

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**EFFECTO DE TRES ALTURAS DE SUSPENSIÓN PARA LA AIREACIÓN EN TRES
DENSIDADES DE TRASPLANTE PARA LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE
LECHUGA (*Lactuca sativa L.*) EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DE COTA COTA**

MARIA GUADALUPE FLORES MALDONADO

La Paz - Bolivia

2023

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE AGRONOMÍA
CARRERA DE INGENIERA AGRONÓMICA

**EFFECTO DE TRES ALTURAS DE SUSPENSIÓN PARA LA AIREACIÓN EN TRES
DENSIDADES DE TRASPLANTE PARA LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA DE
LECHUGA (*Lactuca sativa L.*) EN EL CENTRO EXPERIMENTAL DE COTA COTA**

*Tesis de Grado presentada como requisito
Parcial para optar al Título de
Ingeniero Agrónomo*

MARIA GUADALUPE FLORES MALDONADO

Asesores:

Ing. M. Sc. Celia María Fernández Chávez

Ing. Bismar Efraín Pacheco Chirinos

Comité Revisor:

Ing. Rosmery Aruquipa Condori

Ing. Willams Alex Murillo Oporto

Ing. M. Sc. Juan Javier Quino Luna

APROBADO

Presidente Tribunal Examinador



LA PAZ - BOLIVIA

DEDICATORIA:

La presente tesis está dedicada:

A Dios padre que me brinda salud, sabiduría, fuerza y guía mi camino en cada paso que doy cuidándome y ayudándome en los momentos difíciles.

A mi madre Irma Maldonado L. a quien amo con todo mi corazón, pues ella es la persona más importante en mi vida, le doy gracias por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

A mi padre Rogelio Flores F. (+) a quien amo y tengo presente en mi mente y corazón todos los días, doy gracias por el cariño y apoyo que me brindo hasta que Dios Padre le otorgo vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios padre que me brinda salud, sabiduría, fuerza y guía mi camino en cada paso que doy cuidándome y ayudándome en los momentos más difíciles.

A mi madre Irma por brindarme su amor y siempre me impulso al éxito, brindándome y transmitiéndome los principios y valores más importantes en mi vida.

A mi padre Rogelio (+) que me dio cariño y alentó en todo momento hasta que Dios Padre le otorgo vida, para ser una persona de bien.

A mis sobrinos Dayana, Adriana, Danner, Valentina y Neylin por brindarme tantos momentos de alegrías en mis momentos de estrés.

A mis hermanos Carla, Paula y Marco por haberme apoyado pese a las adversidades e inconvenientes que pudieron presentarse.

A Mis Padrinos Julio y Marcenia por el apoyo moral y siempre estar presentes cuando los necesito.

A mi hermano político Fredy Marca por sus palabras motivándome a salir adelante.

A la Universidad Mayor San Andrés, Facultad de Agronomía – Ingeniería Agronómica, por la oportunidad de mi formación profesional impartida por el plantel docente y compartir sus conocimientos y experiencias.

Al Centro Experimental Cota Cota de la Facultad de Agronomía – UMSA, por el apoyo brindado tanto en infraestructura, materiales e instrumentos para que se haga realidad esta investigación exitosa.

A mi asesor Ing. Bismar Efraín Pacheco Ch. por toda la colaboración, enseñanza de sus conocimientos, la confianza y cariño brindado para la elaboración del presente trabajo.

A mi Asesora Ing. M. Sc. Celia María Fernández Ch. por el asesoramiento, colaboración y consejos con su experiencia profesional para que este trabajo se realice de la mejor forma posible.

Al Ing. Willams Alex Murillo Oporto, por brindarme su amistad, orientación e igualmente por su importante aporte y sugerencias en todo el desenvolvimiento en el presente estudio de investigación.

A mis tribunales revisores: Ing. M. Sc. Juan Javier Quino, Ing. Willams Alex Murillo e Ing. Rosmery Aruquipa, por la paciencia y el tiempo dedicado para la revisión de la tesis de grado, por las correcciones y sugerencias para que este trabajo se concluya satisfactoriamente.

A todos mis amigos que me acompañaron a lo largo de la carrera y de la tesis, pero en especial a Grissel Guachalla y Kevin Sánchez por apoyarme.

CONTENIDO DE LA INVESTIGACIÓN

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	VII
RESUMEN.....	IX
SUMMARY.....	XI

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 El cultivo de la Lechuga.....	3
3.1.1 Origen.....	3
3.1.2 Taxonomía.....	4
3.1.3 Morfología.....	4
3.1.4 Características agroecológicas de la lechuga.....	5
3.1.5 Siembra.....	7

3.1.6	Trasplante	7
3.1.7	Rendimiento	8
3.1.8	Valor nutritivo de la Lechuga	9
3.1.9	Variedades de lechuga	10
3.1.10	Plagas y enfermedades	11
3.2	Cultivo hidropónico.....	12
3.2.1	Origen de la hidroponía	12
3.2.2	La hidroponía en Bolivia	13
3.2.3	Sistemas de cultivo hidropónico	13
3.2.4	Ventajas y desventajas del cultivo hidropónico	14
3.2.5	Sistema de raíz flotante	15
3.3	La aireación en los sistemas raíz flotante.....	18
3.3.1	El oxígeno; requerimiento esencial	19
3.3.2	Consecuencias de la falta de oxígeno	20
3.3.3	Importancia de la temperatura	20
3.3.4	Métodos de aireación en hidroponía.....	22
3.3.5	Solución Nutritiva.....	23
3.3.6	PH de la solución nutritiva	24
3.3.7	Conductividad eléctrica.....	26
3.3.8	Cambio y duración de la solución nutritiva.....	27

3.3.9 Fertilizantes inorgánicos	28
4 LOCALIZACIÓN.....	29
4.1 Ubicación geográfica.....	29
4.1.1 Suelo	30
4.1.2 Vegetación y pecuaria	30
4.2 Características de la carpa solar	30
5 MATERIALES Y MÉTODOS	31
5.1 Materiales	31
5.1.1 Material vegetal	31
5.1.2 Material fertilizante sintético.....	31
5.1.3 Material para almácigo	32
5.1.4 Materiales para el acondicionamiento del sistema hidropónico RF ...	32
5.1.5 Material de laboratorio	32
5.1.6 Material de escritorio	32
5.2 Metodología	33
5.2.1 Trabajo de campo.....	33
5.2.2 Medición de la temperatura	36
5.2.3 Diseño Experimental	37
6 RESULTADOS Y DISCUSIONES	43
6.1 Comportamiento de la temperatura en la carpa solar	43
6.2 Comportamiento de la temperatura de la solución nutritiva	44

6.3	Variables agronómicas.....	46
6.3.1	Altura de planta (cm)	46
6.3.2	Número de hojas por planta.....	49
6.3.3	Peso raíz (g).....	51
6.3.4	Volumen raíz (cc)	55
6.4	Variables de rendimiento.....	58
6.4.1	Peso fresco (g)	58
6.5	Variables económicas	61
6.5.1	Rendimiento ajustado	62
6.5.2	Número de campañas por año	63
6.5.3	Beneficio bruto.....	63
6.5.4	Costos variables	64
6.5.5	Costos fijos.....	65
6.5.6	Costos totales.....	65
6.5.7	Beneficio neto.....	66
6.5.8	Relación Beneficio / Costo.....	67
7	CONCLUSIONES.....	68
8	RECOMENDACIONES.....	70
9	BIBLIOGRAFÍA.....	71
10	ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Clasificación Taxonómica	4
Tabla 2: Composición nutricional de la lechuga	9
Tabla 3: Relación entre temperatura de agua y oxígeno.....	21
Tabla 4: Valores recomendados de CE y pH de soluciones nutritivas.....	27
Tabla 5: Requerimiento de nutrientes para la lechuga en ppm o mg/l.....	35
Tabla 6: Formulación de nutrientes.....	36
Tabla 7: Factores de estudio.....	38
Tabla 8: Descripción de los tratamientos.....	39
Tabla 9: Análisis de varianza para la variable altura de planta.....	46
Tabla 10: Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de suspensión.....	47
Tabla 11: Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades.....	48
Tabla 12: Interacción entre los factores para altura de planta.....	48
Tabla 13: Análisis de varianza para la Número de hojas.....	49
Tabla 14: Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de suspensión.....	50
Tabla 15: Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades.....	51
Tabla 16: Interacción entre los factores para número de hojas.....	52
Tabla 17: Análisis de varianza para la Peso de raíz.....	53
Tabla 18: Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de suspensión.....	54
Tabla 19: Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades.....	55
Tabla 20: Análisis de varianza para la Volumen de raíz.....	56
Tabla 21: Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de suspensión.....	56

Tabla 22: Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades.....	57
Tabla 23: Interacción entre los factores para volumen de raíz.....	58
Tabla 24: Análisis de varianza para la Peso fresco.....	59
Tabla 25. Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de suspensión.....	60
Tabla 26: Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades.....	60
Tabla 27: Interacción entre los factores para peso fresco.....	62
Tabla 28: Rendimiento ajustado.....	63
Tabla 29. Beneficio bruto.....	64
Tabla 30: Costos Variables.....	65
Tabla 31: Costos fijos (Bs/Año).....	65
Tabla 32: Costos Totales.....	66
Tabla 33: Beneficio bruto.....	67
Tabla 34: Relación Beneficio / Costo.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de raíz flotante.....	16
Figura 2. Ubicación geográfica del trabajo de investigación.....	29
Figura 3. Dimensiones del sistema hidropónico.....	39
Figura 4. Croquis Experimental.....	40
Figura 5. Temperaturas máximas y mínimas.....	43

Figura 6. Temperatura de la solución nutritiva.....	45
--	-----------

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Morfología de la planta de lechuga variedad White Boston.....	1
Anexo 2: Semilla de lechuga variedad White Boston.....	2
Anexo 3: Sistema de producción RF.....	2
Anexo 4: Acondicionamiento de la piscina.....	3
Anexo 5: Siembra en esponja.....	3
Anexo 6: Traslado a la piscina de crecimiento.....	4
Anexo 7: Trasplante al Sistema Raíz Flotante.....	5
Anexo 8: Cosecha.....	6
Anexo 9: Toma de datos.....	7
Anexo 10: Producción es sistema RF.....	8
Anexo 11: Solución hidropónica preparada.....	9
Anexo 12: Toma de dato temperatura de la solución.....	10
Anexo 13: Toma de datos temperatura de la carpa.....	10
Anexo 14: Datos de la temperatura.....	11
Anexo 15: Análisis químico del agua.....	12

RESUMEN

El crecimiento demográfico trae como consecuencia demanda de hortalizas y verduras de calidad. Dentro de las hortalizas demandadas se encuentra la lechuga

Esta demanda puede ser solventada produciendo el cultivo mencionado en forma intensiva así podemos hacer lo posible para obtener productos finales de alta calidad.

El objetivo de este trabajo, fue el de evaluar tres alturas de suspensión para la aireación en tres densidades de trasplante de lechuga (White Boston), cultivadas con la técnica hidropónica raíz flotante (RF), para determinar cuál altura y densidad presentaría el mayor rendimiento en peso fresco y realizar un análisis económico preliminar de la producción de lechuga.

Para alcanzar el objetivo planteado, se utilizó un diseño experimental completamente al azar (DCA), con un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Los factores estudiados fueron alturas de suspensión (0 cm, 1 cm, 3 cm y 5 cm) y densidades (15 cm, 20 cm y 25 cm). Realizando la interacción de los dos factores se obtuvo 12 tratamientos y se utilizó la solución nutritiva formulada a partir de los requerimientos nutricionales de la lechuga.

Para llegar a los objetivos se planteó las siguientes variables de respuesta: Peso Fresco, Altura de Planta, Número de Hojas, Peso de Raíz, Volumen Radicular, Rendimiento y Análisis Económico Parcial.

El experimento se localizó en el Centro Experimental de Cota Cota de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Mayor de San Andrés (La Paz – Bolivia), ocupando un área de 9 m².

Los resultados indican que el tratamiento dos (T5) con altura de suspensión a 1 cm por densidad de trasplante a 20 cm (A1*B2) tiene un rendimiento de 157.77 gr/planta (2.840 kg/m²), seguido del tratamiento uno (T4) con altura de suspensión 1 cm por densidad de trasplante a 15 cm (A1*B1) con 111.6 gr/planta (2.444 kg/m²) y el tratamiento tres (T3)

con altura de suspensión de 1 cm por densidad de trasplante a 25 cm (A1*B3) con 102.6 gr/planta (1.436 kg/m²), los demás tratamientos obtuvieron rendimientos muy bajos.

La lechuga hidropónica se cosecho a los 70 días de los cuales estuvo en los almácigos durante 10 días, en los contenedores de crecimiento 20 días y en el sistema de raíz flotante durante 40 días. Mediante este ciclo de producción se puede obtener 9 ciclos productivos por año de lechuga hidropónica.

Para la relación beneficio/costo el tratamiento dos (T5) con altura de suspensión a 1 cm por densidad de trasplante de 20 cm (A1*B2) fue la que presentó la mayor ganancia, con una relación beneficio costo de 1.55, seguida del (T4) con altura de suspensión de 1 cm por densidad de trasplante de 15 cm (A1*B1) con 1.30 en comparación a los demás tratamientos que su relación beneficio/costo fue menos a 1, lo que nos indica que no son económicamente rentables.

SUMMARY

Population growth brings as a consequence demand for quality vegetables and greens. Among the demanded vegetables is lettuce

This demand can be met by producing the aforementioned crop intensively so that we can do everything possible to obtain high-quality final products.

The objective of this work was to evaluate three suspension heights for aeration in three lettuce transplant densities (White Boston), cultivated with the floating root (RF) hydroponic technique, to determine which height and density would present the highest yield. in fresh weight and carry out a preliminary economic analysis of lettuce production.

To achieve the proposed objective, a completely randomized experimental design (DCA) was used, with an arrangement of divided plots with three repetitions. The factors studied were suspension heights (0 cm, 1 cm, 3 cm and 5 cm) and densities (15 cm, 20 cm and 25 cm). Performing the interaction of the two factors, 12 treatments were obtained and the nutrient solution formulated from the nutritional requirements of the lettuce was used.

To reach the objectives, the following response variables were proposed: Fresh Weight, Plant Height, Number of Leaves, Root Weight, Root Volume, Yield and Partial Economic Analysis.

The experiment was located in the Cota Cota Experimental Center of the Faculty of Agronomy of the Universidad de Mayor de San Andrés (La Paz - Bolivia), occupying an area of 9 m².

The results indicate that treatment two (T5) with suspension height at 1 cm per transplant density at 20 cm (A1*B2) has a yield of 157.77 gr/plant (2,840 kg/m²), followed by treatment one (T4) with a suspension height of 1 cm per transplant density at 15 cm (A1*B1) with 111.6 gr/plant (2.444 kg/m²) and treatment three (T3) with a suspension height of 1 cm per transplant density at 25 cm (A1*B3) with 102.6 gr/plant (1,436 kg/m²), the other treatments obtained very low yields.

The hydroponic lettuce was harvested after 70 days, of which it was in the seedbeds for 10 days, in the growth containers for 20 days and in the floating root system for 40 days. Through this production cycle, 9 production cycles per year of hydroponic lettuce can be obtained.

For the benefit/cost ratio, treatment two (T5) with a suspension height of 1 cm per transplant density of 20 cm (A1*B2) was the one that presented the greatest gain, with a benefit-cost ratio of 1.55, followed by (T4) with a suspension height of 1 cm per transplant density of 15 cm (A1*B1) with 1.30 compared to the other treatments that their benefit/cost ratio was less than 1, which indicates that they are not economically profitable.

1 INTRODUCCIÓN

La lechuga (*Lactuca Sativa L.*), a nivel mundial es la cuarta especie de mayor importancia, debido al incremento de producción por superficie y consumo. El principal país productor de lechuga es China ocupando el 77% de producción, seguido de EE. UU, India, España e Italia, según la FAO (2014).

Los principales cultivos establecidos en hidroponía son: tomate, lechuga, pimiento y pepino. A nivel mundial se estima que los cultivos hidropónicos generan ingresos por 821 millones de dólares con un crecimiento anual de 4.5% (IBISWORLD, 2016). En Sudamérica, la lechuga representa el 49% de la superficie hidropónica (INTAGRI, 2017).

Según Solorzano y Bastidas (2014), esta hortaliza se la consume cruda como típica ensalada. Es muy codiciada en la dieta moderna por su bajo contenido calórico, alto contenido de agua, minerales, vitaminas y fibra. La lechuga se cultiva en casi todo el mundo bajo diferentes sistemas, ya sea al aire libre o en invernaderos siendo un cultivo cosmopolita (Saavedra, 2017).

La región del altiplano boliviano presenta condiciones adversas para la agricultura, principalmente el clima (bajas temperaturas) y la disponibilidad de agua, en este sentido las hortalizas son escasas en esta región, ocasionando deficiencias nutricionales en vitaminas y minerales que son aportados por las hortalizas y entre ellas la lechuga.

La producción de hortalizas puede hacerse en forma intensiva en espacios reducidos tanto en áreas rurales como urbanas, utilizando tecnologías de producción que combinen sustratos inertes y soluciones nutritivas. Por tanto, la hidroponía es un método desarrollado que se basa en sistemas balanceados de control en donde las plantas reciben una nutrición adecuada para su crecimiento y desarrollo, basándose en que las plantas mantienen sus raíces continua o intermitentemente inmersas en una solución acuosa que contiene los elementos minerales esenciales para su crecimiento.

Hoy en día la técnica de producción del cultivo de plantas, sin suelo es el método más intensivo de producción hortícola; generalmente es de alta tecnología y de fuerte

capital. Con esta técnica se obtiene hortalizas de excelente calidad y sanidad, y se asegura un uso más eficiente del agua y fertilizantes. Los rendimientos por unidad de área cultivada son altos, por la mayor diversidad y elevada productividad por planta y en menor tiempo.

El sistema raíz flotante es la técnica más utilizada en hidroponía, consta de recipientes o contenedores, donde se incluye la solución nutritiva y sobre ella flotando una lámina de plastofórmico como soporte para la planta.

En sistemas hidropónicos del tipo raíz flotante sufren de la desventaja de la falta de aireación de raíces, dicho problema puede solucionarse generando burbujas con inyección de aire o de manera manual agitando la masa de agua con las manos dentro de la cama del cultivo. La presencia de raíces oscuras se debe a la falta de oxígeno impidiendo que la planta capte el agua y los nutrientes necesarios para su desarrollo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Determinar el efecto de tres alturas de suspensión para la aireación en tres densidades de trasplante para la producción hidropónica de lechuga (*Lactuca sativa L.*) en el Centro Experimental de Cota Cota.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer la altura adecuada para la aireación de raíz en el desarrollo del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*).
- Identificar la densidad adecuada para el desarrollo del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*).
- Realizar el análisis económico de la producción hidropónica del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*).

