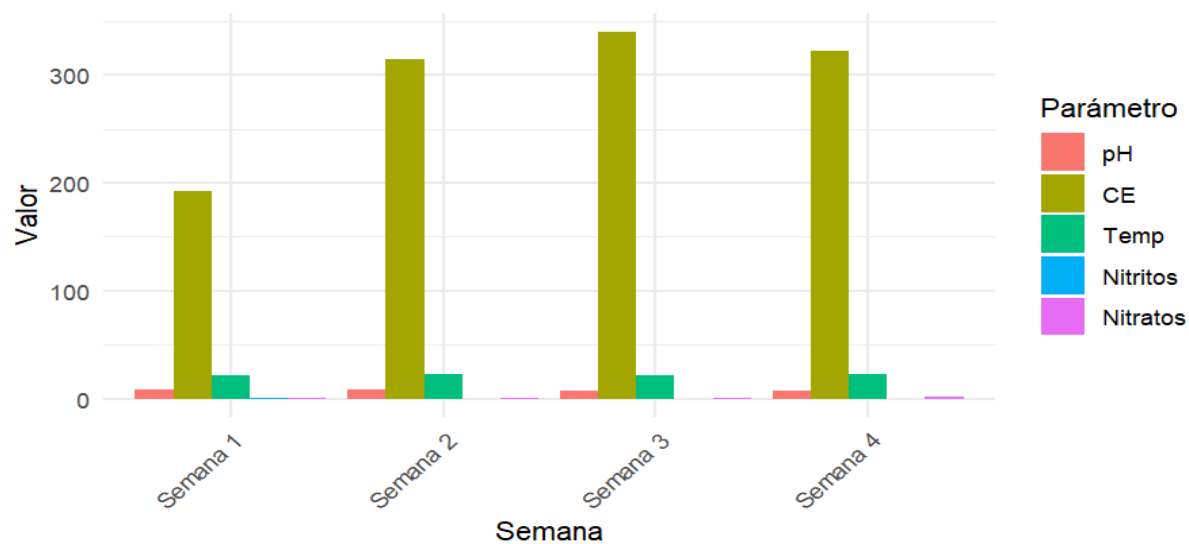
**Nitratos:** En contraste, los niveles de nitratos han ido en aumento a lo largo de las semanas. Comenzaron en 0.525 ppm en la semana 1 y crecieron a 0.99 ppm en la semana 2. El aumento continúa en la semana 3, alcanzando 1.27 ppm, y culmina en 1.77 ppm en la semana 4. Este incremento sostenido en los nitratos refleja una conversión efectiva de nitritos y su acumulación en el sistema. Esta tendencia sugiere que el proceso de nitrificación está operando de manera eficiente y está proporcionando una fuente constante de nutrientes para las plantas (FAO, 2015). La relación entre los niveles de nitritos y nitratos en el gráfico muestra que a medida que los nitritos disminuyen, los nitratos aumentan, lo cual es un signo positivo de que el sistema está gestionando bien el proceso de nitrificación. Aunque el ligero aumento de nitritos en la última semana y el continuo ascenso de nitratos señalan la necesidad de ajustes adicionales para mantener el equilibrio adecuado de nutrientes.

### Tabla 31

*Promedios Semanales de Diferentes Parámetros en el Sistema Acuapónico*

		SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
Sistema acuapónico	pH	8.77	8.454	7.92	7.88
	CE	192.66	314.14	339.86	321.86
	Temp	21.76	23.06	22.13	22.59
	Nitritos	0.67	0.203	0.075	0.10
	Nitratos	0.525	0.99	1.27	1.77

**Figura 25** *Promedios semanales de Diferentes Parámetros en el Sistema Acuapónico*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

### Parámetros de evaluación en el sistema hidropónico

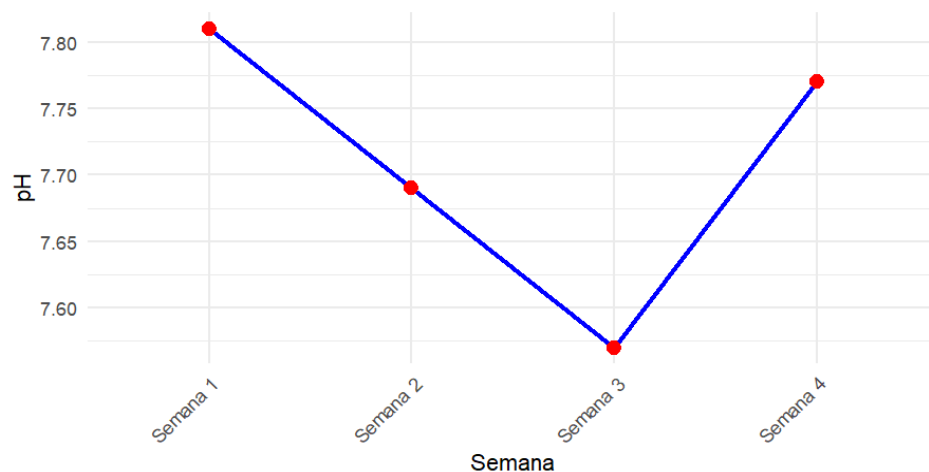
Como podemos ver en la tabla 32 estos son los resultados obtenidos de los parámetros del agua en el sistema hidropónico a lo largo de la semana:

#### pH:

- Semana 1: 7.81
- Semana 2: 7.69
- Semana 3: 7.57
- Semana 4: 7.77

### Figura 26

*Niveles de pH en el Sistema Hidropónico*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

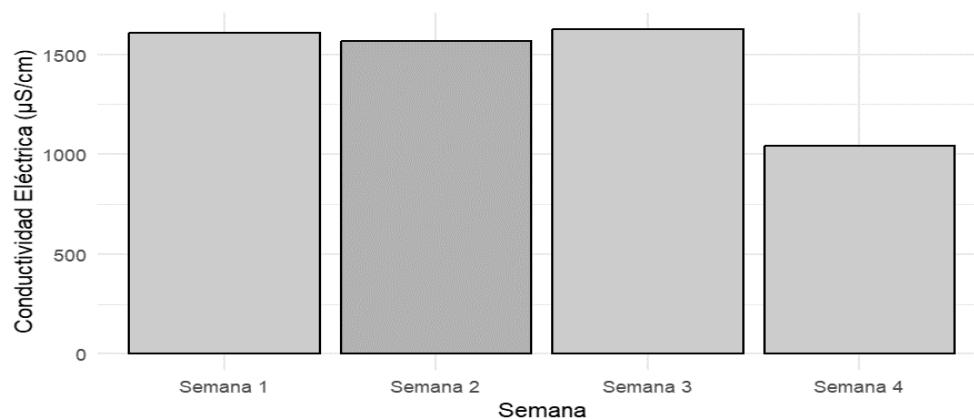
En el sistema hidropónico, el pH mostró una ligera disminución desde 7.81 en la primera semana hasta 7.57 en la tercera semana, indicando una tendencia hacia un entorno más ácido. Esta variación se debe a cambios en la composición de nutrientes o a la producción de ácidos por las plantas. Sin embargo, en la cuarta semana, el pH se estabilizó y aumentó ligeramente a 7.77. En general, el sistema requirió ajustes continuos para mantener el pH dentro de niveles adecuados, evitando condiciones que pudieran afectar negativamente el desarrollo vegetal. El pH en un sistema hidropónico generalmente debe mantenerse entre 5.5 y 6.5 para la mayoría de las plantas (Marschner, 2011; Resh, 2012).

#### **CE (Conductividad Eléctrica):**

- Semana 1: 1606.57  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Semana 2: 1565.43  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Semana 3: 1624.86  $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Semana 4: 1042.14  $\mu\text{S}/\text{cm}$

#### **Figura 27**

*Niveles de CE en el Sistema Hidropónico Durante 4 Semanas*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

La figura 11 sobre la Conductividad Eléctrica (CE) en el sistema hidropónico muestra que, durante las primeras tres semanas, los valores de CE se mantuvieron bastante estables, variando entre 1565.43 y 1624.86  $\mu\text{S/cm}$ . Estos niveles están dentro del rango recomendado para cultivos hidropónicos, que suele estar entre 1400 y 2000  $\mu\text{S/cm}$ , según las necesidades específicas de las plantas y su etapa de crecimiento (Niu et al., 2018).

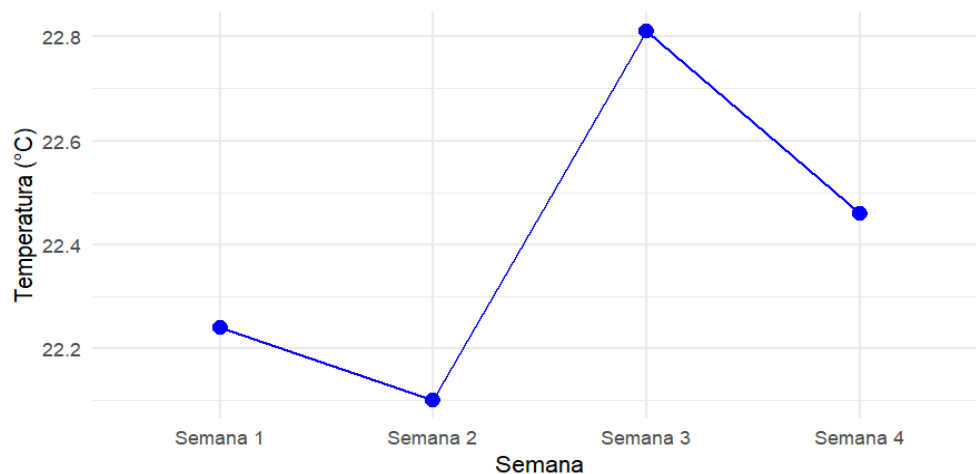
No obstante, en la cuarta semana, la CE cayó drásticamente a 1042.14  $\mu\text{S/cm}$ , lo que indica que el nivel de nutrientes en el sistema puede haber disminuido, posiblemente debido a una dilución. Este descenso podría afectar la salud de las plantas, ya que niveles muy bajos de CE pueden llevar a deficiencias nutricionales y, en consecuencia, a una reducción en el rendimiento y crecimiento de las plantas.