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 El cultivo de la Lechuga

3.1.1 Origen

La lechuga es una hortaliza que se conoce desde hace mucho tiempo. Es originaria del continente asiático. Fue traída a América con la conquista española, en la actualidad se encuentra con un gran número de cultivos de diferentes cultivares adaptadas a diferentes climas (Enciclopedia Bolivia Agropecuaria, 2010).

La lechuga como cultivo se originó probablemente de la cuenca mediterránea, una prueba evidente es la existencia de una forma primitiva de lechuga casi silvestre conocida como *Lactuca serriola* L, comúnmente llamada lechuga espinosa. Los primeros informes escritos referentes al cultivo de la lechuga se atribuyen a Herodoto, en el que menciona que la lechuga aparecía en las mesas reales de Persia en el año 550 (A.C.), la lechuga fue popular y cultivada en la antigua Roma, según (Davis et al,2002)

Desde el Mediterráneo su cultivo se expandió rápidamente por Europa y fue traída por los primeros conquistadores a América, donde se ha convertido en una de las hortalizas más populares y de mayor importancia económica. En la actualidad se debe considerar una especie de distribución universal (Arias, 2009).

Llego a América en 1494, solo dos años después del primer viaje de Colon. Se considera que la lechuga conocida en esa época era la de tipo cos o bien la de hoja (variedad crispa), la lechuga de cabeza se difundió probablemente en el siglo XVI; en 1543, se publicó el Krauterbuch de Leonard Fuchs que incluye un dibujo de la lechuga en flor, con el Título de *Lactuca capitata* (Mallar 1978, citado por Intipamapa, 2014).

3.1.2 Taxonomía

La clasificación sistemática fue realizada por Lizarro (2009):

Tabla 1. Clasificación taxonómica

Clase:	Magnoliopsida (dicotiledónea)
Subclase:	Asteridae
Orden:	Asterales
Familia:	Asteraceae
Género:	Lactuca
Especie:	Lactuca sativa L.

3.1.3 Morfología

La planta de lechuga se caracteriza por que la raíz no sobrepasa los 25 cm de profundidad, es pivotante y con ramificaciones, las hojas están dispuestas en roset, desplegadas al principio y se acogollan más tarde formando la cabeza, el borde de los limbos puede ser liso, ondulado o aserrado, su tallo es cilíndrico, la inflorescencia presenta capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos (Chávez y Medina, 2013).

Para Gilsanz (2007), la lechuga tiene las siguientes características: Es una planta anual. La Raíz no llega a sobrepasar los 25 cm de profundidad, es pivotante, corta y con ramificaciones. Las hojas están colocadas en roseta, desplegadas al principio; en unos casos siguen así durante todo el desarrollo (variedades romanas), y en otros se acogollan más tarde. Cuando la lechuga está madura, es cuando emite el tallo floral. Las flores son autógamas. Las semillas en algunas variedades tienen un periodo de latencia después de su recolección, que es inducido por temperaturas altas. Muchas variedades germinan mal en los primeros dos meses después de su recolección.

Cronquist (1989), citado por Quispe (2015) afirma que, las principales características morfológicas de la lechuga son:

- **Raíz:** Es pivotante, corta y con ramificaciones, no llega sobre pasar los 30 cm de profundidad del suelo.

- **Hoja:** Están colocadas en forma de rosetas, desplegadas al principio, en algunos casos siguen así durante todo su desarrollo (variedades romanas) y en otros se acogollan más tarde. El borde de los limbos puede ser lisos, ondulado y aserrado.

- **Tallo:** El tallo se forma una vez pasada la madurez comercial, puede llegar a medir de 1 a 1,20 m de altura en algunas variedades, es cilíndrico ramificado.

- **Inflorescencia:** Son capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos y son autógamas.

- **Semillas:** Son pequeños de color marrón oscuro casi negro, marrón más claro, gris amarillento o blanco grisáceo y mide unos 2 mm de longitud.

3.1.4 Características agroecológicas de la lechuga.

3.1.4.1 Temperatura

La temperatura ideal durante el día debe estar entre 25 a 28 °C, principalmente durante la noche de invierno es necesario evitar que la temperatura ascienda a menos 0 °C (Estrada 1990, citado por Quispe 2015).

La temperatura media óptima para el desarrollo normal de la planta de lechuga es 15 a 18°C con máximas a 21°C y mínimas de 7°C. Las temperaturas extremas inducen la emisión prematura de los tallos florales y afectan la calidad del producto de consumo, debido a la acumulación de látex en las venas. Según (Chávez y Medina 2013).

Según Mallar (1978) citado por Aruquipa (2008), indica que la lechuga deberá tener temperaturas necesarias para obtener un buen crecimiento y calidad son los siguientes:

- Promedio mensual óptimo 15 a 20 °C.
- Promedio mensual máximo 21 a 24 °C.
- Promedio mensual mínimo 7 °C.

El mismo autor indica que el promedio mensual óptimo 15 a 20 °C favorecen la formación de cogollos, las temperaturas altas dan lugar al desarrollo prematuro del tallo, floración y un sabor amargo en las hojas con falta de firmeza en las cabezas. Las temperaturas altas también provocan la aparición de quemaduras de los extremos de las hojas.

3.1.4.2 Humedad

La humedad relativa óptima para el cultivo de lechuga es de 60 a 80%. La humedad ambiental excesiva favorece el desarrollo de las enfermedades según (Chávez y Medina, 2013).

El sistema radicular de la lechuga es muy reducido en comparación con la parte aérea, por lo que es muy sensible a la falta de humedad y soporta mal un periodo de sequía, aunque éste sea muy breve. La humedad relativa conveniente para la lechuga es del 60 al 80%, aunque en determinados momentos agradece menos del 60%. Los problemas que presenta este cultivo en invernadero es que se incrementa la humedad ambiental, por lo que se recomienda su cultivo al aire libre, cuando las condiciones climatológicas lo permitan (Infoagro, 2014)

Las variaciones de humedad relativa (HR) diaria en las carpas solares, son mayores al finalizar el día, mientras que alrededor del mediodía tienen la tendencia a bajar, dependiendo mucho del medio exterior (García, 1996).

3.1.4.3 Suelo

Todos los suelos son buenos para el cultivo de lechuga ya que este cultivo se adapta a distintos tipos de suelo, sin embargo, se desarrolla muy bien en suelos con alto contenido de materia orgánica. (Osorio y Lobo, 2009).

Teniendo en cuenta que el sistema radicular de la lechuga no es muy extenso los suelos que retienen la humedad y que a la vez presentan buen drenaje son los mejores, las mejores texturas son el franco – arcillosas y franco – arenosas.

El pH más apropiado es de 5.8 a 6.5 en suelos orgánicos y minerales. (Osorio y Lobo, 2009).

3.1.4.4 Fotoperiodo

Para Mallar (1978) citado por Intipampa (2014) indica que, el cultivo de la lechuga se puede efectuar durante todo el año, por lo tanto, es una planta indiferente respecto a las horas luz existente en las diferentes estaciones del año.

Para Lira (2004), señala que la intensidad luminosa y la duración de la luminosidad pueden llegar a ser factores limitantes, creciendo lento y aumentando el periodo de acogollado, además en régimen de baja iluminación, los nitratos se acumulan en la hoja, pudiendo entrañar trastornos fisiológicos.

3.1.5 Siembra

Osorio y Lobo (2009) define que, la lechuga es una hortaliza típica de trasplante, aunque también puede sembrarse en forma directa. Tradicionalmente la siembra se hace en semilleros, en épocas frías en las que son protegidos. Como el tamaño de la semilla es muy pequeño suele cubrirse con una capa delgada de suelo.

Para el mismo autor, la semilla de lechuga germina mejor en suelos con temperaturas entre 20 y 26 °C con óptimas de 24 °C. en estas condiciones las plántulas emergen a los dos o tres días una temperatura del suelo de 30 °C.

3.1.6 Trasplante

El trasplante se realiza cuando las plántulas han alcanzado una altura de 8 a 12 cm. También se puede trasplantar cuando las plantas hayan desarrollado de 4 a 6 hojas

verdaderas. El trasplante se puede realizar en hileras separadas de 40 a 50 cm, entre plantas 25 cm.

Donde la luz penetre mejor, los ataques de botrytis pueden evitarse. También el crecimiento mejora pasando el invierno, las distancias de plantación pueden reducirse a 25 x 20 cm puesto que la luz es más abundante (Gostínchar 1967, citado por Valdez 2008).

El trasplante es el traslado de las plántulas germinadas de una almaciguera al lugar definitivo de crecimiento, ya sea en un ambiente atemperado o en un huerto a la intemperie, el proceso de trasplante es muy delicado ya que de él depende el crecimiento de las plantas hasta la cosecha (Hartmann, 1990).

3.1.7 Rendimiento

Para Flores (2009), el rendimiento a campo abierto, en la producción del cultivo más importante dentro de las hortalizas es de 4 a 6 kg/m².

Al respecto Arias (2009), menciona que el rendimiento de la lechuga se halla en un orden de 2 a 3 kg/m².

Marulanda (2003), menciona que el rendimiento de la lechuga en suelo es de 1,6 kg/m², y en hidroponía de 3,5 kg/m².

3.1.7.1 Rentabilidad del cultivo

En cuanto a la rentabilidad, la lechuga en el mercado presenta una gran demanda, además es una de las hortalizas que ofrece amplias posibilidades para la exportación debido a que la producción nacional de lechugas ha ido incrementándose (Alpizar, 2010).

3.1.7.2 Cultivo hidropónico de la lechuga

La lechuga es considerada la hortaliza de hoja por excelencia, dada su alta calidad culinaria como ensalada fresca, se cultiva en todo el mundo bajo diferentes sistemas de cultivo, al aire libre, bajo invernadero, en suelo y también en Hidroponía. (FAO, 2011).

3.1.8 Valor nutritivo de la Lechuga

Según Michelena (2003), la lechuga es un alimento que aporta muy pocas calorías por su alto contenido en agua, su escasa cantidad de hidratos de carbono y menor aún de proteínas y grasas. En cuanto a su contenido en vitaminas, destaca la presencia de folatos, pro vitamina A o beta-caroteno, y vitaminas C y E, la vitamina A, además de tener propiedades antioxidantes.

También resulta una fuente importante de vitamina K, con lo que protege ante la osteoporosis. Otras vitaminas que destacan en la lechuga son la A, E y ácido fólico. Está compuesta en un 94% de agua y aporta mucho potasio y fósforo (Colinagro, 2008).

De conformidad con Moreno (2014) la lechuga es baja en calorías, sus hojas exteriores contienen el doble de vitamina C que las interiores. Según las variedades poseen una buena fuente de ácido fólico (anticancerígeno) y vitamina A. Su composición nutricional se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición nutricional de la Lechuga

Componentes	Contenido/100g de sustancia
Glúcidos	1.20 – 2.10 g
Lípidos	0.10 – 0.20 g
Prótidos	0.80 – 1.60 g
Ácido fólico	5.00 – 24.00 mg
Calcio	13.00 – 36.00 g
Fosforo	20.00 – 45.00 mg
Hierro	1.10 – 1.50 g
Potasio	100 – 400 mg
Riboflavina	0.03 – 0.10 mg
Sodio	5.00 – 10.00 mg
Tiamina	0.07 – 0.10 mg
Vitamina A	300 – 2600 1U

Fuente: Moreno, 2014

3.1.9 Variedades de lechuga

Existe una gran cantidad de cultivares o variedades de lechugas, por lo general se convierte en una hortaliza ideal y apreciada en cultivos del huerto familiar. Además de tener una variada gama de sabores, colores texturas a la hora de preparar ensaladas, sus ciclos vegetativos son diferentes, sembrando diversas clases en una misma fecha, se obtiene cosechas escalonadas en el tiempo, por tanto, evita el trabajo sembrar cada 15 días si se quiere escalonar su consumo (Enciclopedia Bolivia Agropecuaria, 2010).

Al respecto Lexus (2010), menciona que se estima más 250 cultivares o variedades de lechuga, lo cual significa que es conveniente seleccionar muy bien para su producción, consumo y comercialización.

Casseres (1984), citado por Quispe (2015) indica que, por la forma que crece la lechuga determina su clasificación en 3 tipos principales, dentro de los cuales se puede colocar todos los cultivares comerciales: de cabeza, de hoja suelta y rama.

La variedad que se evaluó en la siguiente investigación fue la White Boston y tiene las siguientes características.

3.1.9.1 White Boston

Es una variedad muy popular, conocida también como cabeza de mantequilla debido a que la apariencia de su color es poco pálida y cuando existe suficiente luz solar se observan brillos que semejan manchas irregulares parecidos al color normal de la mantequilla (Bautista, 2000).

Son relativamente pequeños, cabeza floja con hojas anchas, aceitosas, apañuscadas, ubicándose cada hoja tersa y acomodadamente una sobre otra. Son de textura muy suave. Las nervaduras son menos prominentes que en los cultivares con cabeza. La cabeza es menos firme y algo más chica que los cultivares crespas o capuchinas (Halsouet y Miñanbres, 2005).

Las hojas son de color verde claro, de borde liso, ligeramente ondulado. De aspecto muy suave, no ha podido ser superada en su terneza. Forma una cabeza de

tamaño mediano (20 cm de diámetro). De consistencia firme, de semilla rosada (Granval y Gaviola, s.f.).

3.1.10 Plagas y enfermedades

La FAO (2005) menciona que, la mejor forma de controlar las plagas y enfermedades es preparando un suelo con buena proporción de nutrientes, humedad y aire para que las plantas se desarrollen fuertes y sanas de modo que no hay susceptibilidad a ataques. Otra es mantener mediante deshierbes continuos y controlados, también evitar lugares sombreados y húmedos que proporcionen el crecimiento de los hongos. El cual disminuye la productividad si no se controla a debido tiempo.

Según Sánchez (2005) menciona que, entre los principales problemas de plagas y enfermedades de la lechuga se pueden clasificar en los siguientes grupos:

Enfermedades del semillero y del suelo

- Pythium
- Fusarium
- Sclerotinia
- Rhizoctonia

Enfermedades criptogámicas de la parte aérea

- Mildiu
- Botrytis
- Oidio
- Antracnosis

Enfermedades víricas

- Mosaico
- Enfermedad de las nerviaciones gruesas

Insectos perjudiciales

- Pulgones
- Rosquillas

- Trips
- Minadores

3.2 Cultivo hidropónico

Cabezas (2017) Sustenta que hidroponía es una técnica de cultivar plantas en agua. los nutrientes que necesitan la planta para crecer, florecer y fructificar se añaden directamente en agua en forma de sales minerales o fertilizantes, las cuales son formuladas y balanceadas en base al análisis químico del agua y de acuerdo al requerimiento y etapa de crecimiento de cada cultivo.

Resh, H. (2001) menciona que, la hidroponía es un medio excelente para crecer verdura fresca, no solamente en los países que tengan poca tierra cultivable, sino también en aquellos que, teniendo pequeña superficie, tengan, no obstante, una gran población, esto también ser particularmente útil en algunos pequeños países cuya principal industria es el turismo.

3.2.1 Origen de la hidroponía

Cuando se habla de hidroponía se tiende a asociarlo con el Japón como el poseedor de alta tecnología, pero esto no es necesariamente cierto. La hidroponía no es una técnica moderna, sino una técnica ancestral; en la antigüedad hubo cultura y civilizaciones que la usaron como medio de subsistencia. Por ejemplo, es poco conocido que los Aztecas construyeron una ciudad en el lago de Texcoco (la ciudad de México se encuentra ubicado sobre un lago que se está hundiendo), y cultivaban su maíz en barcos o barcazas con un entramado de pajas, y de ahí se abastecían. Hay muchos ejemplos como éste; los jardines colgantes de Babilonia eran hidropónicos porque se alimentaban de agua que fluía por unos canales. Esta técnica existía en la antigua China, India, Egipto, también la cultura Maya la utilizaba, y hoy tenemos como referencia mencionada a nuestro país Bolivia a una tribu asentado en el Lago Titicaca; es igualmente utilizada comercialmente, desarrollándose a niveles muy elevados, en países con limitaciones serias de suelo y agua (Sánchez 1988, citado por Callizaya 2016).

3.2.2 La hidroponía en Bolivia

En 2005, Intervida Bolivia, en convenio con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), implemento el proyecto “Microhuertas familiares para la seguridad alimentaria”, el proyecto consistía en cultivar hortalizas en huertos orgánicos e hidropónicos, en la ciudad de El Alto (Estrada, 2009).

Estudios realizados en Cochabamba – Bolivia por Urey (2007), donde se realizó la producción de lechuga en el sistema hidropónico de flujo laminar de nutrientes, determinaron que económicamente la variedad Crespa muestra una relación Costo/Beneficio de 22,99% y una utilidad neta de 294 Bs/50 m² , seguido por la variedad Romana con una relación C/B de 24,91% y una utilidad neta de 244,92 Bs/50 m² ; y por último la variedad Blanca con una relación C/B de 33,96% y una utilidad neta de 84,92 Bs/50 m² , por las condiciones de poder producir de 9 – 10 veces año, y ser un producto de alta calidad sanitaria.

Para Murillo (2010), se puede mejorar la capacidad productiva de los invernaderos al transformarlos en cultivos hidropónicos bajo sistema NFT, pues se demostró que bajo este sistema hidropónico recirculante se puede producir durante todo el año de forma sistemática, en la localidad de Chicani de la ciudad de La Paz – Bolivia.

3.2.3 Sistemas de cultivo hidropónico

Un sistema hidropónico es un sistema aislado del suelo utilizado para cultivar diversas hortalizas, cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos nutricionales que necesita dicha planta a través del agua o de una solución nutritiva, (Arrollo citado por Gutiérrez et al., 2009).

Este tipo de cultivo tiene como objetivo reducir los factores que afectan al crecimiento vegetal en relación a las características del suelo (Gutiérrez et al., 2009).

Los sistemas hidropónicos se clasifican en abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos los excesos de agua salen del sistema como desechos a través de drenajes,

mientras que en los sistemas cerrados la solución nutritiva recircula con una mínima pérdida (Hidroponía, s.f.).

3.2.4 Ventajas y desventajas del cultivo hidropónico

3.2.4.1 Ventajas

Sánchez (1988) citado por Callisaya, (2016) describe: “que la hidroponía presenta una serie de ventajas tanto en lo técnico como en lo económico con respecto a otros sistemas de producción, descritos a continuación por el mismo autor”.

- **Promueve el balance de aire, agua y nutrientes.** Al utilizar de cultivos en suelos es sumamente difícil abastecer a las raíces simultáneamente con las cantidades de agua, aire y nutrientes que requieren. En hidroponía dadas características del sistema es posible mantener tanto la humedad como el drenaje debido a las características del sustrato.
- **Mayor densidad de población.** Se obtienen altos rendimientos por unidad de área ya que los nutrientes no son limitantes, se corrige fácil y rápidamente la deficiencia nutricional, permite el control del pH, uno de los factores que influyen notablemente en la disponibilidad y asimilación de nutrimentos y por lo tanto en el rendimiento de las plantas.
- **No dependen de los fenómenos meteorológicos.** Ya que normalmente los cultivos en hidroponía se protegen contra los vientos fuertes, las granizadas, altas y bajas temperaturas, sequías. Se puede predecir con más seguridad el monto de la cosecha para planear su comercialización con anticipación, reduce la contaminación ambiental y los riesgos de erosión.
- **Permite obtener productos de calidad.** Existe uniformidad en la producción de los cultivos, ya que las plantas florecen y maduran al mismo tiempo. Se puede utilizar menor cantidad de mano de obra no calificada.
- **Ahorro en el consumo de agua.** Debido a que se recircula el agua y se riega por métodos de sub irrigación en contenedores impermeables, la recuperación de inversión se realiza en corto tiempo, se reducen los costos de producción debido a menores gastos de fertilizantes, insecticidas y fungicidas, ya que se ahorra el

tiempo y dinero en limpiar de malezas y los materiales los cuales pueden ser reciclables.

3.2.4.2 Desventajas

Gilsanz (2007) menciona las desventajas de los sistemas hidropónicos:

Costo inicial alto. Estos sistemas presentan un costo inicial alto cuando se pretende una producción a gran escala y con fines comerciales, de todos modos, esto variará dependiendo del sistema elegido y del control que se desee realizar del ambiente de crecimiento. Si vamos a sistemas donde se controla la temperatura, humedad y luz del lugar, tendremos mayores grados de inversión en equipos de control.

Se requieren conocimientos de fisiología y nutrición. Este tiempo de producciones demandan una mayor especialización del productor, exigiéndole un mayor grado de conocimiento respecto al funcionamiento del cultivo y de la nutrición de éste. Repetidos cambios de temperatura o de ventilación tendrán respuestas directas en el cultivo, sobre todo en ambientes protegidos.

Desbalances nutricionales causan inmediato efecto en el cultivo. Al no existir suelo se pierde la capacidad buffer de este frente al exceso o alteraciones en el suministro de nutrientes.

Se requiere agua de buena calidad. Así como en los sistemas tradicionales de producción se necesita un suelo de adecuadas condiciones para la producción, en los sistemas hidropónicos se requiere agua de buena calidad, sobre todo libre de contaminantes y de excesivas sales con un pH cercano a la neutralidad.

3.2.5 Sistema de raíz flotante

El Sistema de Raíz Flotante (SRF), es un método de producción hidropónica que consiste en desarrollar cultivos en agua con una solución nutritiva, sobre plumavit u otro material similar; excluyendo el uso de cualquier tipo de sustrato. La solución nutritiva es sales minerales solubles que aportan en forma balanceada todos los elementos nutritivos que las plantas necesitan para su crecimiento y desarrollo (Pizarro et. al, 2019).

Los mismos autores indican, los cultivos desarrollados en SRF se caracterizan por el significativo ahorro en el uso de agua (60-70%) y superficie de plantación (70-80%) en comparación a cultivos desarrollados directamente en el suelo; además, de las mejores condiciones fitosanitarias e inocuidad que se pueden alcanzar. Estas ventajas permiten una mejor rentabilidad en zonas con problemas de disponibilidad de agua y calidad de suelos.

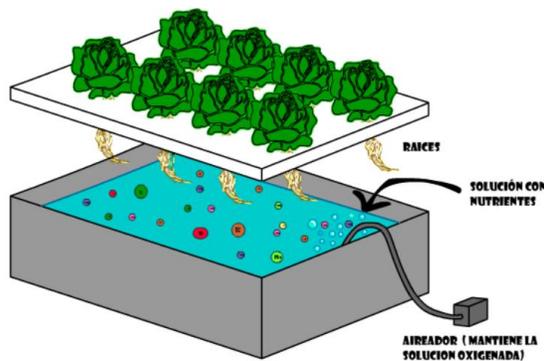


Figura 1. Sistema de raíz flotante (SRF)

El sistema raíz flotante es la técnica más utilizada en hidroponía, consta de recipientes o contenedores de madera, donde se incluye la solución nutritiva y sobre ella flotando una lámina de espumafon como soporte para la planta (Torres, 2018).

Según Castañeda, (2010) la principal desventaja es la falta de oxígeno en las raíces, dicho problema puede solucionarse generando burbujas con inyección de aire o de manera manual agitando la masa de agua con las manos dentro de la cama del cultivo. La presencia de raíces oscuras se debe a la falta oxígeno impidiendo que la planta capte el agua y los nutrientes necesarios para su desarrollo.

Por otra parte, Gilsanz, (2007) la oxigenación de la raíz es un factor muy importante para el buen funcionamiento del sistema y el ahorro en agua y fertilizantes son unas de sus principales ventajas; sus desventajas se deben principalmente al preciso y controlado manejo de la solución nutritiva.

Guzmán, (2004). Para favorecer el crecimiento de las plantas bajo cultivo en solución se requiere manejar adecuadamente ciertas condiciones físicas como la oscuridad, oxigenación y circulación.

a) Oscuridad

Para evitar el crecimiento de algas verdes y otras plantas acuáticas diminutas que pueden competir por el oxígeno y los nutrientes. La descomposición posterior de las algas puede llegar a ser tóxica para las raíces, interfiriendo con sus funciones y desarrollo.

b) Oxigenación

El éxito que se obtenga con este sistema de cultivo hidropónico, depende en gran parte del suministro adecuado de oxígeno para las raíces de las plantas a través de la solución nutritiva. El suministro de oxígeno puede ser natural, o bien, forzado de diversas maneras.

Según Marulanda (2003), el método más común para oxigenar la solución, consiste en dejar un espacio de aire entre la superficie de la misma y la parte inferior del lecho que soporta a las raíces, de tal manera que, las raíces superiores estén rodeadas por aire húmedo mientras que las inferiores están sumergidas en la solución.

El mismo autor indica, para aumentar el abastecimiento de aire a medida que crecen las raíces, hay que bajar el nivel de la solución hasta dejar un espacio máximo de 5 cm, un espacio mayor puede dañar por secamiento a las raíces superiores. También, es usual agregar oxígeno en la solución haciendo pasar burbujas de aire a través de ella mediante una bomba de aire conectada a un tubo con perforaciones de 1 mm de diámetro y 30 cm de separación, que recorre el fondo del tanque.

Además, Gilsanz (2007) menciona, el volumen de aire necesario depende principalmente del volumen de solución, de la temperatura y la clase de planta para tinas o recipientes caseros, las bombas de acuarios son adecuadas para oxigenar la solución. Otra forma de airear la solución consiste en hacerla caer al aire libre desde una altura

suficiente para que pueda oxigenarse debidamente (efecto de cascada), sin embargo, la circulación de la solución debe ser lenta para la absorción de nutrientes por las raíces.

c) Circulación de la solución

Según Gilsanz (2007), es una práctica comúnmente recomendada, ya que favorece una mejor distribución de los iones nutritivos y una mejor aireación. Es de suponerse que, el movimiento de la solución a través de las raíces ayuda a estabilizar su medio ambiente. Desde luego que el movimiento debe ser lo suficientemente lento como para no dañar a las raíces.

Según Ninancuro (2007), este sistema de cultivo muy utilizado en los proyectos de hidroponía social en diferentes países latinoamericanos, y agrega a lo anterior de que la aireación debe efectuarse por lo menos dos veces al día, independiente del método a utilizar, ya que esta acción permite redistribuir los elementos y oxigenar la solución.

Por otra parte, el mismo autor indica, en este prototipo la solución nutritiva es recirculada a través de un tanque nutritivo. Allí se oxigena bombeando aire, se enfría con una unidad refrigeradora y después se impulsa de regreso al punto más lejano de cada cama. Durante el retorno de las camas, la solución nutritiva atraviesa un esterilizador de ultravioleta, siendo efectivos contra muchas bacterias, hongos y algunos virus y protozoos tales como los nematodos.

3.3 La aireación en los sistemas raíz flotante

La aireación de la solución nutritiva en cultivos en raíz flotante es indispensable para la producción de cultivos de hoja.

En el proceso de la optimización de la producción de los cultivos es necesario realizar evaluación de diversos factores que puedan afectar la producción y calidad. Zheng et al. (2007), indican que un ambiente radical bien oxigenado es esencial para la salud del sistema radical (absorción de nutrientes, crecimiento y mantenimiento de raíces) y la prevención de enfermedades radicales.

Este importante aspecto de los cultivos sin suelo se resuelve mediante varios métodos. Tal vez el más usado, es el burbujeo de aire continuo con un compresor. Su facilidad de construcción, así como su flexibilidad para el uso en unidades caseras lo hace muy recomendable, también se utiliza con fines comerciales Resh, (2001).

La pobre aireación y la inundación del sistema radicular, en hidroponía, raramente produce síntomas llamativos en el cultivo, pero sí una disminución en el crecimiento y rendimiento.

3.3.1 El oxígeno; requerimiento esencial

La falta de oxígeno reduce la absorción de agua y minerales por parte de la planta, con repercusiones en el crecimiento aéreo y radicular y, en consecuencia, en el rendimiento final (Tesi et al., 2003).

Raíces saludables, con buen suministro de aire, son capaces de absorber más selectivamente los iones de la solución. La energía metabólica que es requerida para este proceso es obtenida de la respiración radicular, la cual es inhibida por la falta de aireación. Es decir, en sistemas radiculares anaeróbicos, puede haber una pérdida neta de iones (Jackson 1980, citado por Fernández, 2013).

Para el mismo autor indica que, cuando no se detecta oxígeno en la zona radicular, se dice que existe “anoxia” o condiciones “anaeróbicas”, aunque generalmente se utiliza el término de “hipoxia”. En el reino vegetal pocas son las especies que pueden tolerar condiciones de anoxia, el más notable es el arroz y especies silvestres de ambientes húmedos. Aprender a reconocer los síntomas producidos por condiciones anaeróbicas (a nivel radicular) es importante para cualquiera que esté involucrado en hidroponía, los síntomas producidos por baja aireación frecuentemente son atribuidos a otras fuentes.

3.3.2 Consecuencias de la falta de oxígeno

La carencia o escasez de oxígeno en la zona radicular de la planta tiene muchas formas de manifestarse, dependiendo de la especie. En general, por debajo de los 3-4 mg / l, de oxígeno disuelto en la solución, se produce una disminución en el crecimiento radical, apareciendo un color pardo de éste, tal vez sea el síntoma más precoz y fácilmente detectable de los primeros problemas al respecto (Gislerod y Kempton, 1983). Otro de los síntomas más frecuentes de una inadecuada oxigenación es el marchitamiento de la planta durante el mediodía, cuando los niveles de temperatura y luminosidad son los más altos.

La falta de oxígeno reduce la permeabilidad de las raíces al agua y habrá una acumulación de toxinas; así el agua y los minerales no pueden ser absorbidos en cantidades suficientes para el crecimiento bajo condiciones de estrés. Este marchitamiento está acompañado por una disminución en la fotosíntesis y transferencia de carbohidratos; por lo tanto, el crecimiento de la planta es reducido y el rendimiento se verá afectado. Si la falta de oxígeno continua, las deficiencias comenzarán a manifestarse, las raíces morirán y la planta no desarrollará. En condiciones anaeróbicas, se produce una hormona de estrés: el etileno, el cual se acumula en las raíces y sus células colapsan. Una vez que ha comenzado el deterioro de la raíz, provocado por la anaerobiosis, los patógenos oportunistas como el *Pythium* pueden entrar rápidamente a la planta y destruirla (Morgan, 2001).

3.3.3 Importancia de la temperatura

La temperatura influye en la capacidad de absorción de agua y nutrientes. Cuando la temperatura es muy alta o baja provoca un decrecimiento de las raíces de las plantas, por encima de 30 °C y debajo de 12 °C la absorción de iones se ve muy limitada (Santos y Ríos, 2016).

Según Martínez et al. (2012), la temperatura afecta el balance de oxígeno de la solución nutritiva. Conforme se incrementa la temperatura, la cantidad de oxígeno del agua decae rápidamente. La falta de oxígeno reduce la permeabilidad de las raíces, provoca la muerte de microorganismos benéficos y hace más susceptibles a las plantas a ataques de patógenos.

La lechuga es considerada la especie más tolerante a la falta de oxígeno, siendo unos de los cultivos más recomendados para los sistemas hidropónicos. Los niveles adecuados de oxígeno disuelto se encuentran entre 3 a 4 ppm (Martínez et al., 2012).

Tabla 3. Relación entre la temperatura de agua y oxígeno

temperatura (°C)	OD (mg/l)	temperatura (°C)	OD (mg/l)
0	14.6	16	9.9
1	14.2	17	9.7
2	13.8	18	9.6
3	13.5	19	9.3
4	13.1	20	9.1
5	12.8	21	8.9
6	12.5	22	8.7
7	12.1	23	8.6
8	11.8	24	8.4
9	11.6	25	8.3
10	11.3	26	8.1
11	11.0	27	8.0
12	10.8	28	7.8
13	10.5	29	7.7
14	10.3	30	7.6
15	10.1	31	7.5

Fuente: Universidad Indígena Boliviana Aymara Tupac Katari

3.3.4 Métodos de aireación en hidroponía

KrosAgro, (2021) cuando se empezó a plantear el uso de la hidroponía para cultivos comerciales, a principios de siglo pasado, se comenzó usando unos sistemas que esencialmente soportaban plantas sobre una solución de nutrientes. El problema era que el crecimiento era lento y no podía competir con los cultivos tradicionales. Esto se debía a la falta de aireación de las raíces. Existen varias alternativas para facilitar la oxigenación del agua:

3.3.4.1 Burbujeo

Según Basterrechea (2016) uno de los sistemas más fáciles de usar a pequeña escala, ya que solo necesita una bomba de aire. Basta con conectarla a una tubería con orificios o una piedra de burbujas en el fondo del cultivo para que burbujee. Es el que se suele utilizar para el sistema flotante, ya que la solución nutritiva no se encuentra en movimiento.

3.3.4.2 Salto de agua

Otro método comúnmente usado en invernaderos es generar caídas de aguas en un circuito, por ejemplo, al devolver agua al tanque de recogida. Una altura recomendable para la caída es de al menos 50 cm. Mientras el agua cae las gotas entran en contacto con el agua y se reoxigenan. Otra recomendación es añadir una pieza perforada con agujeros en la caída para que aumente la superficie de contacto con el aire (KrossAgro, 2021)

No es tan cómodo como el burbujeo para los pequeños cultivos en casa, pero si hay algún sistema que se ayuda de esta posibilidad, como Window Farms. Para ello lo que necesitas es una bomba de agua

3.3.4.3 El mismo aire

Hay ciertos sistemas en los cuales hay momentos en los que las raíces no están en contacto con el agua. Por ejemplo, el sistema Ebb and Flow (sistema de flujo y reflujos), en el que el medio con las raíces se llena de agua con nutrientes y se vacía en intervalos regulares de tiempo. De esta manera las raíces pueden recuperar nutrientes y oxigenarse sin problemas.

3.3.4.4 Suspensión

Para KrossAgro, (2021) la forma más sencilla de airear los cultivos hidropónicos es suspendiendo las plantas. En lugar del sistema tradicional y popular en el que deja que las plantas se asienten en el agua, puede considerarse tener una configuración vertical. En comparación, un sistema hidropónico vertical alimentará la solución nutritiva desde la parte superior y se acumulará en la parte inferior, que luego goteará hacia las raíces.

3.3.5 Solución Nutritiva

La solución nutritiva es agua con nutrientes minerales, que se añaden a través de fertilizantes comerciales, en cantidades y proporciones adecuadas de manera que cubran las necesidades de la planta para su crecimiento y desarrollo. Una solución nutritiva consta de agua con oxígeno disuelto y de todos sus nutrientes de forma iónica, tenemos los macronutrientes: Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Azufre, por otro lado, los Micronutrientes: Boro, Cloro, Hierro, Cobre, Magnesio, Molibdeno, Zinc y Níquel. Las necesidades de los elementos minerales de los cultivos dependen de la especie y estado de desarrollo (INCA, 2013).

Para Fabela (2006) el cultivo sin suelo es la técnica que más se utiliza para producir hortalizas de invernadero. Este sistema de producción requiere un continuo abastecimiento de nutrimentos, el cual se suministra por el medio de solución nutritiva que contiene los elementos esenciales para el óptimo desarrollo de los cultivos.

Una solución nutritiva consta de agua con oxígeno y de todos los nutrientes esenciales en forma única y eventualmente, de algunos compuestos orgánicos tales como los quelatos de hierro o de algún otro micronutriente que puede estar presente.

Una solución nutritiva verdadera es aquella que contiene las especies químicas indicadas en la solución, por lo que deben coincidir con las que se determinan mediante el análisis químico correspondiente.

Según FAO (2007). Una solución nutritiva en hidroponía aporta los elementos esenciales a las plantas que se cultiva, estos elementos son H, O, N, P, K, Zn, Mg, S, Fe, Cu, Mn, B y Mo.

La solución nutritiva se define como un conjunto de compuestos y formulaciones que contienen los elementos esenciales disueltos en el agua, que las plantas necesitan para su desarrollo.

Los elementos esenciales, que permitan sobrevivir a la planta son los Macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) que son los elementos más demandados para su desarrollo, y los micronutrientes (Cl, B, Fe, Mn, Zn y Mo) que son elementos que se requieren en menor proporción. Según (FAO, 2007)

3.3.6 PH de la solución nutritiva

Según Fabela et al. (2006) el pH de la solución nutritiva se determina por la concentración de los ácidos y de las bases. El pH se define una vez que se establece la proporción relativa de los aniones y de los cationes, y la concentración total de ellos en meq L⁻¹, lo cual significa que el pH es una propiedad inherente de la composición química de la solución nutritiva y no puede cambiar independientemente.