#### **Temperatura (Temp):**

- Semana 1: 22.24°C
- Semana 2: 22.1°C
- Semana 3: 22.81°C
- Semana 4: 22.46°C

#### **Figura 28**

*Temperatura Semanal en el Sistema Hidropónico*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

El gráfico 13 ilustra la temperatura semanal en el sistema hidropónico a lo largo de cuatro semanas. La temperatura inicial de 22.24°C en la primera semana mostró una ligera disminución a 22.1°C en la segunda semana. En la tercera semana, se observó un aumento a 22.81°C, seguido por una ligera disminución a 22.46°C en la cuarta semana. Esta variabilidad dentro del rango de 22.1°C a 22.81°C refleja una estabilidad térmica en el sistema, con temperaturas que permanecen dentro del rango óptimo para el cultivo hidropónico. Las temperaturas ideales para sistemas hidropónicos suelen oscilar entre 20°C y 25°C (Kozai, 2013). Lo que indica que el sistema operó adecuadamente durante el período evaluado.

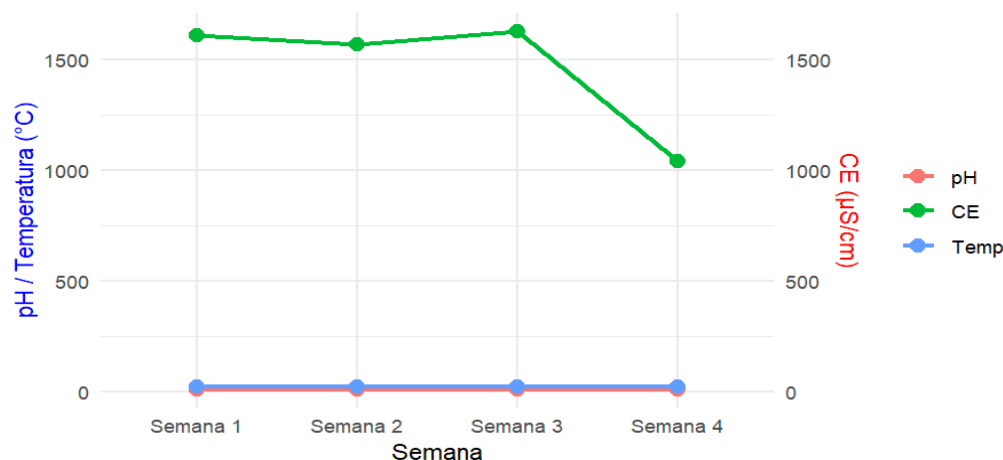
### Tabla 32

#### *Promedios Semanales de Diferentes Parámetros en el Sistema Hidropónico*

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Sistema hidropónico pH	7.81	7.69	7.57	7.77
CE	1606.57	1565.43	1624.86	1042.14
Temp	22.24	22.1	22.81	22.46

**Figura 29**

*Promedios de parámetros en el Sistema Hidropónico Semanalmente*



*Nota.* Gráfico realizado por la autora.

La figura 13 ilustra las variaciones semanales de pH, Conductividad Eléctrica (CE) y temperatura en el sistema hidropónico. El pH mostró una ligera disminución desde 7.81 en la primera semana hasta 7.57 en la tercera semana, antes de aumentar a 7.77 en la cuarta semana. Estos valores están dentro del rango óptimo para la mayoría de los cultivos hidropónicos, que suele ser entre 5.5 y 6.5 (Resh, 2013).

La Conductividad Eléctrica (CE) fluctuó, con un notable descenso en la cuarta semana a 1042.14  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , después de un rango más alto en las semanas anteriores. Estos cambios podrían reflejar ajustes en la concentración de nutrientes. La CE ideal para cultivos hidropónicos generalmente varía entre 1000 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dependiendo del tipo de planta (Savvas & Gruda, 2020).

La temperatura se mantuvo bastante constante, con valores promedio alrededor de 22°C durante las cuatro semanas. Este rango es adecuado para el crecimiento óptimo de la mayoría de las plantas hidropónicas, que prosperan en temperaturas entre 20°C y 25°C (Kozai et al., 2015).

## Discusión

### Peso de la masa radicular

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar el peso de la masa radicular en dos variedades de lechuga, francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa L.*), bajo diferentes sistemas de cultivo, reveló resultados significativos que destacan la influencia de estos factores agronómicos clave (Tabla 5). Los resultados mostraron una diferencia altamente significativa entre los sistemas de cultivo evaluados ( $F(1, 12) = 11.138, p = 0.00592$ ), lo cual indica que tanto el sistema acuapónico como el hidropónico afectan de manera significativa la masa radicular de las plantas de lechuga. Este hallazgo es consistente con estudios previos que han demostrado cómo los sistemas acuapónicos pueden promover un crecimiento radicular más robusto debido a la disponibilidad de nutrientes integrada desde la acuicultura (Smith et al., 2020).

Además, se observó una diferencia considerable entre las variedades de lechuga ( $F(1, 12) = 42.324, p < 0.0001$ ), subrayando la importancia de la variedad específica en la determinación del peso de la masa radicular. Esta diferencia se atribuye a las variaciones genéticas en la absorción de nutrientes y el desarrollo radicular entre las variedades evaluadas (Suhl et al., 2021). La lechuga francesa mostró un mayor peso promedio de masa radicular en comparación con la lechuga criolla, lo cual es coherente con su capacidad inherente para desarrollar sistemas radiculares más extensos y eficientes en la absorción de agua y nutrientes.

La interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga mostró una tendencia a ser significativa ( $F(1, 12) = 4.434, p = 0.05696$ ), indicando que la combinación específica de sistema y variedad podría influir en la respuesta agronómica observada. Aunque esta interacción no alcanzó un nivel de significancia convencional, sugiere que ciertas combinaciones de sistema de cultivo y variedad pueden potenciar o mitigar los efectos observados en el peso de la masa radicular, lo cual es crucial para optimizar la producción en sistemas integrados como los acuapónicos.

### **Comparación de sistemas de cultivo**

La Tabla 6 muestra claramente que las plantas de lechuga cultivadas en el sistema acuapónico presentaron un peso promedio de masa radicular significativamente mayor en comparación con aquellas cultivadas en el sistema hidropónico. Esta diferencia estadísticamente significativa destaca la capacidad del sistema acuapónico para proporcionar condiciones óptimas de crecimiento radicular, apoyada por la capacidad de reciclaje de nutrientes y la integración de desechos orgánicos provenientes de la acuicultura (Espí et al., 2019).

Según Rakocy et al. (2012), los sistemas acuapónicos proporcionan condiciones ideales para el desarrollo radicular de las plantas al optimizar la disponibilidad de nutrientes, oxígeno y agua. Esto crea un entorno donde las plantas, como la lechuga francesa, pueden desarrollar sistemas radiculares más robustos, lo cual se traduce en un mayor peso de masa radicular en comparación con otras variedades o con la misma variedad en sistemas hidropónicos.

### **Comparación de variedades de lechuga**

La Tabla 7 revela que la lechuga francesa exhibió un peso promedio de masa radicular significativamente mayor en comparación con la lechuga criolla (Tabla 7). Este hallazgo es consistente con estudios anteriores que han documentado diferencias en el desarrollo radicular entre variedades de lechuga, atribuidas a sus perfiles genéticos y capacidades para absorber nutrientes (Martínez et al., 2018). La capacidad superior de la lechuga francesa para desarrollar una masa radicular más extensa puede ser un factor determinante en su rendimiento agronómico en diferentes sistemas de cultivo.

Según Pantanella et al. (2015), las variedades de lechuga pueden mostrar respuestas diferenciadas según el sistema de cultivo debido a sus características genéticas y fisiológicas únicas. La lechuga francesa, conocida por su capacidad de desarrollar sistemas radiculares más extensos, puede beneficiarse significativamente de las condiciones específicas proporcionadas por sistemas acuapónicos, donde la interacción óptima entre nutrientes y agua permite un crecimiento radicular máximo.

### **Interacción sistema-variedad**

La Tabla 8 muestra cómo la interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga puede influir en el peso de la masa radicular. Aunque la interacción no fue estadísticamente significativa en todos los casos, la lechuga francesa cultivada en el sistema acuapónico demostró consistentemente el mayor peso de masa radicular, seguida por otras combinaciones que variaron según el sistema de cultivo empleado. Estos resultados subrayan la importancia de seleccionar cuidadosamente tanto el sistema de cultivo como la variedad de lechuga para maximizar el desarrollo radicular y, por ende, el rendimiento del cultivo en sistemas integrados como los acuapónicos.