Para el mismo autor el pH apropiado de la solución nutritiva para el desarrollo de los cultivos se encuentra entre los valores 5,5 a 6,5 de pH, sin embargo, el pH de la solución nutritiva no es estático, ya que depende del CO₂ en el ambiente de que la solución nutritiva se encuentre en un contenedor cubierto o descubierto, del ritmo de absorción nutrimental, de la fuente nutrimental y de la fuente nitrogenada utilizada.

Cabezas (2017) sostiene que, el pH nunca permanecerá constante en la solución nutritiva, las plantas en pleno desarrollo absorben más aniones que cationes, es decir, nitratos (NO_3^-), Fosfatos (PO_4^-), Sulfatos (SO_4^-) y absorben menos potasio (k), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y el pH tiende a subir, plantas en plena producción absorben más cationes que aniones, por tanto, el pH bajará.

Izquierdo (2005) argumenta que, para disminuir el valor de pH del agua se agrega una solución de ácido nítrico (HNO_3) y ácido Ortofosfórico (H_3PO_4). Si no se dispusiera de alguno de estos dos ácidos, se sugiere preparar la solución con el ácido existente. Si el pH es inferior a 5.5, lo más recomendable para subir el pH es hidróxido de sodio (NaOH).

3.3.6.1 Efecto del pH en cultivos

Según Guzmán (2004) el rango conveniente de pH que permite a las plantas una absorción adecuada, de los elementos nutritivos, sin riesgo de carencias de ninguno de ellos es de 6,5 unidades.

Baixauli y Aguilar (2002) mencionan que, el pH de una solución nutritiva marca el carácter ácido o básico, e influye sobre la solubilidad de los iones, que la mayor parte de las plantas trabajan bien en soluciones nutritivas con pH comprendido entre 5 y 7, en los cultivos hidropónicos generalmente se trabaja con pH de 5,5 y 5,8 puesto que en dicho rango de pH se encuentran mejor disueltos los iones, especialmente el fósforo y los micro elementos.

Rodríguez et al. (2001) afirma que, en un sistema recirculante el pH tiende a elevarse ($\text{pH} > 7,0$) y tiene que ser ajustado a 6,5 añadiendo una solución ácida (ácido nítrico, fosfórico o sulfúrico) a la solución nutritiva. Esto permite que se mantenga el pH dentro de un rango adecuado por mayor tiempo, (es necesario conocer rangos de pH adecuados para los cultivos sin necesidad de ajustar diariamente el pH).

3.3.7 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es un indicador indirecto de la concentración salina del agua y de la solución nutritiva; nos puede dar un indicio si el agua a utilizar es la adecuada y sobre la vida útil de la solución nutritiva en el sistema. Al comenzar el agua de nuestra fuente deberá contar con el nivel más bajo posible de la conductividad eléctrica; son adecuados valores de 0,7 – 1,2 mS/cm. Luego de agregado de sales, al formular la solución, la conductividad dependerá del cultivo y el estado de crecimiento, por ejemplo, la lechuga tiene márgenes bajos para su desarrollo (entre 2 – 2,5), el tomate tolera valores más altos.

Al tener valores más altos de sales disueltas en la solución, la absorción de nutrientes por la planta se ve limitada, repercutiendo en el normal desarrollo del cultivo (Aguilar et al., 2002).

INIA (2011) la conductividad eléctrica del agua también depende de la temperatura del agua: a más alta temperatura, más alta sería la conductividad eléctrica, la conductividad eléctrica del agua aumenta en un 2-3% para un aumento de 1 grado Celsius de la temperatura del agua, muchos medidores de conductividad eléctrica que existen en el mercado normalizan automáticamente las lecturas a 25°C.

3.3.7.1 Efecto de la CE en cultivos hidropónicos

En los sistemas hidropónicos el manejo de la solución nutritiva es crucial para la obtención, tanto de altos rendimientos, así como la calidad, pues es la vía a través de la cual se proporcionan nutrimentos necesarios para el desarrollo de la planta (Carrasco et al., 2007).

En estas soluciones la conductividad eléctrica (CE) tiene una estrecha relación con la concentración total de sales de la solución nutritiva es un estimador indirecto del potencial osmótico, y determina el crecimiento, rendimiento y la calidad de los cultivos (Bugarín et al., 2003).

Tabla 4. Valores recomendados de CE y pH de soluciones nutritivas

Cultivo	CE (sD/cm)	pH
Albahaca	1,8 – 2,2	5,5 – 6,5
Apio	2,5 – 3,0	6,0 – 6,5
Berro	2,5 – 3,0	6,0 – 6,8
Cebolla	1,4 – 1,8	6,0 – 7,0
Col	2,5 – 3,0	6,5 – 7,0
Coliflor	1,5 – 2,0	6,5 – 7,0
Espinaca	1,4 – 1,8	6,0 – 7,0
Lechuga	0,8 – 1,6	5,0 – 6,5
Melón	2,0 – 2,5	5,5 – 6,0
Pepinillo	1,0 – 2,5	5,5 – 6,0
Sandia	1,7 – 2,5	5,8 – 6,2
Tomate	2,0 – 5,0	5,5 – 6,5

Fuente: Rodríguez, Hoyos y Chang (2001)

3.3.8 Cambio y duración de la solución nutritiva

Según Chang (2000), la duración y el cambio de la solución nutritiva dependen principalmente del contenido de iones que no son utilizados por las plantas. La medida de la conductividad eléctrica indicará el nivel de la concentración de la solución. La vida media de una solución que haya sido ajustada por medio de análisis, se recomienda un cambio total de la solución nutritiva a las 4 o 6 semanas, cuando se cultivan lechugas, la etapa definitiva dura 4 semanas y no se cambia la solución nutritiva durante ese tiempo.

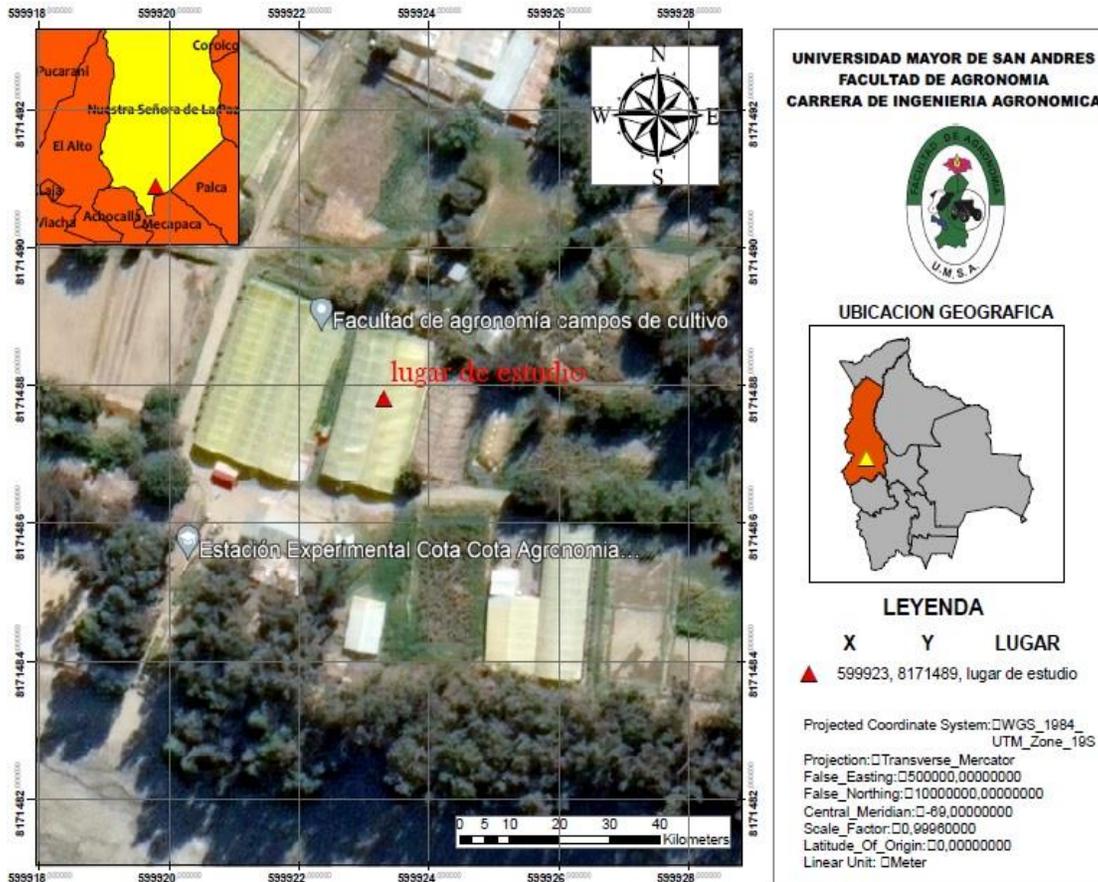
3.3.9 Fertilizantes inorgánicos

Delfín (2001), citado por Pacheco (2020) menciona que, los fertilizantes proveen nutrientes que los cultivos necesitan, con los fertilizantes químicos se pueden producir más alimentos y de mejor calidad, se puede mejorar la baja fertilidad de los suelos que han sido sobre explotados. Estos proveerán el bienestar de su pueblo, de su comunidad y de su país. La composición de un fertilizante es la cantidad de nutriente que contiene. En los fertilizantes simples, las unidades que se consideran para el cálculo de su composición son las siguientes: N, P₂ O₅, K₂O, CaO y MnO.

La composición de un fertilizante compuesto se indica por tres números que corresponden a los porcentajes de N, P₂ O₅ , K₂O, se denomina concentración a la suma de la riqueza de los tres elementos del fertilizante, un fertilizante ternario 15-15-15 tiene una concentración nutricional del 45% con contenidos de 15%, 15% y 15% de N, P₂ O₅ , K₂O respectivamente, es decir que un quintal de 15-15-15 posee 15 libras de N, 15 libras de P₂ O₅ y 15 libras de K₂O, el 55% restante de la composición del fertilizante en material inerte, si hay más números, corresponde a otros nutrientes: CaO, MnO y S.

4 LOCALIZACIÓN

4.1 Ubicación geográfica



Fuente: Sánchez 2022

Figura 2. Ubicación geográfica del trabajo de investigación

El trabajo de investigación se desarrolló en el Centro Experimental Cota Cota de la Facultad de Agronomía dependiente de la Universidad Mayor de San Andrés, en el departamento de La Paz – Bolivia, a $16^{\circ}32'04''$ de latitud sur, $68^{\circ}03'44''$ de longitud oeste del Meridiano de Greenwich y 3445 m.s.n.m.

Las condiciones climáticas son de cabecera de valle con veranos calurosos y temperatura promedio de 21°C , en la época invernal la temperatura puede bajar hasta 2°C incluso llegar hasta 1°C , en los meses de agosto y noviembre se presentan vientos fuertes con dirección este, la temperatura media es de 13.5°C , con una precipitación

pluvial de 400 mm, las heladas se manifiestan en 15 días de los años con temperaturas por debajo de 0°C, la humedad relativa media es 46% (SENAMHI, 2021).

4.1.1 Suelo

La comunidad presenta en las zonas de colina suelos muy superficiales, limitados por el contacto lítico, con muy poco desarrollo genético. Es de textura franco-arenosa. Presenta grava, grava pequeña y regular materia orgánica. Los suelos de la planicie son más profundos (0,20 m – 0,40 m) aptos para la agricultura intensiva. Existe menor proporción de terrazas naturales formadas a niveles anteriores a la planicie; y generalmente son destinadas a la explotación agrícola.

4.1.2 Vegetación y pecuaria

Está comprendida por árboles como eucaliptos (*Eucalyptus globulus*), pinos (*Pinus radiata*) y ciprés (*Cupressus sp*). Arbustos: acacia (*Acacia sp*), retama (*Spartium junceum*) y chilca (*Baccharis salicifolia*) entre otros. El centro experimental se dedica a la producción agrícola, pecuaria (ganado menor) y apícola.

La producción agrícola se realiza a campo abierto mediante la rotación de cultivos y comprende: maíz, papa, haba, arveja, cebolla, beterraga ente otros. En ambiente protegido (carpas solares) la producción es hortofrutícola: frutilla, pepinillo, tomate, lechuga y otros de acuerdo a los trabajos de investigación que se desarrollen. La producción pecuaria comprende la crianza y manejo de aves (gallinas ponedoras y pollos de engorde), porcinos, cuyes y conejos (Sánchez, 2022)

4.2 Características de la carpa solar

La carpa solar donde se realizó la investigación es de dos aguas, su estructura es mayormente metálica y en menor parte de madera, a los costados y el posterior presentan ventanas cubiertas por malla semisombra que regulan la temperatura y la humedad relativa dentro del ambiente. La carpa está recubierta por agrofilm de color amarillo. El área de la carpa solar es de 16 m² (Sánchez, 2022)

La carpa es hortícola la cual tiene dos propósitos y se encuentra dividida longitudinalmente para cada propósito, en un sector se encuentra un cultivo intensivo tradicional de lechugas con un sistema de riego por goteo y en el sector continuo se encuentran las pirámides y piscinas hidropónicas, este último sector es el destinado para investigaciones con diversidad de hortalizas.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales

5.1.1 Material vegetal

El material vegetal que se utilizó en la presente investigación, fue semillas de lechuga cuyas características ya fueron mencionadas.

- 0.5 Oz de la variedad White Boston

5.1.2 Material fertilizante sintético

El fertilizante sintético empleado para formular la solución nutritiva se detalla a continuación:

- Nitrato de Potasio
- 16-16-16 (N-P-K)
- Nitrato de Calcio
- Sulfato de Magnesio
- Fosfato Mono Amónico
- Micronutrientes
- Quelato de Hierro

5.1.3 Material para almácigo

- Bandejas de plastoformo 4 cm
- Nylon negro
- Esponja 3 cm de espesor
- Pinzas
- Mesa de trabajo

5.1.4 Materiales para el acondicionamiento del sistema hidropónico RF

El material de acondicionamiento del sistema hidropónico RF fueron los siguientes:

- Tubos
- Alambres
- Estacas de fierro
- Tenaza
- Bandejas de plastoformo de 1m x 0.5 m de 3 cm de espesor

5.1.5 Material de laboratorio

- Balanza analítica de 500 g de capacidad
- Probeta de 100 ml

5.1.6 Material de escritorio

- Calculadora
- Lápices y bolígrafo
- Laptop
- Planillas de control
- Cámara fotográfica
- Libros y tesis de grado

5.2 Metodología

5.2.1 Trabajo de campo

5.2.1.1 Acondicionamiento de la piscina

La piscina tiene una dimensión de 6m x 1.5m, la cual se dividió en 4 para poder establecer las alturas de 5 cm, 3 cm, 1 cm y 0 cm con ayuda de tubos y alambres.

Lo primero que se realizó fue el llenado de 5 cm de agua a la piscina para poder medir al nivel del agua el tamaño de tubo que se cortó, cada tubo estaba a una distancia de 20 cm., a cada lateral de la piscina tenía un fierro para poder hacer agarrar el alambre y que los tubos estén por debajo de él.

Una vez realizado este trabajo se procedió a la limpieza y desinfección de la piscina.

5.2.1.2 Almacigo de esponja

Para el área de almacigo de semilla:

Ya existía una cámara para proteger los almacigos del calor excesivo y/o de bajas temperaturas, esta cámara tiene un armazón de metal y estar recubierto de agrofilm, las dimensiones son de 1,10m x 0,93m x 0,60m de forma rectangular.

- Se cortó esponjas obteniéndose piezas de 2cm x 2cm x 3cm, se procedió a lavarlas con vinagre para eliminar los restos químicos propios de su fabricación, luego se enjuagó con abundante agua para eliminar el vinagre, quedando listo para la siembra.
- Se acomodaron las piezas de esponja lavadas y enjuagadas en 3 bandejas que median 37 cm de largo y 27 cm de ancho, ya perforadas para el encaje de las piezas de esponja.
- En el sustrato ya húmedo se realizó la siembra dejando caer 2 semillas en cada hoyo de cada pieza, el sustrato es poliuretano (esponja).

- Luego se cubrió con nylon negro hasta su emergencia, posteriormente se destapó del nylon y se llevó las bandejas de plastoformo a la piscina, en el cual la plántula crecería hasta lograr mínimamente 2 a 4 hojas verdaderas y 8 cm de altura para el trasplante definitivo.

5.2.1.3 Área de piscina

La carpa ya cuenta con una piscina con dimensiones de 2,0m x 1,45m x 0,35m con forma rectangular, que es específicamente para almácigos, el armazón de la piscina es de metal y el material envolvente es lona azul.

En el área de piscina, las plántulas tienen su raíz flotando en el medio acuoso cual favoreció el crecimiento para la raíz para el trasplante definitivo, las plántulas permanecieron hasta obtener hojas verdaderas y mínimamente una altura de 5 cm.

En esta piscina las bandejas de plastoformo flotan y permiten a las plántulas tener su raíz dentro de la solución y las hojas fuera de ella. La piscina mantiene una lámina de solución nutritiva.

5.2.1.4 Trasplante al sistema raíz flotante (SRF)

Una vez limpia y desinfectada la piscina se llenó de agua y con las correspondientes soluciones nutritivas hasta los 5 cm de altura. Para sostener las pláticas se utilizó láminas de plastoformo, ya con las densidades respectivas.

Cuando las plántulas tenían de 3 a 4 hojas verdaderas y alcanzaron los 7 cm, se trasplantaron a la piscina, se trasplantó a tres diferentes densidades donde crecen hasta la cosecha.

5.2.1.5 Labores culturales

- **Cambio de la solución nutritiva.** Se realizó dos veces en los 45 días de estar en el sistema raíz flotante
- **Refallo.** Se colocó plantines reemplazando a los que no se hayan aclimatado

- **Limpieza.** Se realizó el deshierbe de alrededor de la piscina para evitar el contagio de plagas y enfermedades.
- **Cuidados al ingreso de la carpa.** En la entrada de la carpa se colocó una bandeja con cal para prevenir el ingreso de plagas y enfermedades.

5.2.1.6 Cosecha

La etapa de cosecha se realizó cuando la lechuga alcanzó su madurez comercial, es decir cuando cumpla con todas las características demandadas por el consumidor final. Aquí se procedió a la recolección de los datos a ser analizados.

5.2.1.7 Formulación de las soluciones nutritivas

Para una adecuada formulación de sales en cualquier cultivo, se debe determinar algunas características, tanto del agua como del cultivo, específicamente se deben conocer los requerimientos nutricionales del cultivo, el contenido de sales del agua, y la disponibilidad de sales con las que se cuenta.

Se debe indagar meticulosamente la necesidad nutricional del cultivo, en todas sus fases de crecimiento.

5.2.1.8 Requerimientos nutricionales del cultivo de la lechuga

Según Resh (2001) para la producción de lechuga, se tiene la siguiente relación:

Tabla 5. Requerimiento de nutrientes para lechuga en ppm o mg/l.

N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
200	50	210	200	50	113	5	0.5	0.1	0.1	0.5	0.5

5.2.1.9 Análisis del agua

De acuerdo a Resh (2001), se recomienda usar agua de uso humano para cultivos hidropónicos, cuidando de que este no tenga concentraciones de hipoclorito de sodio que sea perjudicial para el cultivo. Para tal fin se realizó análisis químico del agua.

Ver Anexo 15: Análisis químico del agua

Tabla 6. Formulación nutricional

Una vez realizado los cálculos, se procedió al preparado de la solución nutritiva, que se desarrollara a continuación:

Composición	Fertilizante	Requerimiento en g
Solución Concentrada	16 – 16 – 16	859,19
“A”	Nitrato de Amonio	245,40
	Nitrato de Potasio	354,78
Solución Concentrada	Quelato de Hierro	5,98
“B”	Sulfato de Magnesio	348,23
	Cosmoquel Menores	120
Solución Concentrada	Nitrato de Calcio	1111,58
“C”		

Fuente: Murillo (2020)

5.2.2 Medición de la temperatura

Se realizó el monitoreo de la temperatura interior del invernadero utilizando un termómetro que lanza datos en °C, el cual estuvo ubicado en parte central del trabajo de investigación.

- La temperatura de la carpa desde la almaciguera hasta la cosecha.
- La temperatura de la solución nutritiva esto desde el primer trasplante a la piscina definitiva hasta la finalización de la investigación.

5.2.3 Diseño Experimental

En esta fase se empleó el tipo de investigación experimental cuantitativa bajo un diseño completamente aleatorio (DCA) con un arreglo bifactorial en parcelas divididas (Arteaga, 2016), aplicable a variables cuantitativas con distribución normal.

Los tratamientos fueron sorteados al azar, con el objetivo de tener los tratamientos más dispersos, con el arreglo en parcelas divididas se pudo controlar las alturas de suspensión, teniendo así doce tratamientos y tres repeticiones, para un total de treinta y seis unidades experimentales, los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza y su comparación de medias (prueba de Tukey).

Los datos se sometieron a análisis de varianza y pruebas de comparación de medias Tukey ($\alpha = 0.05$), con el paquete estadístico Info Stat, versión 2020.

5.2.3.1 Modelo estadístico

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \epsilon_a + \beta_j + (\alpha\gamma_{ij}) + \epsilon_b$$

Donde:

Y_{ijk} = Una observación cualquiera

μ = Media poblacional.

ϵ_a = Error de parcela principal

α_i = Efecto del i-ésimo nivel del factor A (Frecuencias de aplicación)

β_j = Efecto del j-ésimo nivel del factor B (Densidades de siembra)

$(\alpha\gamma_{ij})$ = Efecto del i-ésimo nivel del factor A con el j-ésimo nivel del factor B

(interacción A x B)

ϵ_b = Error experimental de la parcela

5.2.3.2 Factores de Estudio

El factor A fueron las alturas de suspensión y el factor B las densidades, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Factores de estudio

Factores de estudio	Altura y densidad
Factor A:	A0 = 0 cm (Testigo)
Alturas de suspensión	A1 = 1 cm
	A2 = 3 cm
	A3 = 5 cm
Factor B:	B1 = 15 cm
Densidades	B2 = 20 cm
	B3 = 25 cm

Según al diseño que fue un DCA con arreglo en parcelas divididas donde:

- **A0, A1, A2, A3** = Parcelas grandes (Alturas de suspensión).
- **B1, B2, B3** = Parcelas pequeñas (Densidad de trasplante)

5.2.3.2.1 Tratamientos

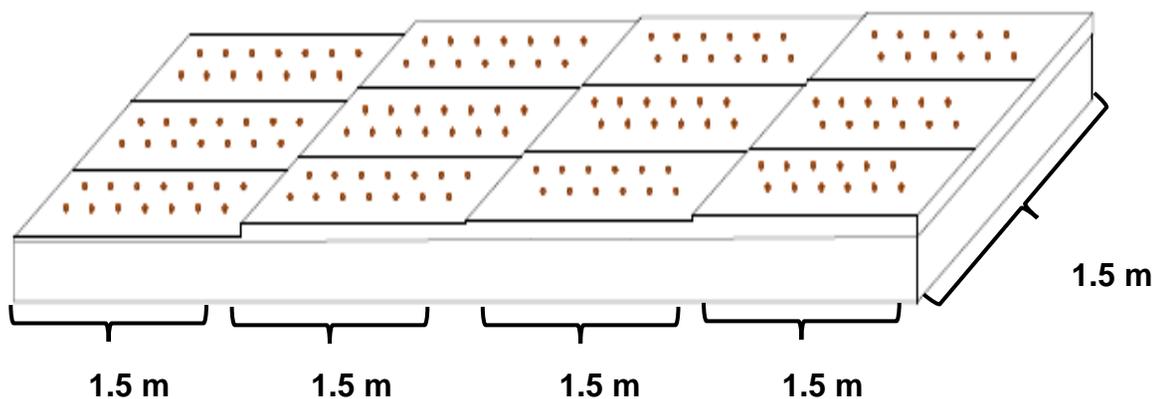
Los factores mencionados anteriormente fueron distribuidos al azar en doce tratamientos, como se muestra a continuación:

Tabla 8. Descripción de los tratamientos

TRATAMIENTO	COMBINACIÓN	DESCRIPCIÓN
T 1	A0*B1	Altura 0 cm * Densidad 15 cm
T 2	A0*B2	Altura 0 cm * Densidad 20 cm
T 3	A0*B3	Altura 0 cm * Densidad 25 cm
T 4	A1*B1	Altura 1 cm * Densidad 15 cm
T 5	A1*B2	Altura 1 cm * Densidad 20 cm
T 6	A1*B3	Altura 1 cm * Densidad 25 cm
T 7	A2*B1	Altura 2 cm * Densidad 15 cm
T 8	A2*B2	Altura 2 cm * Densidad 20 cm
T 9	A2*B3	Altura 2 cm * Densidad 25 cm
T 10	A3*B1	Altura 3 cm * Densidad 15 cm
T 11	A3*B2	Altura 3 cm * Densidad 20 cm
T 12	A3*B3	Altura 3 cm * Densidad 25 cm

5.2.3.3 Dimensiones del Área Experimental

En la figura 3 se detalla las dimensiones de la estructura hidropónica, en el cual se observan detalladamente las dimensiones de la piscina.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Dimensiones del sistema hidropónico

5.2.3.4 Croquis Experimental

En la figura 4, se señala el croquis experimental de los 12 tratamientos

T 12	T 7	T 4	T 3
T 11	T 9	T 5	T 1
T 10	T 8	T 6	T 2

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Croquis Experimental

5.2.3.5 Variables agronómicas

- **Altura de la planta**

En tal efecto para determinar la altura de la planta se realizaron la medición de 3 plantas al azar por unidad experimental, tomando en cuenta la longitud desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la hoja superior, utilizando una regla obteniendo la medición al momento de la cosecha.

- **Número de hojas**

Para evaluar esta variable (Hojas /Planta) se realizó mediante el conteo de desde la primera hoja con desarrollo completo a excepción de aquellas que recién emergían de la roseta, los datos se tomaron a partir de los 50 días después de la siembra.

Al ser esta variable de datos discontinuos o discretos, fue necesario para el análisis estadístico transformar los datos discontinuos a datos continuos, se hace una transformación de raíz cuadrada, para tener una precisión en los resultados (Little, 1976).

- **Peso radicular**

En la evaluación de la variable peso de raíz, se pesaron las muestras de cada tratamiento utilizando la balanza analítica, Los valores obtenidos de cada raíz se expresaron en gramos después de la cosecha.

- **Volumen radicular**

Este dato se obtuvo al final de la cosecha a los 50 días, utilizando una probeta de 100 ml, con un volumen de agua conocido al volumen total, mediante la siguiente formula:

- $\text{Volumen total} = \text{Volumen de Agua conocido} + \text{Volumen radicular}$
- $\text{Volumen Radicular} = \text{Volumen total} - \text{Volumen de Agua conocido.}$

5.2.3.6 Variable de rendimiento

Los datos de las variables fueron obtenidos durante la cosecha:

- **Peso fresco**

En la evaluación de la variable peso fresco, se pesaron las muestras de cada tratamiento utilizando la balanza analítica, Los valores obtenidos de cada planta se expresaron en (g/planta) después de la cosecha.

5.2.3.7 Variables Económicas

La evaluación económica se realizará según la metodología propuesta por:

García (2014), que recomienda el análisis de beneficios netos y el cálculo de la tasa de retorno marginal de los tratamientos alternativos, para obtener los beneficios y costos marginales. Los rendimientos se ajustarán al menos 10% por efectos del nivel de

manejo, puesto que el experimento estará sujeto a cuidados y seguimientos que normalmente no se dan en condiciones de producción comercial.

- **Beneficio**

Es llamado también in bruto, es el rendimiento ajustado, multiplicado por el precio del producto.

- **Costos variables**

Los costos variables son relacionados con los insumos comprados para cada ciclo productivo, los cuales varían con los tratamientos de una variedad a otra.

- **Costos fijos**

Los costos fijos son aquellos costos que se incurren solo una vez durante varios ciclos de producción.

- **Costos totales**

Es la suma del costo variable más el costo fijo, para conocer cuánto de dinero se utilizó en el total de la producción de lechuga hidropónico.

- **Beneficio neto**

Es aquel valor de los ingresos monetarios descontando el ingreso bruto de la producción, es decir descontando todos los gastos que se ha generado durante el proceso productivo.

- **Beneficio costo (B/C)**

La relación beneficio/costo, es la comparación sistemática entre el beneficio o resultado de una actividad y el costo de realizar esa actividad.

La regla básica del beneficio/costo B/C, es que una inversión será rentable, si los beneficios son mayores que la unidad ($B/C > 1$), si es igual a la unidad ($B/C = 1$) no existe

perdida ni ganancia y no es rentable si es menor a la unidad ($B/C < 1$). (Proinpa, mencionado por Sánchez 2022).

6 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados que se muestran a continuación, reflejan el efecto de los factores estudiados en el presente trabajo de investigación.

6.1 Comportamiento de la temperatura en la carpa solar

Las temperaturas registradas en la carpa solar son tomadas constantemente, sin embargo, solo se tomaron en cuenta los datos de temperatura desde la siembra que fue el 3 de enero hasta la cosecha que fue el 17 de febrero.

En la Figura 5, se observan las fluctuaciones existentes durante la investigación en el desarrollo del cultivo al interior de la carpa solar entre los meses de diciembre, enero y febrero.

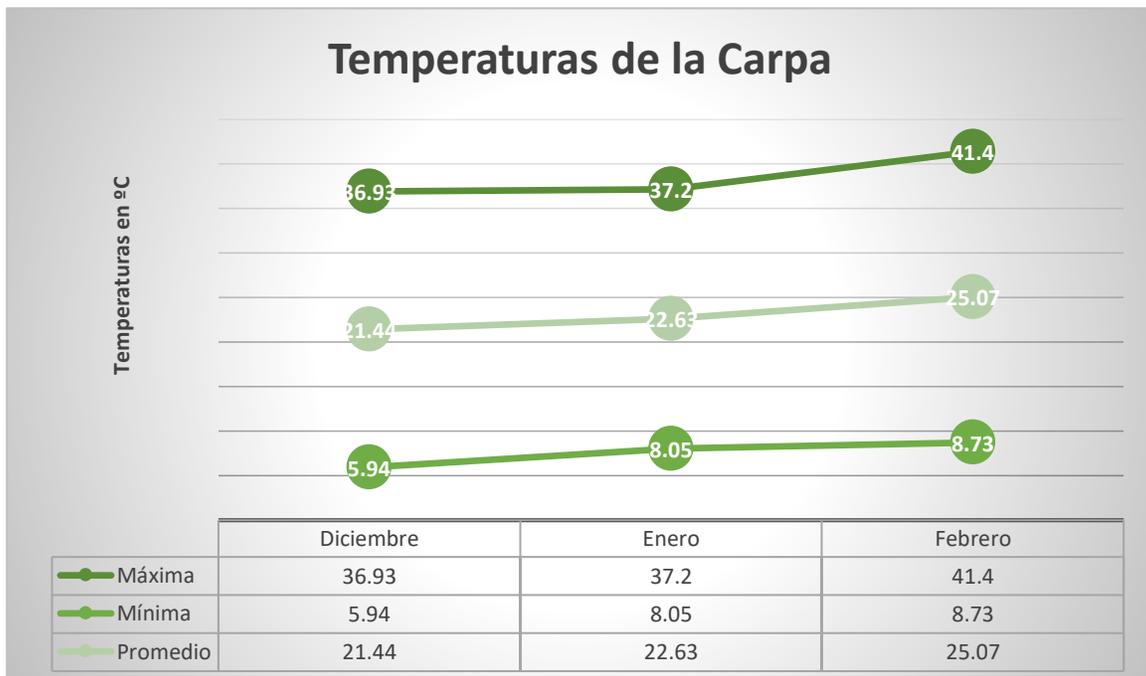


Figura 5. Temperaturas máximas y mínimas

En el tiempo de desarrollo del experimento no se observaron efectos negativos por parte de las plantas, es decir que las plantas se mantuvieron totalmente tolerantes a las temperaturas altas y bajas durante todo su ciclo vegetativo.

Según Enciclopedia práctica de la Agricultura y Ganadería (2007), presenta las siguientes características agroecológicas:

- **Clima:** se desarrolla mejor en un clima templado fresco.
- **Temperaturas:** las temperaturas necesarias para obtener un buen crecimiento y calidad son los siguientes: Promedio óptimo 15° - 20° C máximo 21° - 24° C y mínimo 7° C.

El promedio mensual óptimo 15° - 20° C. favorecen la formación de cogollos, las temperaturas altas dan lugar al desarrollo prematuro del tallo, floración y un sabor amargo en las hojas con falta de firmeza en las cabezas.

Las temperaturas altas también provocan la aparición de quemaduras de los extremos de las hojas. Las temperaturas para lograr una buena germinación de semillas son: Optima 24° C, mínima 1,6° C y máxima 29,4° C.

Las semillas de lechuga son muy sensibles a las temperaturas elevadas, no germinan a más de 30° C de temperatura del sustrato o se produce una fermentación de descomposición.

Según Flores (2005), menciona que la temperatura tiene mucha importancia en el desarrollo de las plantas, afecta a la intensidad y velocidad de los procesos fisiológicos, actúa en forma directa sobre la humedad y la evaporación incidiendo en la morfología vegetal.

6.2 Comportamiento de la temperatura de la solución nutritiva

En la Figura 6 se puede observar que a las 09:00 hrs la temperatura de solución se encontró a los 17.8 °C, a las 14:00 hrs a 23 °C y a las 18:00 hrs a 21.7 °C, en este ensayo no hubo problemas con bajas o altas temperaturas, ya que la variación de dicho

parámetro fluctuó entre 17.8 °C y 23 °C como mínimas y máximas promedios, respectivamente. Por lo cual en el tiempo de desarrollo el ensayo no se observaron efectos negativos por parte de las plantas, eso nos indica que hubo una buena absorción de agua y nutrientes.

En este experimento los niveles de oxígeno estuvieron entre 9.7 y 8.6 mg/L, considerados adecuados para la especie. Estos resultados concuerdan con Catata (2015), quien explica que la lechuga es la que más tolera la falta de oxígeno, sin embargo, se recomienda que la solución mantenga una concentración de 4 a 8 mg/L.

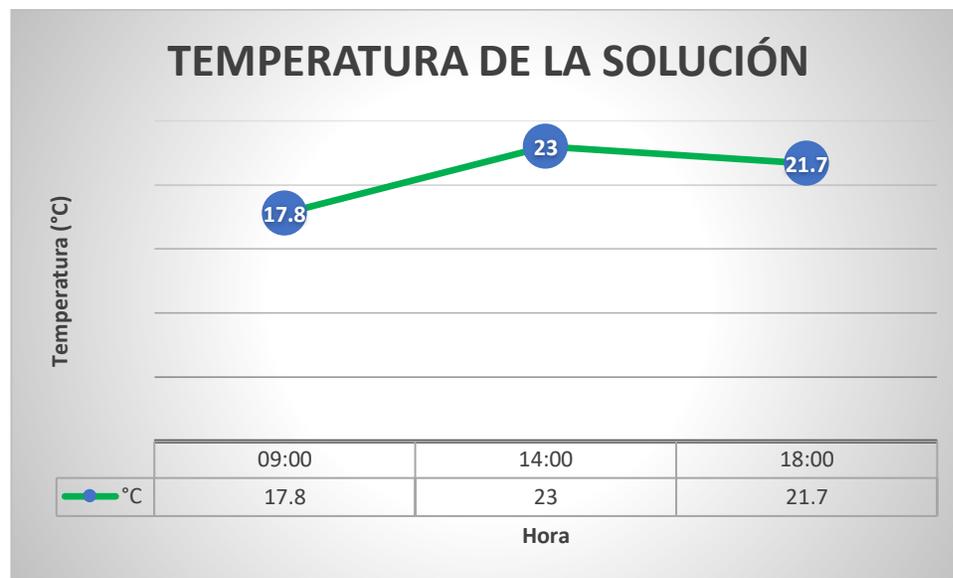


Figura 6. Temperatura de la solución nutritiva

La temperatura influye en la capacidad de absorción de agua y nutrientes. Cuando la temperatura es muy alta o baja provoca un decrecimiento de las raíces de las plantas, por encima de 30 °C y debajo de 12 °C la absorción de iones se ve muy limitada (Santos y Ríos, 2016).

Según Martínez et al. (2012), la temperatura afecta el balance de oxígeno de la solución nutritiva. Conforme se incrementa la temperatura, la cantidad de oxígeno del agua decae rápidamente. La falta de oxígeno reduce la permeabilidad de las raíces, provoca la muerte de microorganismos benéficos y hace más susceptibles a las plantas

a ataques de patógenos. La lechuga es considerada la especie más tolerante a la falta de oxígeno, siendo unos de los cultivos más recomendados para los sistemas hidropónicos. Los niveles adecuados de oxígeno disuelto se encuentran entre 3 a 4 ppm (Martínez et al., 2012).

Rodríguez (2018) menciona que, la oxigenación está relacionada con la temperatura de la solución. Para la mayoría de los cultivos bajo invernadero lo adecuado sería mantenerla cerca de los 22 °C para satisfacer la demanda de la planta.