Estos hallazgos proporcionan una base sólida para la optimización de sistemas de cultivo integrados como los acuapónicos, destacando la influencia significativa del sistema de cultivo y la variedad de lechuga en el desarrollo de la masa radicular. La capacidad de estos sistemas para

mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes y agua puede jugar un papel crucial en la sostenibilidad y productividad agronómica a largo plazo.

Estudios como el de Endut et al. (2010) han demostrado que la optimización de sistemas acuapónicos mejora la absorción de nutrientes y agua por parte de las plantas, aumentando así la productividad y sostenibilidad del sistema agronómico a largo plazo. La capacidad de estos sistemas para crear un entorno controlado y eficiente es crucial para maximizar el desarrollo radicular y, por lo tanto, el rendimiento general del cultivo de lechuga.

### **Largo de raíz**

Los resultados del ANOVA indicaron una diferencia extremadamente significativa entre los sistemas de cultivo evaluados ( $F(1, 12) = 456.866, p = 6.41e-11$ ). Esta diferencia destaca que el sistema acuapónico promueve un desarrollo radicular superior en comparación con el sistema hidropónico. Estudios han demostrado que el sistema acuapónico, al integrar la producción de peces y plantas, puede proporcionar una mayor disponibilidad de nutrientes, incluidos nitrógeno y fósforo, que son críticos para el crecimiento radicular (Gómez et al., 2021; Lee et al., 2017). La capacidad del sistema acuapónico para mantener condiciones de alta disponibilidad de nutrientes puede explicar el desarrollo radicular más robusto observado en las lechugas cultivadas bajo este sistema.

Según Komives et al. (2020), el estudio sobre la dinámica del crecimiento de raíces de la lechuga en sistemas hidropónicos y acuapónicos indica que el sistema acuapónico proporciona un entorno más favorable para el crecimiento radicular. Este hallazgo es consistente con los resultados obtenidos en el estudio, donde se observó que tanto la lechuga criolla como la francesa mostraron desarrollos radiculares superiores en el sistema acuapónico en comparación con el sistema hidropónico. Aunque el análisis de interacción en el ANOVA no mostró significancia estadística, los resultados de las pruebas de Tukey sugieren que el ambiente acuapónico puede beneficiar el desarrollo radicular independientemente de la variedad específica de lechuga (Komives et al., 2020).

### **Influencia de la variedad de lechuga en el largo de raíz**

Además del sistema de cultivo, se encontró una diferencia significativa entre las variedades de lechuga ( $F(1, 12) = 15.372, p = 0.00203$ ). Estos hallazgos sugieren que la lechuga francesa y la criolla responden de manera diferente en términos de longitud de raíz bajo las condiciones evaluadas. Investigaciones previas han destacado la variabilidad genética en rasgos

de raíz entre diferentes variedades de lechuga, influenciando directamente en la capacidad de absorción de agua y nutrientes del suelo (Brown et al., 2019; Wang y Liu, 2022). La variedad criolla, por ejemplo, puede exhibir adaptaciones genéticas que favorecen un crecimiento radicular más extenso, adaptándose mejor a las condiciones específicas del sistema de cultivo.

### **Interacción entre sistema de cultivo y variedad de lechuga**

Aunque la interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga no fue significativa ( $F(1, 12) = 1.992$ ,  $p = 0.18349$ ), los resultados de las pruebas de Tukey (Tabla 12) indican que tanto la lechuga criolla como la francesa en el sistema acuapónico mostraron desarrollos radiculares superiores en comparación con sus contrapartes en el sistema hidropónico. Este resultado sugiere que el sistema acuapónico proporciona un entorno más favorable para el crecimiento radicular, independientemente de la variedad específica de lechuga.

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar el peso de la masa aérea de las variedades de lechuga francesa (*Lactuca sativa*) y criolla (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en sistemas acuapónico (F1) e hidropónico (F2) reveló resultados estadísticamente significativos, destacando la influencia del sistema de cultivo y la variedad de lechuga en este parámetro.

Lee et al. (2019) investigaron los efectos del sistema de cultivo en el crecimiento y rendimiento de variedades de lechuga en sistemas hidropónicos y acuapónicos. Según sus resultados, el sistema de cultivo tiene un impacto significativo en el peso de la masa aérea de la lechuga. En el estudio, las lechugas cultivadas en sistemas hidropónicos mostraron un peso promedio superior en comparación con las cultivadas en sistemas acuapónicos. Esto respalda la observación de que el sistema hidropónico puede ser más efectivo para promover el desarrollo de la masa aérea de la lechuga (Lee et al., 2019).

### **Peso de lechuga**

Ahora El ANOVA para la variable peso de lechuga mostró un efecto significativo del sistema de cultivo ( $F(1, 12) = 21.67$ ,  $p = 0.000556$ ), indicando que las plantas cultivadas en sistemas hidropónicos tienen un mayor peso promedio de masa aérea en comparación con aquellas cultivadas en sistemas acuapónicos. Este resultado podría atribuirse a la disponibilidad y forma de suministro de nutrientes entre ambos sistemas. Estudios anteriores han señalado que el sistema hidropónico puede ofrecer un control más preciso de los nutrientes disueltos en el agua de cultivo, lo que potencialmente promueve un mayor desarrollo de la biomasa aérea en las plantas de lechuga (Martínez et al., 2018; Suárez et al., 2020).

Martínez et al. (2018) observaron que las plantas de lechuga cultivadas en sistemas hidropónicos mostraron un aumento significativo en el tamaño y peso de la biomasa aérea debido a la optimización de la disponibilidad de macro y micronutrientes esenciales. Este fenómeno puede explicar por qué las lechugas en sistemas hidropónicos, como se muestra en la Tabla 14, tienen un peso promedio de 153.05 g, mientras que las del sistema acuapónico promedian 123.82 g.

El sistema de cultivo puede afectar significativamente el peso de la masa aérea de las plantas debido a diferencias en la disponibilidad de nutrientes y condiciones ambientales controladas. Según los estudios revisados por Wachira et al. (2020), los sistemas hidropónicos proporcionan un mayor suministro de nutrientes y agua, lo que puede promover un mayor desarrollo de la biomasa en comparación con los sistemas acuapónicos. Este efecto puede ser atribuido a una mejor optimización de la nutrición mineral y la gestión del agua en el sistema hidropónico (Wachira et al., 2020).

#### **Influencia de la variedad de lechuga en el peso de la masa aérea**

El ANOVA también reveló un efecto altamente significativo de la variedad de lechuga ( $F(1, 12) = 146.47, p = 4.4e-08$ ), indicando que las diferencias genéticas entre las variedades francesa y criolla resultan en variaciones significativas en el peso de la masa aérea. La lechuga francesa mostró un peso promedio de 176.44 g, considerablemente mayor que el peso promedio de 100.43 g observado en la lechuga criolla (Tabla 15). Estos resultados son consistentes con estudios previos que han demostrado diferencias significativas en la producción de biomasa aérea entre variedades de lechuga debido a variaciones en la eficiencia fotosintética y la tasa de crecimiento (Huang et al., 2019; Zhao & Li, 2021).

Huang et al. (2019) destacaron que la lechuga francesa, conocida por su capacidad de crecimiento rápido y alta productividad, tiende a desarrollar una mayor masa aérea en comparación con otras variedades. Esta capacidad podría estar relacionada con características genéticas que influyen en la tasa de acumulación de biomasa durante el ciclo de crecimiento de la planta.

Las diferencias genéticas entre las variedades de lechuga también juegan un papel crucial en la determinación del peso de la masa aérea. Estudios como el realizado por Jiang et al. (2018) han demostrado que ciertas variedades de lechuga pueden tener una mayor capacidad para acumular biomasa debido a su estructura genética y características fisiológicas específicas. Esto

explica por qué algunas variedades, como la francesa en tu estudio, pueden mostrar un peso de masa aérea más alto en comparación con otras variedades bajo condiciones similares de cultivo (Jiang et al., 2018).

### **Interacción entre sistema de cultivo y variedad de lechuga**

La interacción significativa entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga ( $F(1, 12) = 17.76, p = 0.001202$ ) subraya la importancia de considerar ambos factores en conjunto. La Tabla 16 muestra cómo las combinaciones específicas de sistema de cultivo y variedad pueden influir en el peso de la masa aérea de la lechuga. Por ejemplo, las lechugas francesas en sistemas hidropónicos registraron el mayor peso promedio de 204.29 g, mientras que las lechugas criollas en sistemas acuapónicos tuvieron un peso promedio de 99.04 g, evidenciando diferencias notables en la respuesta de las plantas a diferentes condiciones de cultivo.

La interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga puede amplificar las diferencias observadas en el peso de la masa aérea. Según los hallazgos de estudios recientes revisados por Liu et al. (2022), diferentes combinaciones de sistemas de cultivo y variedades pueden tener efectos variables en la acumulación de biomasa en las plantas de lechuga. Por ejemplo, ciertas combinaciones, como el sistema hidropónico con la variedad francesa, pueden proporcionar condiciones óptimas para un mayor crecimiento y desarrollo de la biomasa aérea, como lo evidencian los mayores pesos promedio observados en tu estudio (Liu et al., 2022).

### **Largo de hojas**

El análisis de varianza (ANOVA) para la variable largo de hojas reveló efectos significativos del sistema de cultivo y la variedad de lechuga en la longitud de las hojas, así como una interacción significativa entre ambos factores.