La falta del O₂ induce a la fermentación de la solución y como resultado la pudrición de la raíz (Catata, 2015).

6.3 Variables agronómicas

6.3.1 Altura de planta (cm)

La tabla 9 se detallan los resultados del análisis de varianza para altura de planta por el efecto de tres alturas de suspensión en tres densidades de trasplante.

Tabla 9. Análisis de varianza para la variable altura de planta al 5%

F.V.	GL	SC	CM	Fcal	P-valor	Significancia
Alturas (A)	3	390.81	130.27	236.62	<0.0001	**
Error (A)	8	4.40	0.55	1.19	0.3651	
Densidades (B)	2	4.32	2.16	4.66	0.0254	*
Altura*Densidad	6	47.07	7.85	16.91	<0.0001	**
“EE” Error Experimental	16	7.42	0.46			
Total	35	454.04				

CV = 3.90 %

El coeficiente de variabilidad C.V. para la variable peso fresco fue de 3.90 % el mismo nos hace referencia a la confiabilidad de los datos de dicha variable, así mismo a la buena selección de muestras.

En el análisis de varianza presentado en la tabla 9, se observan los siguientes resultados:

El análisis de varianza indicó que existieron diferencias altamente significativas (**) del factor A alturas de suspensión para la variable altura de planta (cm) lo que indica que el comportamiento de las alturas de suspensión aplicadas en el experimento si inciden para esta variable de estudio. También se puede observar que el factor (B) densidades muestra diferencias significativas (*), es decir que las densidades utilizadas en la investigación si inciden en la altura de planta. El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que hay efectos altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención de altura de planta.

Tabla 10. Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de Suspensión

FACTOR “A” ALTURAS SUSPENSIÓN			
Altura Susp	Media (cm)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 (1 cm)	22.00	0.25	A
A0 (0 cm)	18.79	0.25	B
A2 (3 cm)	15.97	0.25	C
A3 (5 cm)	13.12	0.25	D

En los resultados del Test Tukey al 5% para alturas de suspensión (Tabla 10), nos demuestra que la altura de suspensión A1 (1 cm) presentó una mayor altura de planta con un promedio de 22.00 cm, lo que infiere que esta altura de suspensión presenta una mayor altura de planta en relación a la altura de suspensión A3 (5 cm) que presentó menor altura de planta con un promedio igual a 13.12 cm. El resto de los tratamientos se encuentran en el intermedio.

Tabla 11. Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades

FACTOR “B” DENSIDADES			
Densidades	Media (cm)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
B2 (20 cm)	17.77	0.20	A
B1 (15 cm)	17.66	0.20	A B
B3 (25 cm)	16.98	0.20	B

De acuerdo a la prueba de Tukey al 5% (Tabla11), para el factor “B” densidad de producción, se muestra que no existe mucha significancia ya que los valores oscilan entre 17.77 cm (B2) y 16.98 cm (B3), demostrando que la densidad no influye de gran manera respecto a la altura de planta.

Tabla 12. Interacción entre los factores para altura de planta

INTERACCIÓN FACTOR (A) * FACTOR (B)			
Altura*Densidad	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 * B2	23.83	0.39	A
A1 * B1	22.67	0.39	A
A0 * B1	20.10	0.39	B
A1 * B3	19.50	0.39	B C
A0 * B2	18.43	0.39	B C D
A0 * B3	17.83	0.39	C D E
A2 * B2	16.33	0.39	D E F
A2 * B3	15.83	0.39	E F
A2 * B1	15.73	0.39	E F
A3 * B3	14.77	0.39	F
A3 * B2	12.47	0.39	G
A3 * B1	12.13	0.39	G

El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que hay efectos altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención de altura de planta.

La interacción de altura de suspensión de 1 cm por densidad de 20 cm (A1*B2) fue la que obtuvo mayor altura de planta con 23.83 cm, esto nos dice que a una altura de 1 cm con una densidad de 20 cm hubo una buena absorción de agua y nutrientes lo cual facilitó el desarrollo de la planta. La que obtuvo menor altura de planta fue la altura de suspensión de 5 cm por densidad de 15 cm (A3*B1) con 12.13 cm, lo que indica que a una altura de 5 cm con densidad de 15 cm la raíz no absorbe el agua y los nutrientes de manera adecuada lo cual afectó al desarrollo de la planta.

Para el crecimiento y funcionamiento apropiado de las plantas, los niveles adecuados de oxígeno en la raíz son necesarios para su buen desarrollo, su deficiencia tiene efecto en la absorción de agua y de nutrientes, y el rendimiento de los cultivos son afectados (Urrestarazu y Mazuela, 2005).

6.3.2 Número de hojas por planta

En el cuadro 13 se detallan los resultados del análisis de varianza para peso fresco por el efecto de tres alturas de suspensión en tres densidades de trasplante.

Con el fin de evaluar de manera precisa la variable número de hojas por planta se realizó el respectivo análisis de varianza, previo al análisis de varianza se realizó transformación de los datos, ya que esta variable presenta datos discontinuos o discretos, siguiendo la metodología planteada anteriormente se presenta a continuación en el cuadro el respectivo análisis de varianza, para la variable número de hojas por planta.

Tabla 13. Análisis de varianza para la variable número de hojas al 5%

F.V.	GL	SC	CM	Fcal	P-valor	Significancia
Alturas (A)	3	7.49	2.50	204.20	<0.0001	**
Error (A)	8	0.10	0.01	0.71	0.6809	
Densidades (B)	2	0.18	0.09	5.32	0.0170	*
Altura*Densidad	6	0.12	0.02	1.15	0.3803	NS
“EE” Error Experimental	16	0.28	0.02			
Total	35	8.16				

CV = 3.11 %

El coeficiente de variabilidad C.V. para la variable peso fresco fue de 3.11 % el mismo nos hace referencia a la confiabilidad de los datos de dicha variable, así mismo a la buena selección de muestras.

En el análisis de varianza presentado en la tabla 13, se observan los siguientes resultados:

El análisis de varianza indicó que existieron diferencias altamente significativas (**) del factor A alturas de suspensión para la variable peso fresco (cm) lo que indica que el comportamiento de las alturas de suspensión aplicadas en el experimento si inciden para esta variable de estudio. También se puede observar que el factor (B) densidades muestra diferencias significativas (*), es decir que las densidades utilizadas en la investigación si inciden en el número de hojas por planta.

El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que no hay efectos significativos (NS), esto nos determina que ambos factores actúan independientemente uno del otro.

Se estima que pudo haber influenciado las características morfológicas y genética del cultivo de lechuga, ya que al haber utilizado una sola variedad son de una sola forma y consistencia.

Vega (2013) expresa que la diferencia en el número de hojas está determinada por la morfología y genética vegetal.

Tabla 14. Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de Suspensión

FACTOR “A” ALTURAS SUSPENSIÓN			
Altura Susp	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 (1 cm)	24.33	0.28	A
A0 (0 cm)	17.67	0.28	B
A2 (3 cm)	16.89	0.28	B
A3 (5 cm)	13.44	0.28	C

En los resultados del Test Tukey al 5% para alturas de suspensión (Tabla 14), nos demuestra que la altura de suspensión A1 (1 cm) presentó un mayor número de hojas con un promedio de 24.33, lo que infiere que esta altura de suspensión presenta un mayor número de hojas en relación a la altura de suspensión A3 (5 cm) que presentó un menor número de hojas con un promedio igual a 13.44. El resto de los tratamientos se encuentran en el intermedio.

Tabla 15. Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades

FACTOR “B” DENSIDADES			
Densidades	Media (cm)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
B2 (20 cm)	18.92	0.30	A
B1 (15 cm)	17.67	0.30	B
B3 (25 cm)	17.67	0.30	B

De acuerdo a la prueba de Tukey al 5%, para el factor “B” densidad de producción, se muestra que con la densidad B2 (20 cm) muestra mayor número de hojas, en comparación a B1 (15 cm) y B3 (25 cm), demostrando que la densidad no influye de gran manera en el número de hojas por planta.

Para Jackson citado por Fernández (2013) la falta de oxígeno si es severa habrá clorosis de las hojas (amarillamiento), abscisión prematura de hojas y flores. La hormona responsable del envejecimiento prematuro y abscisión de la hoja es el “ácido abscísico”, el cual se ha demostrado que está presente en grandes cantidades si la raíz está inundada.

6.3.3 Peso raíz (g)

En la tabla 16 se detallan los resultados del análisis de varianza para peso fresco por el efecto de tres alturas de suspensión en tres densidades de trasplante.

Tabla 16. Análisis de varianza para la variable peso de raíz al 5%

F.V.	GL	SC	CM	Fcal	P-valor	Significancia
Alturas (A)	3	1312.84	437.61	679.35	<0.0001	**
Error (A)	8	5.15	0.64	0.76	0.6409	
Densidades (B)	2	24.84	12.42	14.67	0.0002	**
Altura*Densidad	6	101.14	16.86	19.91	<0.0001	**
“EE” Error Experimental	16	13.55	0.85			
Total	35	1457.52				

CV = 4.87 %

El coeficiente de variabilidad C.V. para la variable peso fresco fue de 4.87 % el mismo nos hace referencia a la confiabilidad de los datos de dicha variable así mismo a la buena selección de muestras.

En el análisis de varianza presentado en la tabla 16, se observan los siguientes resultados:

El análisis de varianza indicó que existieron diferencias altamente significativas (**) del factor A alturas de suspensión para la variable peso de raíz (cm) lo que indica que el comportamiento de las alturas de suspensión aplicadas en el experimento si inciden para esta variable de estudio. También se puede observar que el factor (B) densidades muestra diferencias altamente significativas (**), es decir que las densidades utilizadas en la investigación si inciden en el peso de raíz.

El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que hay efectos altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención del peso de raíz.

Tabla 17. Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de Suspensión

FACTOR “A” ALTURAS SUSPENSIÓN			
Altura Susp	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 (1 cm)	26.92	0.27	A
A0 (0 cm)	19.94	0.27	B
A2 (3 cm)	18.74	0.27	B
A3 (5 cm)	9.93	0.27	C

En los resultados del Test Tukey al 5% para alturas de suspensión (Tabla 17), nos demuestra que la altura de suspensión A1 (1 cm) presentó un mayor peso de raíz con un promedio de 26.92 gr, lo que infiere que esta altura de suspensión presenta un mayor peso de raíz en relación a la altura de suspensión A3 (5 cm) que presentó menor peso de raíz con un promedio igual a 9.93 gr. El resto de los tratamientos se encuentran en el intermedio.

Tabla 18. Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades

FACTOR “B” DENSIDADES			
Densidades	Media (cm)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
B2 (20 cm)	20.06	0.27	A
B1 (15 cm)	18.37	0.27	B
B3 (25 cm)	18.23	0.27	B

De acuerdo a la prueba de Tukey al 5%, para el factor “B” densidad de producción, se muestra que con la densidad B2 (20 cm) muestra mayor ganancia de peso de raíz, en comparación a B1 (15 cm) y B3 (25 cm), demostrando que la densidad influye de manera significativa en la ganancia de peso de raíz.

Tabla 19. Interacción entre los factores para peso de raíz

INTERACCIÓN FACTOR (A) * FACTOR (B)			
Altura*Densidad	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 * B2	29.53	0.53	A
A1 * B3	26.90	0.53	A B
A1 * B1	24.33	0.53	B C
A0 * B1	22.67	0.53	C D
A0 * B2	20.97	0.53	D E
A2 * B3	20.17	0.53	D E
A2 * B2	19.07	0.53	E F
A2 * B1	17.00	0.53	F G
A0 * B3	16.20	0.53	G
A3 * B2	10.67	0.53	H
A3 * B3	9.67	0.53	H
A3 * B1	9.47	0.53	H

El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que hay efectos altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención del peso de raíz.

La interacción de altura de suspensión a 1 cm por densidad de 20 cm (A1*B2) fue la que obtuvo mayor peso de raíz con 29.53 gr, esto nos dice que a una altura de 1 cm con una densidad de 20 cm hubo una buena oxigenación en el área radicular de la planta. La que obtuvo menor peso de raíz fue la altura de suspensión de 5 cm por densidad de 15 cm (A3*B1) con 9.47 gr, lo que indica que a una altura de 5 cm con densidad de 15 cm la raíz estaba entre absorber agua y los nutrientes o marchitarse.

Cuando están bien oxigenadas las raíces son capaces de absorber más selectivamente los iones de la solución debido a que requieren energía metabólica para este proceso y la respiración aeróbica es un proceso esencial que produce la energía requerida para el crecimiento radicular (Jackson, citado por Fernández, 2013).

Si la aireación no es adecuada para un sistema radicular, gases tales como el etileno y dióxido de carbono que son productos de desecho producidos por las raíces no pueden difundirse y se acumulan en la zona radicular (Morgan, 2001).

Para Agricultura e Hidroponía, (2021) el oxígeno es esencial para el desarrollo de un sistema radicular saludable, tanto para la respiración aeróbica de las raíces como para mantener una comunidad de bacterias aeróbicas beneficiosas en la zona radicular.

El mismo autor indica, los niveles insuficientes de oxígeno en la raíz causarán raíces menos desarrolladas, absorción limitada de nutrientes y una mayor población de bacterias y hongos indeseables, todo lo cual resultará en estrés en las plantas.

6.3.4 Volumen raíz (cc)

En la tabla 20 se detallan los resultados del análisis de varianza para peso fresco por el efecto de tres alturas de suspensión en tres densidades de trasplante.

Tabla 20. Análisis de varianza para la variable volumen de raíz al 5%

F.V.	GL	SC	CM	Fcal	P-valor	Significancia
Alturas (A)	3	1334.97	444.99	131.31	<0.0001	**
Error (A)	8	27.11	3.39	4.21	0.0070	
Densidades (B)	2	14.00	7.00	8.69	0.0028	**
Altura*Densidad	6	195.78	32.63	40.51	<0.0001	**
“EE” Error Experimental	16	12.89	0.81			
Total	35	1584.75				

$$CV = 4.66 \%$$

El coeficiente de variabilidad C.V. para la variable peso fresco fue de 4.66 % el mismo nos hace referencia a la confiabilidad de los datos de dicha variable, así mismo al buen manejo de las unidades experimentales.

En el análisis de varianza presentado en la tabla 20, se observan los siguientes resultados:

El análisis de varianza indicó que existieron diferencias altamente significativas (**) del factor A alturas de suspensión para la variable volumen de raíz (ml) lo que indica que el comportamiento de las alturas de suspensión aplicadas en el experimento si inciden para esta variable de estudio. También se puede observar que el factor (B) densidades muestra diferencias altamente significativas (**), es decir que las densidades utilizadas en la investigación si inciden en el volumen de raíz.

El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que hay efectos altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención del volumen de raíz.

Tabla 21. Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de Suspensión

FACTOR “A” ALTURAS SUSPENSIÓN			
Altura Susp	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 (1 cm)	28.00	0.61	A
A0 (0 cm)	20.00	0.61	B
A2 (3 cm)	18.11	0.61	B
A3 (5 cm)	10.89	0.61	C

En los resultados del Test Tukey al 5% para alturas de suspensión (Tabla 21), nos demuestra que la altura de suspensión A1 (1 cm) presentó un mayor volumen de raíz con un promedio de 28.00 ml, lo que infiere que esta altura de suspensión presenta un mayor volumen de raíz en relación a la altura de suspensión A3 (5 cm) que presentó menor volumen de raíz con un promedio igual a 10.89 ml. El resto de los tratamientos se encuentran en el intermedio.

Tabla 22. Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades

FACTOR “B” DENSIDADES			
Densidades	Media (cm)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
B2 (20 cm)	20.08	0.26	A
B1 (15 cm)	19.08	0.26	B
B3 (25 cm)	18.58	0.26	B

De acuerdo a la prueba de Tukey al 5%, para el factor “B” densidad de producción, se muestra que con la densidad B2 (20 cm) muestra mayor volumen de raíz, en comparación a B1 (15 cm) y B3 (25 cm), demostrando que la densidad influye de manera significativa en el volumen de raíz.

Tabla 23. Interacción entre los factores para volumen de raíz

INTERACCIÓN FACTOR (A) * FACTOR (B)			
Altura*Densidad	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 * B2	34.00	0.52	A
A1 * B1	26.33	0.52	B
A1 * B3	23.67	0.52	B C
A0 * B3	21.67	0.52	C D
A0 * B1	20.67	0.52	D
A2 * B3	19.33	0.52	D E
A2 * B2	17.67	0.52	E
A0 * B2	17.67	0.52	E
A2 * B1	17.33	0.52	E
A3 * B3	11.67	0.52	F
A3 * B2	11.00	0.52	F
A3 * B1	10.00	0.52	F

El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que hay efectos altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención del volumen de raíz.

La interacción de altura de suspensión a 1 cm por densidad de 20 cm (A1*B2) fue la que obtuvo mayor volumen de raíz con 34 cc, esto nos dice que, a una altura de 1 cm con una densidad de 20 cm, la raíz puede absorber agua y nutrientes. La que obtuvo menor volumen de raíz fue la altura de suspensión a 5 cm por densidad de 15 cm (A3*B1) con 10 cc, lo que indica que a una altura de 5 cm con densidad de 15 cm la raíz estaba entre absorber agua y los nutrientes o marchitarse.

De acuerdo a Resh (2001) indica que cuando hay un buen suministro de nutrientes las raíces tienden a ser cortas o están en relación con el área foliar, aunque también una fuerte radiación también provoca una disminución del tamaño de raíces.

Cuando están bien oxigenadas las raíces son capaces de absorber más selectivamente los iones de la solución debido a que requieren energía metabólica para este proceso y la respiración aeróbica es un proceso esencial que produce la energía requerida para el crecimiento radicular (Jackson, citado por Fernández, 2013).

Las plantas producen más masa radicular cuando comparten el espacio de enraizamiento con un vecino, en comparación con plantas que crecen solas (Resh, 2001).

6.4 Variables de rendimiento

6.4.1 Peso fresco (g)

En la Tabla 24 se detallan los resultados del análisis de varianza para peso fresco por el efecto de tres alturas de suspensión en tres densidades de trasplante.

Tabla 24. Análisis de varianza para la variable peso fresco al 5%

F.V.	GL	SC	CM	Fcal	P-valor	Significancia
Alturas (A)	3	51954.09	17318.03	558.07	<0.0001	**
Error (A)	8	248.26	31.03	1.14	0.3902	
Densidades (B)	2	2490.11	1245.05	45.71	<0.0001	**
Altura*Densidad	6	3215.47	535.91	19.68	<0.0001	**
“EE” Error Experimental	16	435.76	27.24			
Total	35	58343.69				

CV = 8.02 %

El coeficiente de variabilidad C.V. para la variable peso fresco fue de 8.02 % el mismo nos hace referencia a la confiabilidad de los datos de dicha variable, así mismo a la buena selección de muestras.

En el análisis de varianza presentado en la tabla 24, se observan los siguientes resultados:

El análisis de varianza indicó que existieron diferencias altamente significativas (**) del factor (A) alturas de suspensión para la variable peso fresco (g) lo que indica que el comportamiento de las alturas de suspensión aplicadas en el experimento si inciden para esta variable de estudio. También se puede observar que el factor (B) densidades muestra de igual manera diferencias altamente significativas (**), es decir que las densidades utilizadas en la investigación si inciden en el peso fresco. El resultado de la interacción de los dos factores (alturas*densidades), el análisis de varianza, indica que hay efectos altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención del peso fresco.

Tabla 25. Test Tukey al 5% para el Factor “A” Alturas de Suspensión

FACTOR “A” ALTURAS SUSPENSIÓN			
Altura Susp	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 (1 cm)	123.81	1.86	A
A0 (0 cm)	65.26	1.86	B
A2 (3 cm)	52.64	1.86	C
A3 (5 cm)	18.51	1.86	D

En los resultados del Test Tukey al 5% para alturas de suspensión (Tabla 25), nos demuestra que la altura de suspensión A1 (1 cm) presentó un mayor peso fresco con un promedio de 123.81 g, lo que infiere que esta altura de suspensión presenta un mayor peso fresco en relación a la altura de suspensión A3 (5 cm) que presentó menor peso fresco con un promedio igual a 18.51 g. El resto de los tratamientos se encuentran en el intermedio.

Tabla 26. Test Tukey al 5% para el Factor “B” Densidades

FACTOR “B” DENSIDADES			
Densidades	Media (cm)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
B2 (20 cm)	76.82	1.51	A
B1 (15 cm)	59.28	1.51	B
B3 (25 cm)	59.07	1.51	B

De acuerdo a la prueba de Tukey al 5% (tabla 11), para el factor “B” densidad de producción, se muestra que con la densidad B2 (20 cm) muestra mayor ganancia de peso fresco, en comparación a B1 (15 cm) y B3 (25 cm), demostrando que la densidad influye de manera significativa en la ganancia de peso de una planta.

Tabla 27. Interacción entre los factores para peso fresco

INTERACCIÓN FACTOR (A) * FACTOR (B)			
Altura*Densidad	Media (gr)	E.E.	Tukey $\alpha=5\%$
A1 * B2	157.77	3.01	A
A1 * B1	111.07	3.01	B
A1 * B3	102.60	3.01	B
A0 * B2	66.10	3.01	C
A0 * B1	65.20	3.01	C
A0 * B3	64.47	3.01	C
A2 * B2	59.57	3.01	C D
A2 * B3	52.20	3.01	C D
A2 * B1	46.17	3.01	D
A3 * B2	23.83	3.01	E
A3 * B3	17.00	3.01	E
A3 * B1	14.70	3.01	E

El resultado de la interacción del factor A alturas de suspensión (parcela mayor) y el factor B densidades (parcela menor), el análisis de varianza, indica que hay efectos

altamente significativos (**), entonces la acción conjunta factor A y factor B, si incide en la obtención del peso fresco.

La interacción de altura de suspensión a 1 cm por densidad de 20 cm (A1*B2) fue la que obtuvo mayor peso fresco con 157.77 g, esto nos dice que a una altura de 1 cm con una densidad de 20 cm hubo una buena absorción de agua y nutrientes lo cual facilito el desarrollo de la planta. La que obtuvo el menor peso fresco fue la interacción de altura de suspensión a 5 cm por densidad de 15 cm (A3*B1) con 14.7 gr, lo que indica que a una altura de 5 cm con densidad de 15 cm la raíz no absorbe el agua y los nutrientes de manera adecuada lo cual afecto al desarrollo de la planta.

La falta de oxígeno reduce la permeabilidad de las raíces al agua y habrá una acumulación de toxinas; así el agua y los minerales no pueden ser absorbidos en cantidades suficientes para el crecimiento bajo condiciones de estrés. Este marchitamiento está acompañado por una disminución en la fotosíntesis y transferencia de carbohidratos; por lo tanto, el crecimiento de la planta es reducido y el rendimiento se verá afectado (Morgan, 2001).

La disminución o la falta de oxígeno en la zona radicular puede llegar a provocar hipoxia y producir daños en la planta disminuyendo y retardando su crecimiento y ganancia de peso (Zheng *et al.*, 2007)

Rodríguez (2018) reportó peso fresco superior con 230 g planta en el sistema raíz flotante con plantas de color y tamaño uniforme debido a su distribución horizontal y distanciamiento de 20 cm entre plantas.

6.5 Variables económicas

A partir de los resultados obtenidos en el proceso de la experimentación y el respectivo análisis estadístico, es esencial la realización del análisis económico de los resultados para realizar recomendaciones más adecuadas, combinados los aspectos agronómicos y económicos más favorables de la investigación.

La evaluación económica nos permite proporcionar parámetros claros para determinar la rentabilidad del cultivo hidropónico de lechuga en RF, para realizar un cambio tecnológico en nuestro sistema de producción.

6.5.1 Rendimiento ajustado

Realizando el cálculo de lechugas hidropónicas por metro cuadrado (Lechugas hidropónicas/m²), se tiene 22 plantas/m² en una densidad de 15 cm, 18 plantas/m² en una densidad de 20 cm y 14 plantas/m² en una densidad de 25 cm.

Tabla 28. Rendimiento ajustado

TRAT	RENDIMIENTO PROMEDIO (Kg/m ²)	RENDIMIENTO AJUSTADO (-10%)
T 1	1.43	1.29
T 2	1.19	1.07
T 3	0.90	0.81
T 4	2.44	2.20
T 5	2.84	2.56
T 6	1.44	1.29
T 7	1.02	0.91
T 8	1.07	0.96
T 9	0.73	0.66
T 10	0.21	0.19
T 11	0.43	0.39
T 12	0.37	0.34

En este caso se tomó la recomendación del manual de Evaluación Económica del centro internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), donde se establece una diferencia de 10% del rendimiento entre condiciones experimentales y de producción comercial normal, Este descuento se justifica desde el punto de vista que durante la realización del experimento se tuvo una especial atención y cuidado con las parcelas experimentales, lo que no ocurre normalmente en una producción a gran escala.

6.5.2 Número de campañas por año

Tomando en cuenta que la utilización del terreno, para situar el sistema hidropónico RF, para que la producción de lechugas en ambientes atemperados sea intensiva, la reducción del ciclo de producción, en el uso del mismo, puede reportar mayor número de cosechas al año, por lo tanto, una mayor producción.

Otro factor determinante es el tiempo de desarrollo hasta la cosecha, en épocas de invierno retardan el crecimiento del cultivo. En el presente estudio tardo 70 días, con una diferencia muy grande, puesto que las plantas solo permanecieron 10 días en el área de germinación, 20 días en el área de crecimiento inicial o primario y 40 días en el área de crecimiento final. Esto nos lleva a calcular nueve campañas por año.

6.5.3 Beneficio bruto

El beneficio bruto se calcula multiplicando el rendimiento ajustado en 1.000 m² del ambiente atemperado, por el precio promedio de kilogramo de lechuga hidropónica, para el cálculo de beneficio bruto anual se multiplicó el beneficio bruto de una campaña, por el número de campañas al año.

Tabla 29. Beneficio bruto anual

Trat	Rendimiento promedio (kg/m ²)	Rendimiento ajustado (-10%)	Precio (bs/kg)	Beneficio bruto (bs/m ²)	N° de campañas año	Beneficio bruto año (bs/m ²)	Beneficio bruto año (18 m ²)
T 1	1.43	1.29	10	15.5	9	139.4	2508.9
T 2	1.19	1.07	10	12.9	9	115.7	2082.0
T 3	0.90	0.81	10	9.8	9	87.8	1579.9
T 4	2.44	2.20	10	26.4	9	237.6	4276.0
T 5	2.84	2.56	10	30.7	9	276.0	4968.9
T 6	1.44	1.29	10	15.5	9	139.6	2512.4
T 7	1.02	0.91	10	11.0	9	98.8	1777.6
T 8	1.07	0.96	10	11.6	9	104.2	1875.6
T 9	0.73	0.66	10	7.9	9	71.1	1279.0
T 10	0.21	0.19	10	2.2	9	20.0	360.4
T 11	0.43	0.39	10	4.6	9	41.7	750.6
T 12	0.37	0.34	10	4.0	9	36.4	654.4

Según la tabla 29, las alturas de suspensión que presentaron mejores ingresos brutos por año en diferentes densidades de trasplante, son los tratamientos T5 y T4 con 276 y 237.6 Bs/año/m² y T10 fue la que obtuvo el menor ingreso bruto por año con 20 Bs/año/m².

6.5.4 Costos variables

Los costos variables son los costos relacionados con los insumos comprados, la mano de obra utilizada para las actividades productivas que varían entre tratamientos.

Tabla 30. Costos variables

Trat	Insumos (m ²)	Mano de obra	Total, costos campaña	N° campañas año	Total, costos variables año	Total, costos variables (Bs/Año/18m ²)
T 1	21.5	34.5	56	9	112.0	2016.0
T 2	26.3	34.5	60.8	9	121.6	2188.8
T 3	16.7	34.5	51.2	9	102.4	1843.2
T 4	21.5	34.5	56	9	112.0	2016.0
T 5	26.3	34.5	60.8	9	121.6	2188.8
T 6	16.7	34.5	51.2	9	102.4	1843.2
T 7	21.5	34.5	51.2	9	112.0	2016.0
T 8	16.3	34.5	60.8	9	101.6	1828.8
T 9	26.3	34.5	56	9	121.6	2188.8
T 10	16.7	34.5	51.2	9	102.4	1843.2
T 11	26.3	34.5	60.8	9	121.6	2188.8
T 12	21.5	34.5	56	9	112.0	2016.0

Según los costos variables los tratamientos que corresponden a la densidad B1 = 15 cm son los que presentan los costos más altos debido a que requiere mayor mano de obra al momento del trasplante inicial, puesto que son los tratamientos que cuentan con mayor número de plantas y al ser mano de obra calificada para que no dañen las raíces al momento de trasplantarlas.

6.5.5 Costos fijos

Los costos fijos son aquellos costos que se mantienen para cada campaña de producción y que no están relacionados con la producción final. Para este trabajo se han tomado en cuenta los costos de la infraestructura, instalación de sistema hidropónico recirculante, bomba eléctrica, herramientas, temporizadores y otros gastos. Los costos fijos de la infraestructura del ambiente atemperado, instalación de sistema hidropónico RF, se han calculado por año.

Tabla 31. Costos fijos (Bs/año)

Trat	Alquiler invernadero y sistema RF (Mes/m ² /Bs)	Luz (Mes/Bs)	Agua (Mes/Bs)	Alquiler almacigo (Mes/BS)	Sales nutritivas	Total, CF (Bs/Año)
T 1	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 2	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 3	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 4	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 5	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 6	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 7	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 8	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 9	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 10	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 11	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25
T 12	2.1	4.54	3.12	0.6	5.89	16.25

En el análisis económico de costos parciales se consideró el cálculo de beneficio neto y la tasa de retorno marginal, sobre la base de los rendimientos y costos obtenidos por tratamiento.

6.5.6 Costos totales

Los costos totales se consideran la suma de los costos variables, los costos fijos y la adición de los imprevistos (+10%), dando así el total de gastos realizados.

Tabla 32. Costos totales

Trat	Costo Fijo	Costo Variable	Imprevisto	Total
T 1	16.25	2016.0	1.21	2033.46
T 2	16.25	2188.8	1.21	2206.26
T 3	16.25	1843.2	1.21	1860.66
T 4	16.25	2016.0	1.21	2033.46
T 5	16.25	2188.8	1.21	2206.26
T 6	16.25	1843.2	1.21	1860.66
T 7	16.25	2016.0	1.21	2033.46
T 8	16.25	1828.8	1.21	1846.26
T 9	16.25	2188.8	1.21	2206.26
T 10	16.25	1843.2	1.21	1860.66
T 11	16.25	2188.8	1.21	2206.26
T 12	16.25	2016.0	1.21	2033.46

En la (tabla 32) se observa claramente que los costos de los tratamientos con una densidad de 15 cm son los que presentan los valores más altos. Esto se debió a que hay mayor número de plantas.

6.5.7 Beneficio neto

Los beneficios netos nos reflejan ingresos obtenidos luego de restar los costos totales. A continuación, en la tabla 33, se detallan los beneficios netos anuales.

Tabla 33. Beneficio neto

Trat	Beneficio bruto	Costos totales	Beneficio neto
T 1	2508.9	2033.46	475.5
T 2	2082.0	2206.26	-124.2
T 3	1579.9	1860.66	-280.8
T 4	4276.0	2033.46	2242.6
T 5	4968.9	2206.26	2762.6
T 6	2512.4	1860.66	651.8
T 7	1777.6	2033.46	-255.9
T 8	1875.6	1846.26	29.3
T 9	1279.0	2206.26	-927.3
T 10	360.4	1860.66	-1500.2
T 11	750.6	2206.26	-1455.7
T 12	654.4	2033.46	-1379.1

Realizando un análisis entre las alturas de suspensión y densidades podemos indicar los siguientes resultados. El T5 fue el que obtuvo un mayor beneficio neto con 2762.6 Bs/Año seguido de T4 con 2242.6 Bs/Año y T6 con 651.8 Bs/Año, los demás tratamientos se pueden observar que su beneficio neto es menor e incluso de la mayoría es negativo.

6.5.8 Relación Beneficio / Costo

En el (Tabla 34), se denotan los resultados del beneficio total por cada tratamiento estimados en un metro cuadrado para la relación beneficio / costo.

Tabla 34. Relación Beneficio / Costo

Trat	Beneficio Neto	Total, Costos	Beneficio Costo
T 1	475.5	2033.5	0.23
T 2	-124.2	2206.1	-0.06
T 3	-280.8	1860.7	-0.15
T 4	2242.6	2033.5	1.30
T 5	2762.6	2206.3	1.55
T 6	651.8	1860.7	0.35
T 7	-255.9	1860.7	-0.14
T 8	29.3	2206.3	0.01
T 9	-927.3	2033.5	-0.46
T 10	-1500.2	1860.7	-0.81
T 11	-1455.7	2206.3	-0.66
T 12	-1379.1	2033.5	-0.68

Realizado el análisis de relación de beneficio/costo, en base a los costos fijos y variables de producción por año y por tratamientos.

Dicho análisis demuestra que; la relación Beneficio/costo es mayor para el T5 (altura de suspensión de 1cm por densidad de 20 cm) con 1.55, seguido de T4 (altura de suspensión de 1 cm por densidad de 15 cm) con 1.30 ($B/C > 1$), en consecuencia, estos dos tratamientos son económicamente rentable.

7 CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos específicos, los resultados obtenidos de las variables de respuesta en la presente investigación, se tiene las siguientes conclusiones

- Para el factor A (altura de suspensión), se demostró altamente significativo lo cual nos indica que las alturas de suspensión tienen influencia en la aireación radicular, ya que la mayor cantidad del volumen radicular esta sumergida así las plantas puedan absorber agua y nutrientes de manera adecuada, la altura de suspensión A1 (1 cm) es la que mejor resultados nos dió, en cambio la altura de suspensión A3 (5 cm) fue la que presentó menos eficiente en la presente investigación.

- También para el factor B (densidades de trasplante), se mostró significativo, lo cual indica que el área foliar también está muy influenciada por la distancia entre plantas que permite una mayor recepción de la luz.

Esto porque la luz en las diferentes etapas de crecimiento de una planta juega un rol importante, las plantas aumentan de tamaño y peso al tener todas las condiciones para su crecimiento, según aumenta el índice de área foliar, aumenta la eficiencia de la interceptación de la radiación hasta llegar a un valor máximo.

- Para la variable peso fresco, se nota claramente la influencia de la altura de suspensión factor A del estudio y la densidad de trasplante factor B, la altura de suspensión de 1 cm por densidad de 20 cm (A1*B2) tiene el mejor promedio 157.77 gr en comparación a la altura de suspensión a 5 cm por densidad de 15 cm (A3*B1) con 14.7 gr, esto porque para un desarrollo óptimo de la planta donde todos los requerimientos nutricionales están adecuadamente proporcionados, debido a una buena absorción de agua y nutrientes así también como de luz, por la adecuada distancia entre plantas es fundamental en la producción para el proceso de formación de materia verde por la fotosíntesis, la energía lumínica se transforma en energía química.

- En la variable de respuesta número de hojas por planta, no se obtuvo ninguna significancia en el análisis de varianza (ANVA), por lo cual se concluye que las alturas de suspensión y la densidad no influyeron significativamente en la ganancia de número de hojas de la variedad White Boston, el número de hojas promedio fue, casi igual para cada tratamiento.

Es decir, la ganancia de hojas en este estudio se atribuye o está muy relacionada con la nutrición y las características heredadas del cultivo, donde no influyen tanto la altura de suspensión y la distancia.

- En la variable volumen radicular, se muestra que la altura de suspensión a 1 cm por densidad de 20 cm (A1*B") obtuvo mayor volumen con 34 cc en comparación a la altura de suspensión de 5 cm por densidad de 15 cm (A3*B1) que presento

10 cc, esto porque el incremento radicular está directamente relacionado al crecimiento foliar de una planta, aunque el incremento radicular de las plantas está estrechamente relacionado al crecimiento en altura del área foliar, también influye la composición adecuada de nutrientes en la solución, aunque en fuertes deficiencias la raíz incrementa de tamaño para buscar nutrientes que le permitan seguir con su ciclo de vida.

- En las variables económicas, se obtuvo una relación beneficio/costo de 1.55 en el T5 (altura de suspensión de 1 cm por densidad de 20 cm) y 1.30 en el T4 (altura de suspensión de 1 cm por densidad de 15 cm), lo cual indica que el experimento fue rentable en el tiempo de evaluación, sin embargo, en los demás tratamientos la relación beneficio/costo fue menor a 1 lo que indica que no fueron rentables desde el punto de vista económico.