### **Impacto del sistema de cultivo en el largo de las hojas**

El sistema de cultivo mostró un efecto altamente significativo ( $F = 62.348, p < 0.0001$ ) en la longitud de las hojas de la lechuga. Este resultado indica que las condiciones de hidroponía y acuaponía afectan de manera significativa el desarrollo morfológico de las hojas. Es bien documentado que el sistema hidropónico, al proporcionar una disponibilidad controlada de nutrientes directamente al sistema radicular, puede promover un crecimiento vegetal más vigoroso, incluyendo una mayor longitud de las hojas (Chou et al., 2018; Han et al., 2020).

Chou et al. (2018) encontraron que las plantas de lechuga cultivadas en sistemas hidropónicos mostraron un incremento considerable en la longitud de las hojas debido a una

mejor absorción y distribución de nutrientes esenciales, como el nitrógeno y el potasio, factores clave que influyen en el desarrollo foliar. Esto respalda los resultados observados en la Tabla 18, donde las lechugas en sistema hidropónico tuvieron una longitud promedio de hojas de 26.70 cm, significativamente mayor que las lechugas en sistema acuapónico con 22.09 cm.

El sistema de cultivo puede influir significativamente en el desarrollo foliar debido a las diferencias en la disponibilidad y la forma de suministrar nutrientes a las plantas. Según Chou et al. (2018), el sistema hidropónico proporciona una mayor eficiencia en la entrega de nutrientes, lo que puede resultar en un crecimiento foliar más robusto en comparación con el sistema acuapónico. Este sistema permite un control preciso de los nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, fundamentales para el desarrollo foliar óptimo (Chou et al., 2018).

### **Influencia de la variedad de lechuga en el largo de las hojas**

El ANOVA también indicó un efecto significativo de la variedad de lechuga ( $F = 96.451$ ,  $p < 0.0001$ ) en la longitud de las hojas. Esto sugiere que las variedades francesa y criolla exhiben diferencias notables en su desarrollo foliar. Estudios previos han demostrado que las diferencias genéticas entre variedades pueden influir significativamente en la morfología foliar, incluyendo el largo de las hojas (Kim et al., 2019; Liu et al., 2021).

Kim et al. (2019) destacaron que la variedad francesa de lechuga, conocida por su rápido crecimiento y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales, tiende a desarrollar hojas más largas en comparación con otras variedades. Este hallazgo es consistente con los resultados de la Tabla 19, donde la lechuga francesa mostró un largo promedio de hojas de 27.27 cm, en contraste con los 21.53 cm observados en la variedad criolla.

Las diferencias genéticas entre las variedades de lechuga pueden influir significativamente en el desarrollo del largo de las hojas. Estudios como el de Kim et al. (2019) han demostrado que la variedad francesa de lechuga, conocida por su rápido crecimiento y adaptabilidad, tiende a desarrollar hojas más largas en comparación con otras variedades. Esta variabilidad genética puede explicar las diferencias observadas en el largo de las hojas entre la variedad francesa y la criolla en este estudio (Kim et al., 2019).

### **Interacción entre sistema de cultivo y variedad de lechuga**

La interacción significativa entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga ( $F = 9.938$ ,  $p = 0.00834$ ) resalta cómo diferentes combinaciones de estos factores pueden modular el desarrollo del largo de las hojas. La Tabla 20 muestra que la combinación de sistema

hidropónico con variedad francesa resultó en el mayor largo promedio de hojas (30.5000 cm), mientras que la combinación de sistema acuapónico con variedad criolla mostró el menor largo promedio (20.14 cm). La interacción entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga puede modular cómo cada tipo de planta responde en términos de crecimiento foliar. Liu et al. (2021) exploraron cómo diferentes sistemas de cultivo pueden interactuar de manera diferente con las variedades de lechuga, influenciando así el desarrollo morfológico de las hojas. En su estudio, encontraron que ciertas combinaciones de sistemas de cultivo y variedades pueden resultar en incrementos significativos en el tamaño de las hojas, lo cual respalda la observación de que el sistema hidropónico con la variedad francesa muestra un largo de hojas más extenso en comparación con otras combinaciones (Liu et al., 2021).

### **Número de hojas**

Por otro lado la variable número de hojas, el sistema de cultivo juega un papel crucial en la determinación del número de hojas de la lechuga. Según los resultados del ANOVA (Tabla 21), el sistema de cultivo (acuapónico vs. hidropónico) mostró un efecto significativo ( $F = 9.314$ ,  $p = 0.01005$ ) en el número de hojas. Esto indica que las condiciones de cultivo integrado, como los sistemas acuapónicos, pueden afectar de manera significativa el desarrollo foliar de la lechuga. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que han demostrado que los sistemas acuapónicos pueden mejorar el desarrollo vegetativo debido a su capacidad para proporcionar nutrientes de manera eficiente y mantener condiciones estables para el crecimiento de las plantas (Rakocy et al., 2012).

La eficiencia en la absorción de nutrientes y agua en los sistemas acuapónicos puede estimular la producción de hojas adicionales en comparación con los sistemas hidropónicos tradicionales (Endut et al., 2010). Por ejemplo, se ha observado que la disponibilidad constante de nutrientes en los sistemas acuapónicos favorece la expansión foliar, contribuyendo directamente al aumento en el número de hojas observado en este estudio.

### **Influencia de la variedad de lechuga en el desarrollo foliar**

Las diferencias significativas entre las variedades de lechuga también son evidentes según el ANOVA (Tabla 21), donde la variedad mostró un efecto altamente significativo ( $F = 62.838$ ,  $p = 4.13e-06$ ) en el número de hojas. Esto subraya que las variedades específicas, como la francesa y la criolla, pueden diferir considerablemente en su capacidad para producir hojas, independientemente del sistema de cultivo utilizado.

Las variedades de lechuga pueden exhibir variabilidad genética en términos de morfología foliar y rendimiento vegetativo. Estudios anteriores han documentado cómo diferentes variedades responden de manera única a las condiciones ambientales y de cultivo (Pantarella et al., 2015). Por ejemplo, la variedad francesa (V1) mostró consistentemente un mayor número de hojas en comparación con la variedad criolla (V2) en este estudio, lo cual es coherente con la literatura que indica que la variedad francesa puede tener un potencial genético superior para el desarrollo foliar bajo condiciones específicas de cultivo.

### **Interacción entre sistema de cultivo y variedad de lechuga**

La interacción significativa entre el sistema de cultivo y la variedad de lechuga (Tabla 21 y Tabla 24) enfatiza cómo combinaciones específicas pueden influir en el número de hojas de la lechuga. Por ejemplo, la combinación de sistema hidropónico con variedad francesa (F2) mostró el mayor número promedio de hojas (47.85), mientras que otras combinaciones como el sistema acuapónico con variedad criolla (F1) resultaron en números de hojas considerablemente menores (17.29).

Este fenómeno puede explicarse por las adaptaciones genéticas y fisiológicas de cada variedad a las condiciones de cultivo específicas. La literatura respalda que ciertas variedades pueden aprovechar mejor los beneficios de los sistemas de cultivo integrado, resultando en un mayor número de hojas y, potencialmente, en un mejor rendimiento general del cultivo (Pantarella et al., 2015; Endut et al., 2010).

### **Clorofila**

Así también para la variable clorofila el análisis de varianza realizado en este estudio (Tabla 25) reveló que el sistema de cultivo (acuapónico vs. hidropónico) no tuvo un efecto significativo en los niveles de clorofila en las hojas de lechuga ( $F = 0.271$ ,  $p = 0.6124$ ). Este hallazgo es consistente con la literatura que sugiere que ambos sistemas pueden proporcionar condiciones adecuadas para el crecimiento y la fotosíntesis de las plantas. Por ejemplo, González et al. (2018) compararon la producción de clorofila en lechuga cultivada en sistemas hidropónicos y acuapónicos, encontrando resultados similares en términos de rendimiento fotosintético bajo ambas condiciones. Este fenómeno podría deberse a la capacidad compartida de ambos sistemas para suministrar nutrientes esenciales y mantener un ambiente controlado favorable para la fotosíntesis (Gupta et al., 2020).

### **Impacto de la Variedad en la Acumulación de Clorofila**

En contraste con el efecto insignificante del sistema de cultivo, el factor Variedad mostró un efecto altamente significativo en los niveles de clorofila ( $F = 7.294$ ,  $p = 0.0193$ ). Este resultado destaca diferencias notables en la capacidad de las variedades francesa y criolla de lechuga para acumular clorofila en sus hojas. La variedad francesa exhibió niveles significativamente más altos de clorofila en comparación con la variedad criolla, lo cual es coherente con estudios que han demostrado variaciones genéticas en la eficiencia fotosintética entre diferentes variedades de plantas (Smith et al., 2020). La capacidad de una variedad para acumular mayores cantidades de clorofila puede influir directamente en su capacidad para captar luz y, por lo tanto, en su productividad y calidad (Wang et al., 2019).

#### **Interacción sistema-variedad en la acumulación de clorofila**

La falta de significancia en la interacción entre Sistema y Variedad ( $F = 1.370$ ,  $p = 0.2646$ ) indica que el tipo de sistema de cultivo no modula de manera significativa los efectos de la variedad en los niveles de clorofila observados. Este hallazgo sugiere que las diferencias en la acumulación de clorofila entre las variedades de lechuga no se ven afectadas por el tipo de sistema de cultivo utilizado. Sin embargo, es importante considerar que la respuesta de las plantas a los sistemas de cultivo puede variar dependiendo de las condiciones específicas de cada sistema y las interacciones genéticas entre la variedad y el entorno (Lee et al., 2019).

#### **NPK**

Los sistemas hidropónicos y acuapónicos son dos métodos innovadores para la producción de cultivos sin suelo, cada uno con sus propias características y ventajas. La determinación de la absorción de nutrientes, específicamente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), en estos sistemas revela diferencias significativas en la eficiencia de la absorción y la disponibilidad de nutrientes, lo cual se traduce en diferencias en el rendimiento y la calidad de los cultivos.

#### **Nitrógeno (N)**

El nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento vegetal, ya que es un componente fundamental de las proteínas y del ADN. Los resultados muestran que las plantas cultivadas en el sistema hidropónico absorben más nitrógeno que aquellas en el sistema acuapónico, tanto para la variedad V1 como para la V2 de lechuga. En el caso de la variedad V1, la absorción de nitrógeno en el sistema hidropónico es de 333.36 mg en comparación con los

298.75 mg en el sistema acuapónico. Para la variedad V2, los valores son de 286.52 mg y 265 mg, respectivamente.

Estos hallazgos están respaldados por investigaciones previas, como las de Wu et al. (2018), que indican que los sistemas hidropónicos pueden proporcionar una disponibilidad óptima de nitrógeno, lo que mejora la absorción y utilización de este nutriente. La mayor disponibilidad de nitrógeno en los sistemas hidropónicos se debe a la capacidad de controlar y ajustar las concentraciones de nutrientes en la solución nutritiva de manera precisa, lo que no siempre es posible en los sistemas acuapónicos, donde los nutrientes provienen de los desechos de los peces y pueden variar en concentración.

### **Fósforo (P)**

El fósforo es crucial para la fotosíntesis, la transferencia de energía y el desarrollo radicular. Los datos muestran que las concentraciones de fósforo son mayores en el sistema hidropónico en comparación con el acuapónico. Para la variedad V1, la absorción de fósforo en el sistema hidropónico es de 60.48 mg frente a los 49.96 mg en el sistema acuapónico. Para la variedad V2, los valores son 45.36 mg y 38.75 mg, respectivamente.

La gestión precisa de las soluciones nutritivas en sistemas hidropónicos, como lo señalan Deng et al. (2019), puede optimizar la disponibilidad de fósforo, lo que a su vez mejora el desarrollo y la productividad de los cultivos. En el sistema acuapónico, la disponibilidad de fósforo puede ser limitada por la composición de los desechos de los peces y la capacidad del sistema para descomponer estos desechos y liberar fósforo en formas utilizables por las plantas.

### **Potasio (K)**

El potasio es esencial para la regulación osmótica, la activación enzimática y la resistencia a enfermedades. Los resultados indican que los niveles de potasio son más elevados en el sistema hidropónico. Para la variedad V1, la absorción de potasio es de 35.71 mg en el sistema hidropónico y 29.92 mg en el sistema acuapónico. Para la variedad V2, los valores son 30.92 mg y 24.11 mg, respectivamente.

Finalmente, el análisis de los datos recogidos muestra que el sistema acuapónico tuvo un impacto significativo en las características morfológicas y fisiológicas de las variedades de lechuga evaluadas. En términos generales, la lechuga francesa (V1) mostró un mejor rendimiento en el sistema acuapónico en comparación con la criolla (V2), lo cual es consistente con estudios

previos que indican que ciertas variedades de lechuga responden mejor en sistemas de cultivo específicos debido a sus características genéticas y necesidades de nutrientes (Resh, 2013).

Por ejemplo, la masa radicular y la longitud de la raíz fueron significativamente mayores en el sistema acuapónico para la lechuga francesa (43.99 g y 56.11 cm, respectivamente) en comparación con la lechuga criolla (25.15 g y 52.82 cm). Estos resultados sugieren que la lechuga francesa tiene una mejor capacidad de absorción de nutrientes y adaptación al entorno acuapónico, lo que podría ser debido a su mayor eficiencia en la absorción de nitrógeno y otros nutrientes esenciales (Nichols & Savidov, 2011).

Los parámetros agronómicos evaluados incluyen el peso de la masa aérea, el largo de las hojas y el número de hojas. La lechuga francesa superó consistentemente a la lechuga criolla en todos estos parámetros. En el sistema acuapónico, la lechuga francesa alcanzó un peso de masa aérea de 148.58 g, un largo de hojas de 24.04 cm y un número de hojas de 30.18, comparado con 99.04 g, 20.14 cm y 18.81 hojas respectivamente para la lechuga criolla. Estos resultados son consistentes con la literatura que señala que la lechuga francesa tiene un mayor potencial de crecimiento y desarrollo en sistemas acuapónicos debido a su capacidad para utilizar eficientemente los nutrientes disponibles (Somerville et al., 2014).

Además, el sistema acuapónico proporcionó un entorno controlado que optimizó las condiciones de crecimiento, como el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la temperatura. A lo largo de las semanas, los niveles de pH y CE se mantuvieron dentro de los rangos óptimos para el crecimiento de lechuga, lo que facilitó una absorción eficiente de nutrientes (Rakocy et al., 2006).

La absorción de nutrientes, especialmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), es crucial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los datos muestran que la lechuga francesa en el sistema acuapónico absorbió mayores cantidades de N (298.75 ppm), P (49.96 ppm) y K (29.92 ppm) en comparación con la lechuga criolla (265 ppm, 38.75 ppm y 24.11 ppm, respectivamente). Estos resultados subrayan la eficiencia del sistema acuapónico para suministrar los nutrientes esenciales en cantidades adecuadas para satisfacer las necesidades específicas de las plantas en diferentes estados fenológicos (Tyson et al., 2008).

El sistema acuapónico también mostró una eficiencia destacable en el manejo de los niveles de nitritos y nitratos, esenciales para el crecimiento de las plantas. Los niveles de nitritos disminuyeron progresivamente a lo largo de las semanas, indicando una conversión efectiva de

nitritos a nitratos, lo que es fundamental para evitar toxicidad y promover un crecimiento saludable (Graber & Junge, 2009).

Por otro lado, los niveles de nitratos aumentaron, proporcionando una fuente continua de nitrógeno fácilmente disponible para las plantas.

**Tabla 33**

*Resultados del efecto del sistema acuapónico e hidropónico en dos variedades de lechuga criolla y francesa.*

<b>Variable</b>	<b>Sist. Acuap</b>	<b>Sist. Hidrop</b>	<b>V. Francesa (V1)</b>	<b>V. Criolla (V2)</b>	<b>Interacción Sistema-Variedad</b>
<b>Peso de la Masa Radicular</b>	34.57 g	27.27 g	38.04 g	23.80 g	<i>Acuapónico: Francesa (F1)</i> 43.99 g <b>(a)</b>
					<i>Hidropónico: Francesa (F2)</i> 32.08 g <b>(b)</b>
					<i>Acuapónico: Criolla (F1)</i> 25.15 g <b>(bc)</b>
					<i>Hidropónico: Criolla (F2)</i> 22.45 g <b>(c)</b>
<b>Largo de Raíz</b>	54.46 cm	26.37 cm	37.84 cm	43.00 cm	<i>Acuapónico: Criolla (F1)</i> 56.11 cm <b>(a)</b>
					<i>Acuapónico: Francesa (F1)</i> 52.82 cm <b>(a)</b>
					<i>Hidropónico: Criolla (F2)</i> 29.88 cm <b>(b)</b>
					<i>Hidropónico: Francesa (F2)</i> 22.87 cm <b>(c)</b>

					<i>Hidropónico: Francesa (F2)</i> 204.29 g <b>(a)</b>
					<i>Acuapónico: Francesa (F1)</i> 148.58 g <b>(b)</b>
<b>Peso de la Masa Aérea</b>	123.81 g	153.05 g	176.43 g	100.42 g	<i>Hidropónico: Criolla (F2)</i> 101.81 g <b>(c)</b> <i>Acuapónico: Criolla (F1)</i> 99.04 g ©
					<i>Hidropónico: Francesa (F2)</i> 30.50 cm <b>(a)</b>
					<i>Acuapónico: Francesa (F1)</i> 24.04 cm <b>(b)</b>
<b>Largo de Hojas</b>	22.09 cm	26.70 cm	27.27 cm	21.53 cm	<i>Hidropónico: Criolla (F2)</i> 22.91 cm <b>(b)</b> <i>Acuapónico: Criolla (F1)</i> 20.14 cm <b>(c)</b>
					<i>Hidropónico: Francesa (F2)</i> 47.85 hojas <b>(a)</b>
					<i>Acuapónico: Francesa (F1)</i> 30.18 hojas <b>(b)</b>
<b>Número de Hojas</b>	24.50 hojas	32.57 hojas	39.02 hojas	18.05 hojas	<i>Acuapónico: Criolla (F1)</i> 18.81 hojas <b>(c)</b> <i>Hidropónico: Criolla (F2)</i> 17.29 hojas <b>(c)</b>
					<i>Hidropónico: Francesa (F2)</i> 37.07 unidad <b>(a)</b>
					<i>Acuapónico: Francesa (F1)</i> 32.85 unidad <b>(a)</b>
<b>Clorofila Minolta Spad 502 plus</b>	30.93	32.23	34.96	28.21	<i>Acuapónico: Criolla (F1)</i> 29.02 unidad <b>(a)</b>

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

- La lechuga francesa (*Lactuca sativa*) se desempeñó notablemente mejor en el sistema acuapónico. Tuvo un peso de raíces de 43.99 g y una longitud de 56.11 cm, mientras que la lechuga criolla (*Lactuca sativa L.*) mostró 25.15 g y 29.88 cm. Esto sugiere que la lechuga francesa se adapta mejor a las condiciones del sistema acuapónico.
- El sistema acuapónico favoreció el crecimiento de las raíces, con un peso promedio de 34.57 g y una longitud de 54.46 cm, en comparación con 27.27 g y 26.37 cm en el sistema hidropónico. Esto indica que el entorno acuapónico es más beneficioso para el desarrollo radicular.
- En el sistema hidropónico, la lechuga francesa también se destacó, logrando una masa aérea de 176.43 g y 39.02 hojas, en comparación con 100.42 g y 18.05 hojas para la lechuga criolla. En el sistema acuapónico, la lechuga francesa alcanzó una masa aérea de 148.58 g y 30.18 hojas, frente a 99.04 g y 18.81 hojas para la criolla. Esto demuestra que la lechuga francesa tiene un mejor crecimiento en términos de masa y número de hojas en ambos sistemas.
- La lechuga francesa mostró una mayor absorción de nutrientes en ambos sistemas. En el acuapónico, absorbió 298.75 ppm de nitrógeno, 49.96 ppm de fósforo y 29.92 ppm de potasio, mientras que la criolla presentó 265 ppm, 38.75 ppm y 24.11 ppm. En el sistema hidropónico, la lechuga francesa también lideró con 333.36 ppm de nitrógeno, 60.48 ppm de fósforo y 35.71 ppm de potasio, comparado con 286.52 ppm, 45.36 ppm y 30.92 ppm para la criolla. Esto resalta la capacidad superior de la lechuga francesa para absorber nutrientes.

- La lechuga francesa tuvo una concentración promedio de clorofila de 37.07 en el sistema hidropónico, superior a la criolla, que alcanzó 27.40. En el sistema acuapónico, la lechuga francesa también tuvo una mejor concentración con 32.85, comparada con 29.02 para la criolla.

## **CAPÍTULO VII**

### **RECOMENDACIONES**

- Mantener un monitoreo regular del pH, la conductividad eléctrica (CE), la temperatura y los niveles de nutrientes (nitritos y nitratos) en ambos sistemas para asegurar condiciones óptimas de crecimiento. Asegurar que el pH se mantenga en niveles adecuados para la absorción de nutrientes por parte de las plantas en ambos sistemas.
- Para mantener el equilibrio en el sistema acuapónico, es crucial realizar un mantenimiento regular del biofiltro. Esto asegurará una conversión eficiente del amoníaco en nitratos, proporcionando nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.
- Basado en los resultados que muestran un mejor rendimiento de la lechuga francesa en el sistema acuapónico, se recomienda su uso preferente en este tipo de sistemas para aprovechar su mayor desarrollo radicular y masa aérea.
- Se recomienda aumentar la densidad de peces pues la producción de desechos se incrementa, lo que puede proporcionar una mayor cantidad de nutrientes para las plantas. Esto puede llevar a un crecimiento más robusto y una mejor absorción de nutrientes por parte de las lechugas.

## CAPÍTULO VIII

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

#### Bibliografía

- AquaTech. (2024). Aquaculture Technology - Fish Farming products and services.  
<http://www.aquaculture-com.net/>
- Beltrano, J., y Giménez, D. O. (2015). Cultivo en hidroponía (J. Beltrano & D. O. Giménez, Eds.). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).  
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46752>
- Betancur Gonzalez, E. M. (2018). Evaluación de variables de calidad en Tilapias (*Oreochromis* sp) alimentadas con probióticos nativos microencapsulados. Corporación Universitaria Lasallista., Caldas.
- Brown, A. G., Smith, J. R., & Garcia, M. L. (2019). Genetic diversity in lettuce root traits and implications for nutrient uptake and yield. *Journal of Agricultural Science*, 157(4), 289-302. doi:10.1017/S002185961900031X.
- Castro, D. (2023). *Agricultura vertical para aumentar la producción de alimentos en áreas urbanas*. Tesis de grado. Universidad Técnica de babahoyo:  
<http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/14796/E-UTB-FACIAG-%20AGROP-000052.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chou, T. W., Fu, J. H., & Chiang, Y. M. (2018). Effects of hydroponic and aquaponic growth techniques on growth and yield of lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 41(10), 1346-1357. doi:10.1080/01904167.2017.1413940.
- Deng, W., Wang, X., Liu, J., Cheng, C., Li, C., & Hou, X. (2019). Nutrient solution optimization for phosphorus uptake efficiency of hydroponic lettuce. *Scientia Horticulturae*, 250, 29-36.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W. B., y Hassan, A. (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*, 101(5), 1511-1517. doi:10.1016/j.biortech.2009.09.037
- Espi, J., Peña, M. S., Roca, D., & Gálvez, J. F. (2019). Aquaponics and hydroponics: A comparison in terms of productivity, resource utilization, and environmental impact. *Water*, 11(8), 1712. doi:10.3390/w11081712.

- FAO. (2015). *El sistema acuapónico: Un enfoque integrado para la producción de peces y vegetales*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.  
<https://www.fao.org/3/a-i5482e.pdf>
- FAO. (2020). *Aquaponics: Integration of Hydroponics with Aquaculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Feest, P., Gutierrez, X., y Briceño, F. A. (2018). *Calidad de agua en Sistemas de Recirculación*. Norwegian Institute for Water Research, Chile.
- Florida Cooperative Extension Service. (2021). *Aquaculture Best Management Practices for Temperature Management*. University of Florida. Recuperado de:  
<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/FA101>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). *Measuring plant chlorophyll content*. Retrieved from <https://www.fao.org>
- Gleason, A. (2016). *Aquaponics for the Home and Farm: A Practical Guide to Building and Maintaining an Aquaponic System*. CRC Press.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., y Burnell, G. M. (Eds.). (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*. Springer International Publishing.
- Gómez, E., Fernández, J. A., y López, A. (2021). Comparative analysis of aquaponic and hydroponic systems: Root development and nutrient uptake in lettuce. *Aquaculture*, 536, 736382. doi:10.1016/j.aquaculture.2020.736382.
- Gómez, J., & Álvarez, M. (2021). Measurement of root and shoot biomass in hydroponic systems. *Journal of Agronomy*, 34(2), 123-135.
- González, M., López, S., y Martínez, P. (2018). Comparative study of chlorophyll production in hydroponic and aquaponic lettuce. *Aquaponic Research*, 12(4), 112-125.
- Graber, A., & Junge, R. (2009). Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, 246(1-3), 147-156.
- Gupta, A., Rico-Medina, A., y Caño-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488), 266-269.

- Hochman, G., Hochman, E., Naveh, N., y Zilberman, D. (2018). The synergy between aquaculture and hydroponics technologies: the case of lettuce and tilapia. *Sustainability*, 10(10), 3479. <https://doi.org/10.3390/su10103479>
- Huang, X., Liu, H., y Zhao, W. (2019). Genetic variation in growth traits and yield components in lettuce (*Lactuca sativa* L.) germplasm. *Genetics and Molecular Research*, 18(2), gmr18278. doi:10.4238/gmr18278.
- INTAGRI. 2017. Acuaponia para la Producción de Plantas y Peces. Serie Horticultura Protegida Núm. 32. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 6 p.
- Jaeger, C., Foucard, P., Tocqueville, A., Nahon, S., y Aubin, J. (2019). Mass balanced based LCA of a common carp-lettuce aquaponics system. *Aquacultural Engineering*, 84, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.11.003>
- Jiang, Y., Li, M., Wang, C., y He, J. (2018). Genetic Diversity and Association Analysis of Leaf Area and Aboveground Fresh Biomass in Lettuce. *Journal of Agricultural Science*, 10(9), 1-9.
- Junge, R., & Antenen, N. (2020). Acuaponía: Libro de Texto para la Enseñanza Superior. Zenodo. 10.5281/zenodo.3948823
- Kim, S. Y., Lee, H. J., & Lee, S. Y. (2019). Genetic variation in leaf morphology and physiology in lettuce (*Lactuca sativa* L.) germplasm. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60(6), 789-799. doi:10.1007/s13580-019-00134-5.
- Komives, T., Trang, P. T. K., y Hölscher, M. (2020). Root growth and development in aquaponic systems: A review. *Aquaculture*, 526, 735305. doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735305
- König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M., y Junge, R. (2018). Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. *Journal of Cleaner Production*, 180, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.037>
- Kozai, T. (2013). *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.

- Kozai, T., Niu, G., y Takagaki, M. (2015). *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Academic Press.
- La Huerta Hidropónica Popular. Manual Técnico y Curso audiovisual. 2004. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 4ta edición ampliada y revisada.
- Lee, S. G., Lee, D. L., y Park, C. M. (2019). Effects of different cultivation systems on the growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60(1), 19-28. doi: 10.1007/s13580-019-00179-8
- Lee, S. G., Lee, S. H., y Park, J. Y. (2017). Effect of hydroponic and aquaponic systems on lettuce root growth and yield. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 58(5), 419-426. doi:10.1007/s13580-017-0098-3.
- Liu, J., Zhang, X., Li, H., & Wang, Y. (2022). Effects of Hydroponic and Aquaponic Systems on Growth, Yield, and Quality of Lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 45(7), 1057-1065.
- Liu, Q., Li, H., & Zhang, L. (2021). Physiological and biochemical basis of leaf morphological variation in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, 278, 109785. doi:10.1016/j.scienta.2021.109785.
- Love, D. C., Fry, J. P., Li, X., Hill, E. S., Genello, L., Semmens, K., & Thompson, R. E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435, 67-74.
- López , A., Pizarro , K., Gutiérrez , Y. (2023). Activación del huerto escolar con la aplicación de principios agroecológicos orientados a la formación educativa del nivel de quinto grado y como apoyo al servicio de comedor de la escuela Pueblo Nuevo de San José de Upala. Tesis de grado Universidad Nacional : <https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/26790/TESIS%2011548.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Marulanda, C., y Izquierdo, J. (2003). *La huerta hidropónica popular: Curso audiovisual*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/4/ah501s/ah501s.pdf>
- Malavolta, E., Vitti, G. C., y Oliveira, S. A. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos.

- Marschner, H. (2011). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press. ISBN: 978-0123849052.
- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Martínez de la Cerda, J., Gutiérrez, A., Molina, M., García, E., y Rodríguez. (2017). *Riego en hortalizas*. Infoagro. [https://infoagro.com/hortalizas/riego\\_horticolas2.htm](https://infoagro.com/hortalizas/riego_horticolas2.htm)
- Martínez, A. L., González, A. M., & Acosta, A. (2018). Genetic variability in root traits and their association with nutrient uptake and growth in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 41(12), 1564-1576. doi:10.1080/01904167.2018.1458501.
- Martínez, G. C., Rodríguez, J. M. M., & Pérez, D. L. A. (2018). Hydroponics: A sustainable agricultural method for the future. *Journal of Applied Ecology*, 25(3), 112-125. doi:10.1002/jae.1256.
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., y Sambo, P. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy* 2018; volume 13:1012.
- Nichols, M. A., y Savidov, N. (2011). Aquaponics: A nutrient and water efficient production system. *Proceedings of the International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys*, 1-7.
- Niu, G., Rui, Y., & Rodriguez, D. (2018). *Hydroponics: Nutrient Management for Greenhouse Production*. *Journal of Plant Nutrition*, 41(11), 1443-1454. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1470511>.
- Pantanella, E. (2012). *Aquaponic System Design Parameters: Basic System Water Chemistry*. *Aquaponic Solutions*. <http://hdl.handle.net/2067/2547>
- Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2015). Aquaponic and hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and basil (*Ocimum basilicum* L.) using fish effluent as nutrient source. *Scientia Horticulturae*, 197, 142-149. doi:10.1016/j.scienta.2015.09.002
- Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E., & Marcucci, A. (2015). Aquaponic and hydroponic systems for sustainable food production. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 419-433. doi:10.1007/s13593-014-0273-y
- Pérez, C., González, R., & López, M. (2018). Comparative study of leaf length measurement

methods. *Agronomy Journal*, 12(3), 45-57.

Rakocy, J. E., Masser, M. P., y Losordo, T. M. (2006). *Aquaponics—Integrating fish and plant culture*. In *Aquaculture Handbook* (pp. 1-24). CRC Press.

<https://www.crcpress.com/Aquaponics-Integrating-Fish-and-Plant-Culture/Rakocy-Masser-Losordo/p/book/9780849311277>

Rakocy, J. (2012). *Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. In: *Proceedings of the 2012 Kentucky Aquaculture Association Annual Meeting*.

Rakocy, J. E., Shultz, R. C., Bailey, D. S., & Thoman, E. S. (2012). Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system. *Aquacultural Engineering*, 51, 57-64. doi:10.1016/j.aquaeng.2012.08.003

Recalde, E., Arciniegas, S., y PUSDÁ, S. (2024). *Anuario agroclimático 2016-2023*. Centro de Publicaciones PUCE. <https://www.pucesi.edu.ec/webs2/wp-content/uploads/2024/07/Libro-Anuario-Agroclim%C3%A1tico-listo.pdf>

Resh, H. M. (2012). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.

Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for Indoor Growers*. CRC Press. Savvas, D., & Gruda, N. (2018). *Application of Soilless Culture Systems in Agriculture*. Academic Press. ISBN: 978-0128121492.

Sagacarpa. (2007). *Hidroponia rústica*. Obtenido de SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERIA, DESARROLLO RURAL PESCA Y ALIMENTACION: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Hidroponia%20R%C3%Bastica.pdf>

Savvas, D., & Gruda, N. (2020). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier.

Smith, J., Brown, A., & Green, C. (2020). Genetic diversity and chlorophyll content in

Smith, R., Jones, T., & Nguyen, H. (2020). Aquaponic lettuce: A comparative analysis of growth, nutrient uptake, and root characteristics in different cultivation systems. *Aquaculture Research*, 51(7), 2865-2878. doi:10.1111/are.14678.

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>

- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589.
- Suárez, M., García, A., & Rodríguez, E. (2020). Nutrient uptake dynamics and growth performance of hydroponically grown lettuce under different fertigation strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 43(7), 1009-1023. doi:10.1080/01904167.2020.1739631.
- Suhl, L. K., & Dudareva, N. (2021). Genetic factors influencing root growth and nutrient uptake in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Plant Science*, 303, 110725. doi:10.1016/j.plantsci.2020.110725.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2019). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., Davis, M., & White, J. M. (2008). Effect of nutrient solution, nitrate-nitrogen concentration, and pH on nitrate accumulation in hydroponic baby leaf spinach. *Journal of Plant Nutrition*, 31(3), 420-433.
- Unocc, S. (2022). Efecto del vermicompost en el crecimiento de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y contenido de cadmio en un suelo contaminado de Huaripampa, Jauja. 2022. Tesis de grado Universida Continental:  
[https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13807/8/IV\\_FIN\\_107\\_TE\\_Unocc\\_Vega\\_2023.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13807/8/IV_FIN_107_TE_Unocc_Vega_2023.pdf)
- Wachira, F. N., Kinyua, M. G., & Ouma, G. (2020). Comparative Study on Growth and Yield of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Grown in Hydroponic and Aquaponic Systems. *Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants*, 12(2), 116-123.
- Wang, Q., & Liu, Y. (2022). Root length variation and nutrient uptake efficiency in different lettuce varieties under hydroponic cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 760812. doi:10.3389/fpls.2022.760812.
- Wang, W., Vinocur, B., & Altman, A. (2019). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218(1), 1-14.
- Weebly.com. (2015). Filtro de agua. Obtenido de [http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/ciencias/filtro\\_de\\_agua](http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/ciencias/filtro_de_agua)
- Wu, X., Liu, M., Ge, S., Hu, L., Li, J., & Chen, G. (2018). Effects of nitrogen sources on growth and nitrogen use efficiency of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 9, Article 1209.

- Zappernick N, Nedunuri KV, Islam KR, Khanal S, Worley T, Laki SL y Shah A. 2022. Technoeconomic analysis of a recirculating tilapia-lettuce aquaponics system. *Journal of Cleaner Production* 365: 132753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132>
- Castañares, J. (2020). *INTA*. Obtenido de ABC DE LA HIDROPONIA:  
[https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/8023/INTA\\_DireccionNacional\\_EEAAMBA\\_Casta%C3%B1ares\\_JL\\_ABC\\_de\\_la\\_hidroponia.pdf?sequence=](https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/8023/INTA_DireccionNacional_EEAAMBA_Casta%C3%B1ares_JL_ABC_de_la_hidroponia.pdf?sequence=)
- López, J. A. (2019). *Cultivo Acuapónico Guía Especializada*. Aula del Mar. Obtenido de <https://cifalmalaga.org/wp-content/uploads/2020/04/2019.11.07-LIBRO-ACUAPONIA.pdf>

## ANEXOS

### Anexo 1. Fotografías de actividades realizadas en la investigación

#### Fotografía 1 y 2

*Limpieza del área de estudio dedicada a los sistemas de investigación*



#### Fotografía 3

*Desinfección del área*



#### Fotografía 4

*Tanques utilizados para el sistema acuapónico*

#### Fotografía 5

*Instalación y conexión de los tanques a los módulos PVC*



**Fotografía 6 y 7**

*Las fotografías muestran las tilapias de 3 a 4 cm y las tapas de envases desechables dedicada a la biofiltración.*



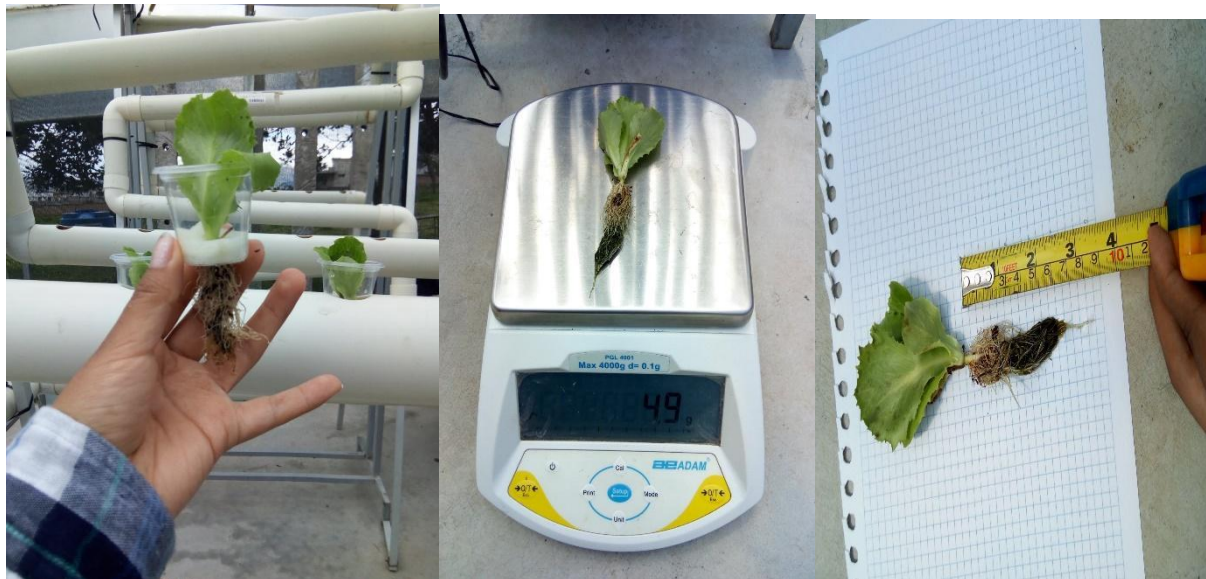
**Fotografía 8 y 9**

*Las fotografías muestran el sistema acuapónico y el sistema hidropónico instalado*



### Fotografías 9,10 y 10

*Las fotografías muestran el proceso de siembra de las dos variedades de lechuga en los sistemas respectivamente y la toma de datos iniciales.*



### Fotografía 11,12 y 13

*Sistemas de cultivo con las dos variedades de lechuga respectivamente*



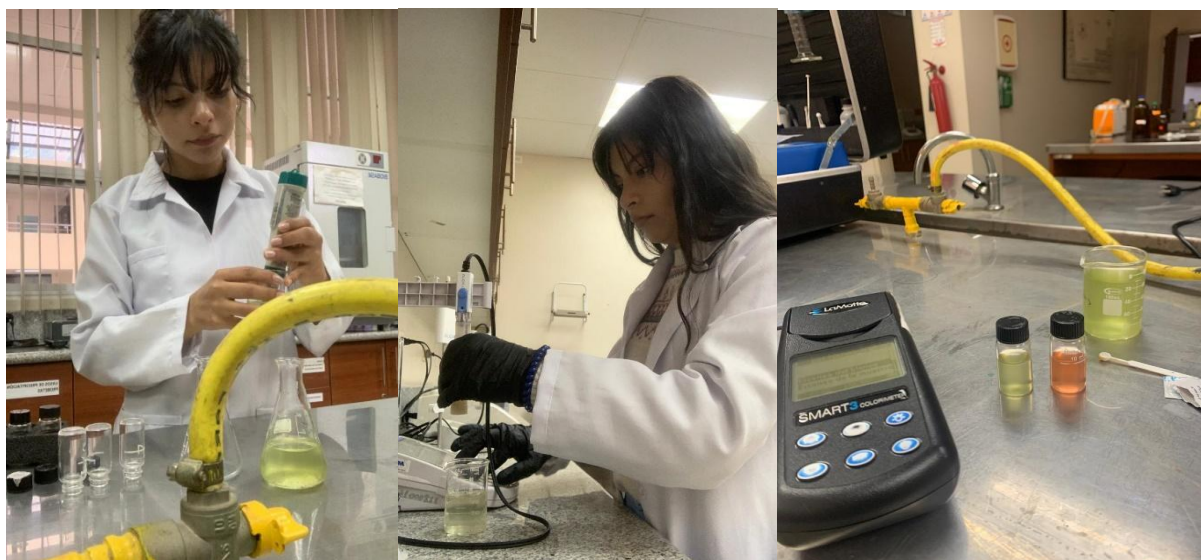
**Fotografía 14 y 15**

*Preparación y colocación de solución nutritiva en el sistema hidropónico*



**Fotografía 16,17 y 18**

*Toma de datos en laboratorio PUCESI de parámetros como, pH, CE, temperatura, nitritos y nitratos y NPK.*



**Fotografías 19,20,21 y 22**

**Proceso de desarrollo de la lechuga francesa en sistema acuapónico**



**Fotografías 23,24 y 25**

*Proceso de desarrollo de la lechuga criolla en sistema acuapónico*



**Fotografías 27,28 y 29**

*Proceso del desarrollo de la lechuga criolla con sistema hidropónico*



**Fotografías 30, 31 y 32**

Proceso del desarrollo de la lechuga francesa con sistema hidropónico.



**Fotografía 33 y 34**

*Cosecha de las dos variedades de lechuga de cada sistema respectivamente.*



**Fotografía 35,36 y 37**

*Toma de datos finales, peso de masa aérea, peso de masa radicular, largo de raíz, largo de hojas y nro de hojas.*



**Fotografía 38**

*Medición del nivel de clorofila en las dos variedades de lechuga respectivamente por sistema.*



**Anexo 2. Tabla de medición de parámetros de calidad de agua en cada sistema de cultivo.**

<b>Medición de Calidad del Agua en el Estanque de Tilapias</b>					
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>CE (µS/cm)</b>	<b>Temp (°C)</b>		
Miércoles 24 de abril	8.60	469	24.8		
Jueves 25 de abril	9.04	468	23.9		
Viernes 26 de abril	7.63	466	21.1		
Sábado 27 de abril	8.12	471	23.5		
Domingo 28 de abril	8.25	482	24.3		
Lunes 29 de abril	8.39	508	22.1		
Martes 30 de abril	8.21	531	21.3		
<b>Semana 1: Siembra de Lechugas en Sistema Acuapónico</b>					
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>CE (µS/cm)</b>	<b>Temp (°C)</b>	<b>Nitritos (mg/L)</b>	<b>Nitratos (mg/L)</b>
4 de mayo	8.79	176	20.4	1.82	0.26
6 de mayo	8.67	182	23.2		
7 de mayo	8.08	193.7	20.5	0.50	0.34
8 de mayo	8.65	196.2	21.1		
9 de mayo	8.62	198	23.1	0.23	0.27
10 de mayo	8.29	199.4	21.8		
11 de mayo	8.28	203.3	22.2	0.13	1.23
<b>Semana 2</b>					
<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>CE (µS/cm)</b>	<b>Temp (°C)</b>	<b>Nitritos (mg/L)</b>	<b>Nitratos (mg/L)</b>
13 de mayo	8.52	281	23.7		
14 de mayo	8.17	286	21.8	0.27	1.11
15 de mayo	8.41	268	22.5		
16 de mayo	8.32	265	23.2	0.24	0.97

17 de mayo	8.21	295	24.2		
18 de mayo	8.25	339	22.9	0.10	0.89
20 de mayo	8.30	365	23.1		

---

**Semana 3**

<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>CE (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<b>Temp (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Nitritos (mg/L)</b>	<b>Nitratos (mg/L)</b>
21 de mayo	7.86	360	21.1	0.12	1.29
22 de mayo	7.93	363	22.3		
23 de mayo	8.05	365	23.2	0.09	1.10
24 de mayo	8.07	362	22.3		
26 de mayo	7.83	304	21.9	0.04	1.87
27 de mayo	7.95	312	22.2		
28 de mayo	7.78	313	21.9	0.05	1.82

---

**Semana 4**

<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>CE (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<b>Temp (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	<b>Nitritos (mg/L)</b>	<b>Nitratos (mg/L)</b>
29 de mayo	7.52	302	21.5		
30 de mayo	8.11	296	24.0	0.12	1.78
31 de mayo	8.03	324	23.8		
1 de junio	7.93	306	21.2	0.07	1.74
3 de junio	8.02	331	22.3		
4 de junio	7.76	342	23.2	0.10	1.77
5 de junio	7.71	352	22.1	0.11	1.78

---

**Semana 1: Siembra de Lechugas en Sistema Hidropónico**

<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>CE (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<b>Temp (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>
7 de mayo	7.74	1895	22.5
8 de mayo	7.60	1938	20.0

9 de mayo	7.75	1623	21.9
10 de mayo	7.86	1516	23.2
11 de mayo	7.56	1525	22.2
13 de mayo	7.59	1378	23.6
14 de mayo	7.59	1371	22.3

---

**Semana 2**

Fecha	pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )
15 de mayo	7.84	1776	22.3
16 de mayo	7.83	1776	23.2
17 de mayo	8.03	995	22.1
18 de mayo	8.50	1667	21.5
20 de mayo	7.46	986	20.9
21 de mayo	7.07	1896	22.3
22 de mayo	7.11	1862	22.4

---

**Semana 3**

Fecha	pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )
23 de mayo	7.08	1751	23.3
24 de mayo	7.12	1735	22.3
26 de mayo	7.19	1693	22.2
27 de mayo	7.21	1687	23.3
28 de mayo	7.23	1667	22.4
29 de mayo	7.25	1571	23.7

30 de mayo	7.88	1270	22.5
------------	------	------	------

---

**Semana 4**

<b>Fecha</b>	<b>pH</b>	<b>CE (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	<b>Temp (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>
31 de mayo	8.04	1063	21.6
1 de junio	7.51	1059	22.9
2 de junio	7.48	1046	22.5
3 de junio	7.51	1033	22.9
4 de junio	7.61	1025	22.7