8 RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación se sugiere realizar las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda realizar la producción de lechuga en sistema RF a una altura de suspensión de 1 cm con una densidad de trasplante de 20 cm, ya que estos dos factores juntos son adecuados para que la planta pueda desarrollarse de manera normal.
- Se recomienda realizar una estructura adecuada para la suspensión de altura, ya que en la investigación realizada se tuvo dificultades al momento de realizar el cambio de solución.
- Se recomienda realizar la investigación con diferentes cultivos de hoja para evitar el uso de oxigenadores y así poder ahorrar energía adicional.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Alpizar, (2010). Producción del cultivo de lechuga y el manejo adecuado de la misma. Estados Unidos – Japón – China. p. 296
- Arteaga, J. (2016). Métodos estadísticos para la investigación. 78pp.
- Aruquipa, R (2008). Producción de cuatro variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo dos sustratos (sólido y líquido) en el municipio del alto. Tesis de Grado. UMSA. Facultad de Agronomía. La Paz – Bolivia.
- Baixauli, C; Aguilar, J. (2002). Cultivo sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias. Generalitat Valencia. Conserjería de agricultura pesca y alimentación. Valencia, España. 110 p.
- Bugarín, M; Baca, C; Martínez, H; Tirado, T; Martínez, H; Tirado, T; Martínez, G. (2003). Amonio/nitrato y concentración iónica total de la solución nutritiva en crisantemo. Crecimiento y floración. Terra. 124 p.
- Bautista, M. (2000). Evaluación del rendimiento de cuatro variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en cultivo hidropónico, utilizando como sustrato arena y cascara de arroz (en línea). Tesis Ing. Agr. San Carlos, Guatemala, Universidad de San Carlos Guatemala. Facultad de Agronomía. Consultado 18 enero 2022. 71 p. Disponible en <http://fausac.usac.edu.gt/tesario/tesis/T-018339.pdf>.
- Cabezas, R. (2017). Hidroponía: una guía para aprender de manera rápida. 1 ed. Cochabamba, Bolivia, s. e. 103 p.
- Callisaya, P. C. (2016). Evaluación de dos variedades de acelga (*Beta vulgaris* var. cicla L), bajo tres niveles de fertilizante foliar orgánico en sistema hidropónico NFT, en Cota Cota. (Tesis de licenciatura). UMSA, La Paz.
- Castañeda, F., Marulanda, C., Camey, C. & Mejía, L. (2010). Manual técnico hidroponía popular (cultivo sin tierra). Tercera edición. Guatemala. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá.

- Carrasco, G.; Izquierdo, J., 1996. Manuel Técnico. La Empresa Hidropónica de Mediana Escala: Sistema hidropónico recirculante. La Técnica de la Solución Nutritiva Recirculante (NFT). Talca. pp. 62.
- Catata, L. (2015) Tres Variedades de Lechuga (*Lactuca sativa* L.) y Dos Soluciones Nutritivas en Cultivo Hidropónico, en Sistema NFT Tipo Piramidal, bajo Condiciones de Invernadero en Arequipa. Tesis. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Perú. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/384/M21592.pdf?sequence=1>. Consultado: 08/09/2022.
- Chang, M; Hoyos, M; Rodríguez, A. (2000). Manual práctico de hidroponía: sistema de raíz flotante y sistema de sustrato sólido. Perú, s.e. 42 p.
- CHAVEZ Y MEDINA, (2013). Morfología de cultivos, capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos. p 8 – 12.
- COLINAGRO (inteligencias en agro producción), (2008). Monografías del cultivo de lechuga. Bogotá DC. 37 p.
- DAVIS et al, (2002). Cultivo de lechuga cultivada en la antigua Roma. Córdoba p. 134
- DIRECCIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (DICTA), (2002). Innovación tecnológica. Guía de producción de lechuga: Sistema raíz flotante. Disponible en <http://www.sag.gob.hn/dicta/Paginas/lechuga_hidroponica.html>. (9 enero. 2023).
- ENCICLOPEDIA BOLIVIA AGROPECUARIA (2010). Tomo II. Agricultura, forestación, peces, pecuaria y áreas protegidas. 376 p.
- Estrada, J. (2009). Microhuertas, fuentes de nutrición y recursos económicos. Evaluación final del proyecto “Microhuertas Populares” de Asociación CUNA. La Paz, Bolivia. (Diapositivas). 49 diapositivas, son. + 1 Flash Memory de 4G. (30 minutos), color.
- FAO, (2005). Producción de hortalizas. La Paz-Bolivia.

FAO, (2011). Cultivos hidropónicos, formulación de soluciones nutritivas, p. 325

FAO, (2014). Anuario estadístico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura en América Latina y el Caribe. Vol. 1, No 4, pp. 107-108.

Fernández, M. (2013). Efecto de diferentes niveles de aireación de la solución nutritiva sobre el crecimiento y la calidad de canónigos y berros cultivados en bandejas flotantes. Tesis. Universidad Politécnica de Cartagena.

Flores, A. (2009). Horticultura. Huertos escolares para la seguridad alimentaria. Módulo II. Caranavi-Bolivia. 28 - 32 p.

Flores, J. (2005). Carpas Solares. Técnicas de Construcción. Editorial Huellas La Paz, Bolivia. 10-28 p.

García, V. (1996), Efecto de seis épocas de deshierbe manual y uso de herbicidas en el cultivo de lechuga en carpa solar, Pp. 89.

Gilsanz, J. (2007). Hidroponía. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Montevideo, Uruguay: Unidad de Comunicación - Transferencia Tecnológica. pp. 31.

Gutiérrez, H., Hernández, V. y Silvano, A. (2009). Manual de cultivo moderno. En f. Mainard, hortalizas de hoja, flor y tallo. (págs. 62-65). Barcelona: de vecchi s.a.

Guzmán, G. (2004). Hidroponía en Casa: Una Actividad Familiar. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Sistema Unificado de Información Institucional. 25 p.

Guzmán, G. (2004). Hidroponía en Casa: Una Actividad Familiar. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, C. R. 10 p.

Hartmann, F. (1990). Invernaderos y ambientes atemperados. FADES. La Paz - Bolivia, p: 30,38 – 90.

- Hidroponía, (2016). La hidroponía: Cultivos sin suelos. Visitado el 3 de febrero del 2023. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/la-hidroponia-cultivos-sin-suelo>
- Holsouet, P.; Miñambres, M., 2005. La Lechuga. Manual Para su Cultivo en Agricultura Ecológica.
- IBISWORLD (2016) Hydroponic Crop Farming: Market Research Report. IBISWorld Industry Research División. Estados Unidos de América. Disponible en: <https://www.ibisworld.com/industry-trends/specialized-market-researchreports/life-sciences/food-science/hydroponic-crop-farming.html>. Consultado: 07/06/2022.
- INFOAGRO, 2014. Cultivo de la Lechuga. Disponible en: http://www.infoagro/lechuga_hidroponica.html. (20 de diciembre. 2022).
- INIA (2011). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Revista Tierra Adentro. Edición Nº 095. Especial INIA y los alimentos (en línea). Santiago, Chile: Tierra Adentro Nº 95. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68394> (Consultado: 28 de agosto 2022).
- INTIPAMPA, A. (2014). Evaluación del comportamiento agronómico de tres cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en dos comunidades del municipio de Caranavi de La Paz. Tesis de Grado. UMSA. Facultad de Agronomía. La Paz – Bolivia.
- INTAGRI (S/F) Importancia de la radiación solar en la producción bajo invernadero. Instituto para la innovación tecnológica en la agricultura. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/importancia-de-la-radiacion-solar-en-la-produccion-bajo-invernadero>. Consultado: 24/01/2021.
- KROSSAGRO, (2021). Cómo se airea la hidroponía, las 5 mejores formas. Disponible en <https://krosagro.com/es/tuneles-de-plastico/como-se-airea-la-hidroponia-las-5-mejores-formas/>. Consultado el 30 de enero de 2022.

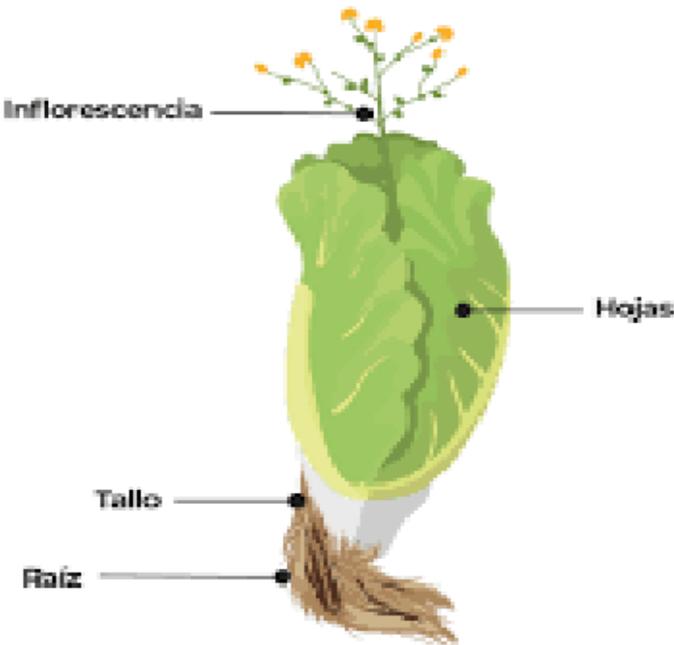
- LEXUS, (2010). Cultivo Ecológico de Hortalizas/Hogares Juveniles Campesinos. Bogotá-Colombia. 175 p.
- Lira, R. (2004). Fisiología Vegetal. 1ra Edición. Ed. Trillas. Distrito federal. 237 p.
- Lizarro, W. G. (2009). Apuntes de Botánica Sistemática y Catalogo de Plantas. Facultad de Agronomía. La Paz- Bolivia.
- Marfa, O., Guri, S. (2001). Efecto de la Aplicación de Oxígeno en el agua de Riego en
- Martínez, G., Ortiz, Y., López, R. (2012). Oxigenación de la solución nutritiva recirculante y su efecto en Tomate y Lechuga. Rev. Fitotec. Mex.Vol. 35, No. 5, p 49-52.
- Maralanda, C. (2003). Hidroponía Familiar en Colombia desde el Eje Cafetalero. Editorial Optigraf, América - Colombia. Pp. 52 - 55.
- Michelena, V. (2003). Manual de Micro Huertas en Venezuela. Caracas - Venezuela.
- Moreno, A. (2014). Guía de cultivos para huertos urbanos. Cultivos hortícolas. Primera edición, Provincia de Valencia: Servicios de Medio Ambiente.
- Morgan, L. (2021). Nutrient temperature, Oxygen and Pythium in Hydroponics. (en línea). Consultado 2 diciembre 2022. Disponible en: http://www.hydomall.com/grower/pythium_in_hydroponics.html
- Murillo, W. (2010). Optimización de la producción de tres especies de hortalizas bajo producción hidropónica en el sistema NFT en los invernaderos “La Huerta” en la localidad de Chicani (La Paz). Bolivia: pp. 105.
- Ninancuro, A. (2007). Producción de planta y establecimiento de plantaciones de teca en el estado de tabasco. pp 23-29.
- Osorio y Lobo, (2009). Cultivo de lechuga, manejo y su adaptación a distintos tipos de suelo. Lima – Perú p. 387

- Pacheco, B. (2020). Efecto de la frecuencia de irrigación hidropónica NFT en dos variedades de acelga (*beta vulgaras var. cicla l.*) en el Centro Experimental de Cota Cota. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés.
- Pizarro et al. (2019). Efecto de soluciones nutritivas en 2 variedades de apio (*apium graveolens*) sembrado. 46-62.
- Quispe L. (2015). Evaluación de seis variedades de lechuga, (*lactuca sativa l.*) cultivadas con el sistema hidropónico recirculante NFT en el centro experimental de cota cota. Tesis de grado. UMSA. Facultad de Agronomía. La Paz- Bolivia.
- Resh, H. (2001). Cultivos Hidropónicos, Nuevas Técnicas de Producción. Barcelona, España: Mundi – Prensa. pp. 509.
- Rodríguez, A., Hoyos, M. y Chang, M. (2001). Soluciones nutritivas en hidroponía, formulación y preparación. Universidad Agraria La Molina. Centro de Investigación de Hidroponía e Investigación Mineral. Lima, Perú. 42 p.
- Rodríguez, D. C. (2018). Comparación de dos técnicas hidropónicas, flujo laminar de nutrientes y raíz flotante para la producción de lechuga (*Lactuca sativa L.*) en el centro experimental de Cota. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés.
- Saavedra, D. (2017). Cultivo de lechuga. INIA La Platina. Pauta de Chequeo No 9. INDAP Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile.
- Sánchez, C. (2005). Producción de Lechugas. Ed. Ripalme. Lima-Perú. 135 p.
- Sánchez, K. (2022). Efecto de la aplicación de tres niveles de citoquinina en el desarrollo y rendimiento productivo del cultivo hidropónico de berro (*nasturtium officinale*) en el Centro Experimental de Cota Cota. Tesis. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés.

- Santos, B. and Ríos, D. (2016). Cálculos de soluciones nutritivas. En suelos y sin suelo. Primera edición: Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo Insular de Tenerife. Chile.
- Solorzano, J. and Bastidas, G. (2014). Huertos hidropónicos como una alternativa de producción de hortalizas vegetales en las escuelas. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). Vol. 3. No 22, pp. (21-23).
- Torres., C (2018). Análisis comparativo de costos de inversión de sistemas hidropónicos. Tesis. Facultad de ciencias agrarias. Ecuador. Disponible en: <http://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/2249/>. Consultado: 23/12/2021.
- Urey, G. (2007). Evaluación de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.), en el sistema hidroponico recirculante "NFT". Universidad Mayor de San Simón, Facultad Ciencias Agrícolas y Pecuarias "Dr. Martin Cardenas". Cochabamba, Bolivia: pp. 75
- Valdez, F. E. (2008). Efecto de fertirrigación en el comportamiento agronómico de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo ambiente atemperado en la 88 localidad de Viacha. Tesis de Grado. UMSA. Facultad de Agronomía. La Paz – Bolivia.
- Zheng, Y., Wang, L. and Dixon, M. (2007). An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Sci. Hort.* 113: 162-165.

ANEXOS

Anexo 1 Morfología de planta de lechuga variedad White Boston



Anexo 2 Semilla de lechuga variedad White Boston



Anexo 3 Sistema de producción RF



Anexo 4 Acondicionamiento de la piscina



Anexo 5 Siembra en esponja





Anexo 6 Traslado a la piscina de crecimiento



Anexo 7 Trasplante al Sistema Raíz Flotante



Anexo 8 Cosecha



Anexo 9 Toma de datos

Peso fresco



Altura de planta



Conteo del número de hojas



Peso raíz



Volumen de raíz



Anexo 10 Producción en sistema RF





Anexo 11 Solución hidropónica preparada



Anexo 12 Toma de datos temperatura de la solución



Anexo 13 Toma de datos temperatura de la carpa



Anexo 14 Datos de la temperatura

Día	Diciembre		Enero		Febrero	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	6,2	34,7	5,1	33,2	9,2	39,5
2	5	38,8	5	38,1	8,3	40,5
3	3,9	34,7	6,1	40,6	8,7	42,3
4	4,6	41,1	6,7	32,1	11,1	44
5	4,5	36,8	8,1	35,1	5,6	43,7
6	7,1	39,5	9	24,5	9,9	42,5
7	6,4	39	9,2	36,7	8,1	41,8
8	2,4	37	10,3	37,5	8,3	44,5
9	5,9	37,3	8,5	32,2	8,7	43,5
10	7,2	39,6	8,7	32,4	8,2	43,4
11	5,3	37,5	8,5	35,4	9,3	43,3
12	4,7	36,3	8	33,5	9,1	46,6
13	4,7	36,3	8,7	37,9	7,9	45
14	6,3	34,3	8,2	38,5	8,8	44
15	6,2	33,3	9,5	43,5	7,5	42,5
16	5,8	36,7	9	40,5	8	45,4
17	6,3	36,2	9,2	39,7	9	44
18	5,1	34	8,5	38,1	8,7	31,8
19	5,8	40,7	9	39,4	9	35,5
20	8,7	38,5	7,8	40,8	8,8	35,6
21	6,8	38,1	9,4	40,1	8,8	30,1
22	6,5	35,6	6,2	38,5	9,1	41,2
23	7,4	33	7,9	40,7	9,9	41,9
24	7,1	31,1	7,7	42	11,5	42,6
25	6,1	38,1	9,6	37,3	10,2	41,8
26	6,8	36,4	10,2	38,7	10,3	41,5
27	5,9	37,2	8,4	41,3	9,5	40
28	6,1	38,5	7	31	9,3	42,7
29	7,5	38,5	8,4	38,6		
30	5,9	40	7,4	38,6		
31	8,2	38,6	8,2	42,7		
Prom.	5,94	36,93	8,05	37,2	8,73	41,4

Anexo 15 Análisis químico del agua

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 77/16

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO DE AGUAS A77/16

Cliente:	FACULTAD DE AGRONOMÍA - UMSA
Solicitante:	Srta. Roxana Ticona Quispe
Dirección del cliente:	Calle Araona # 9055, Zona Villa Ingenio
Procedencia de la muestra:	Centro Experimental de Cota Cota
	Provincia: Murillo
	Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Grifo de Carne de Horticultura - Fac. Agronomía
Responsable del muestreo:	Srta. Roxana Ticona Quispe
Fecha de muestreo:	10 de mayo de 2016
Hora de muestreo:	10:55
Fecha de recepción de la muestra:	10 de mayo de 2016
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 10 al 26 de mayo 2016
Caracterización de la muestra:	agua de grifo
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Btella Pett
Código LCA:	77 -1
Código original:	A -1

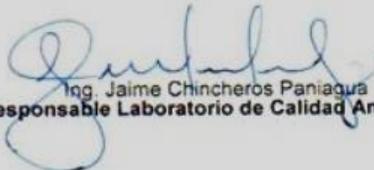
Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Limite de determinación	A -1 77 -1
pH	EPA 150.1		1 - 14	8.3
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1.0	88
Cloruros	SM-4500-Cl-B	mg Cl/l	0.020	1.1
Sulfatos	SM 4500-SO4=E	mg/l	1.0	16
Sodio	EPA 273.1	mg/l	0.019	2.7
Potasio	EPA 258.1	mg/l	0.21	0.65
Calcio	EPA 215.1	mg/l	0.32	11
Magnesio	EPA 242.1	mg/l	0.18	2.5
Dureza total	SM 2340 - B	mg CaCO ₃ /l	2.0	38
Fósforo total	EPA 385.2	P-PO ₄ ³⁻ mg/l	0.010	< 0.010
Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/l	0.30	< 0.30

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, junio 12 de 2020


Ing. Jaime Chincheros Paniagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



c.c. wdi
JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf./Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia