

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CAMPUS TECNOLÓGICO LOCAL SAN CARLOS**

**CULTIVO HIDROPÓNICO NFT DE LECHUGA (*Lactuca sativa*
L.: Asteraceae) CON DIFERENTES CULTIVARES, SOLUCIONES
NUTRITIVAS Y MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN AMBIENTE
PROTEGIDO EN SANTA CLARA, SAN CARLOS**

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Agronomía como
requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía

DIXIE RAQUEL LIZANO ASTORGA



Carrera de Ingeniería en Agronomía
Campus Tecnológico Local
San Carlos
2019 - 2023

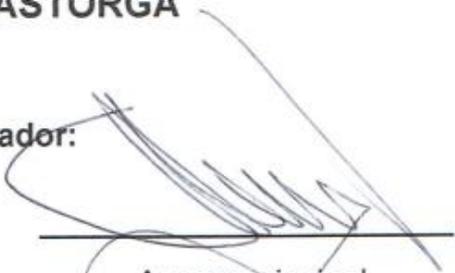
2020

**CULTIVO HIDROPÓNICO NFT DE LECHUGA (*Lactuca sativa*
L.: Asteraceae) CON DIFERENTES CULTIVARES, SOLUCIONES
NUTRITIVAS Y MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN AMBIENTE
PROTEGIDO EN SANTA CLARA, SAN CARLOS**

DIXIE RAQUEL LIZANO ASTORGA

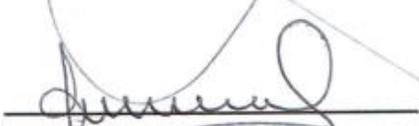
Aprobado por los miembros del Tribunal Evaluador:

Ing. Agr. Carlos Ramírez Vargas, Ph D.



Asesor principal

Ing. Agr. Xiomara Mata Granados, Lic.



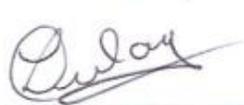
Co-asesora

Ing. Agr. César Naranjo Díaz, MSc.



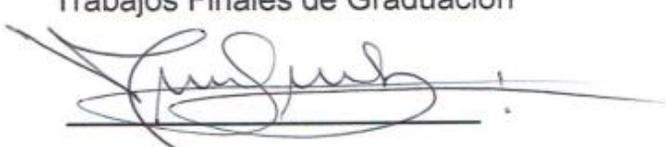
Jurado

Ing. Agr. Zulay Castro Jiménez, MGA.



Coordinadora
Trabajos Finales de Graduación

Ing. Agr. Milton Villarreal Castro, PhD.



Director
Escuela de Agronomía

2020

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres y hermanos los cuales han sido un apoyo incondicional durante toda mi carrera y han puesto su confianza en mí.

También está dedicado a mi pareja, Jefry Vidal Matarrita Baltodano, y a mi hijo, Fabián Vidal Matarrita Lizano, los cuales se han convertido en mis motores de superación e inspiración durante estos últimos años.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la capacidad de cumplir cada uno de los retos que se me han presentado durante toda mi vida ya que sin la ayuda y el discernimiento que Dios me ha brindado no hubiese llegado hasta donde estoy hoy.

Agradezco a mis dos asesores el Ing. Agr. Carlos Ramírez Vargas, Ph D. y a la Ing. Agr. Xiomara Mata Granados, Lic. por todo el apoyo y el acompañamiento brindado durante el desarrollo del trabajo de tesis.

A mi pareja, Jefry Vidal Matarrita Baltodano, por acompañarme siempre en mis decisiones y por ser un motivo y ayuda indispensable para mi superación y desarrollo de este proyecto.

A mis padres, Dixie Alexandra Astorga Rodríguez y Hernán Mauricio Lizano Acuña, por todo el apoyo brindado y por siempre estar pendientes de mis pasos.

Agradezco a la Ing. Fo. Marlen Camacho Calvo, M. Sc. por el acompañamiento brindado y por asesorarme a lo largo del ensayo en los análisis estadísticos pertinentes.

Agradezco a la institución por el apoyo que me ha brindado.

A todas las personas que directa e indirectamente influyeron positivamente durante mi carrera universitaria.

¡Muchas gracias!

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ANEXOS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación	2
1.2 Objetivo general.....	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis de investigación.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Cultivo de lechuga en Costa Rica	5
2.2 Sistema NFT.....	7
2.3 Soluciones nutritivas.....	8
2.4 Uso de microorganismos benéficos	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1 Ubicación y periodo de estudio	14
3.2 Descripción general de la investigación	15
3.3 Descripción de la estructura de cultivo y equipo.....	16
3.4 Material experimental vegetal	20
3.5 Elaboración de las soluciones nutritivas.....	20
3.6 Preparación de las aplicaciones de microorganismos benéficos	24

3.7	Descripción de los tratamientos	25
3.8	Descripción de la unidad experimental y repeticiones	26
3.9	Distribución espacial de los tratamientos	28
3.10	Variables evaluadas.....	28
3.11	Modelo estadístico y diseño experimental.....	30
3.12	Manejo agronómico	31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1	Experimento 1: evaluación de seis cultivares de lechuga.....	33
4.2	Experimento 2: evaluación de tres soluciones nutritivas	38
4.3	Experimento 3: uso de microorganismos benéficos	43
5.	CONCLUSIONES.....	50
6.	RECOMENDACIONES.....	51
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	52
8.	ANEXOS	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
1.	Soluciones nutritivas y sus concentraciones en ppm para el cultivo de <i>lechuga</i> (<i>Lactuca sativa</i> L.).....	9
2.	Cultivares de lechuga utilizados en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.	20
3.	Cuadro de doble entrada para la preparación de la solución nutritiva de Philippe Morard con una conductividad eléctrica de 2 mS/cm a partir de la intersección entre los equivalentes de los cationes y aniones.....	21
4.	Cuadro de doble entrada para la preparación de la solución nutritiva de Cooper (1975) con una conductividad eléctrica de 2 mS/cm a partir de la intersección entre los equivalentes de los cationes y aniones.....	21
5.	Cuadro de doble entrada para la preparación de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1938) con una conductividad eléctrica de 2 mS/cm a partir de la intersección entre los equivalentes de los cationes y aniones.....	22
6.	Cantidad de sales fertilizantes necesarias para preparar un volumen de 1000 litros de la solución nutritiva de Philippe Morard con una concentración de 2 mS/cm.....	22
7.	Cantidad de sales fertilizantes necesarias para preparar un volumen de 1000 litros de la solución nutritiva de Cooper (1975) con una concentración de 2 mS/cm.....	23
8.	Cantidad de sales fertilizantes necesarias para preparar un volumen de 1000 litros de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1938) con una concentración de 2 mS/cm.....	23
9.	Composición de las fuentes de micronutrientes empleadas en conjunto con las soluciones nutritivas utilizadas en el sistema hidropónico NFT modificado en Santa Clara de San Carlos. 2019-2020.....	24
10.	Microorganismos benéficos empleados en el sistema hidropónico NFT modificado en Santa Clara de San Carlos. 2019-2020.	25

11.	Descripción de los tratamientos empleados en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	25
12.	Descripción de los tratamientos (factores) empleados en el Experimento 2 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020...	26
13.	Descripción de los tratamientos (factores) empleados en el Experimento 3 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020....	26
14.	Variables evaluadas en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	29
15.	Crecimiento vegetativo de seis cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	33
16.	Rendimiento y calidad de seis cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.	35
17.	Comportamiento de las variables ambientales presentes en el interior del invernadero en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	37
18.	Significancia para las variables de crecimiento vegetativo en dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; empleando tres soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020...	38
19.	Crecimiento vegetativo para los dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; empleando tres soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	39
20.	Significancia para las variables de rendimiento y calidad en dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; empleando tres soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	41
21.	Significancia de las variables de crecimiento vegetativo en dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; utilizando microorganismos	

	benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	41
22.	Significancia de las variables de crecimiento vegetativo en dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020....	43
23.	Crecimiento vegetativo de los dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	44
24.	Significancia de las variables de rendimiento y calidad en dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	46
25.	Rendimiento y calidad de dos cultivares de <i>Lactuca sativa</i> L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	47
26.	Comportamiento de las variables ambientales presentes en el interior del invernadero en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1.	Mapa físico-político del cantón de San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Imágenes tomadas y adaptadas de: IFAM (1985).....	14
2.	Base de soporte piramidal y diseños de la ubicación, medidas, colocación y sujeción de los canales de recirculación con sus respectivas partes y medidas empleadas en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	17
3.	Entradas y salidas de los canales de recirculación empleados en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	18
4.	Red de distribución y diseño de la ubicación y medidas de la tubería colectora empleada en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	19
5.	Unidad experimental compuesta por doce plantas, dos unidades de observación por tratamiento, cultivadas en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	27
6.	Unidad experimental compuesta por doce plantas cultivadas en los Experimentos 2 y 3 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	27
7.	Plantas del cultivar Bacio a los 15, 25 y 30 DDT respectivamente, en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	34

LISTA DE ANEXOS

Anexo	Título	Página
1.	Materiales empleados para elaborar una estructura piramidal de soporte de un sistema NFT modificado.....	66
2.	Programación del timer, periodos de arranque y duración de cada ciclo de circulación.	66
3.	Condiciones ambientales en el interior del invernadero en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020....	67
4.	Condiciones ambientales en el interior del invernadero en el Experimento 3 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020....	68
5.	Condiciones ambientales externas en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	69
6.	Grados de libertad para las fuentes de variación en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	70
7.	Dosis, forma de aplicación y detalles generales de los productos químicos utilizados en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.....	71

RESUMEN

En el presente estudio se evaluaron diferentes cultivares de lechuga, soluciones nutritivas y microorganismos benéficos bajo condiciones de ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos empleando un sistema hidropónico NFT modificado en forma piramidal, el periodo de evaluación comprendió desde el 14 de marzo hasta el 02 de noviembre del 2019. El trabajo tuvo como objetivo determinar los cultivares de lechuga que presenta mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad así como la solución nutritiva y el microorganismo benéfico que confiera mejores características de crecimiento, calidad y rendimiento a los cultivares. El estudio se dividió en tres experimentos sucesivos determinados por los resultados del experimento anterior; para el Experimento 1 se empleó un diseño Completamente al Azar con seis tratamientos con 24 repeticiones; los Experimentos 2 y 3 se analizaron bajo un diseño de Parcelas Divididas en Bloqueo con tres tratamientos y ocho repeticiones. Durante el ciclo de cultivo se realizaron mediciones de altura y número de hojas por planta cada cuatro días, el día de la cosecha se realizaron mediciones en variables de crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad. En el Experimento 1 se presentaron diferencias significativas entre tratamientos destacándose los cultivares Sementel y Bohemia con las mejores características comerciales. En el Experimento 2 se presentaron diferencias significativas para algunos de los factores e interacciones entre soluciones nutritivas y cultivar destacándose la SN de Hoagland y Arnon respecto a variables de altura de la planta y peso fresco aéreo. En el Experimento 3 se obtuvieron diferencias estadísticas para las variables de peso fresco de raíz, peso fresco aéreo y etiolación con el uso del MB *Trichoderma harzianum* presentando los mejores resultados para estas variables de crecimiento, rendimiento y calidad.

Palabras clave: Lechuga, Hidroponía NFT, Soluciones nutritivas, *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas fluorescens*

ABSTRACT

The presented study evaluated different lettuce cultivars, nutritive solutions and beneficial microorganisms under controlled conditions in Santa Clara, San Carlos implementing an NFT hydroponic system modified in pyramid form. Evaluation time took place from March 14th through November 2nd, 2019. The purpose of the study was to determine which cultivars of lettuce that have better growth, yield and quality characteristics, as well as the nutritive solution and the beneficial microorganism that confers better characteristics growth, quality and yield to the cultivars. The study was divided into three successive experiments determined by the results of the previous experiment; in Experiment 1 a Completely Random design was used with six treatments with 24 repetitions; Experiments 2 and 3 were analyzed under a design of Split Plots in Blockade with three treatments and eight repetitions. Measurements were taken during the crops cycles every four days to determine the height and the number of leaves yielded per plant. On the day of harvest, measurements were taken of vegetative growth, yield and quality. In Experiment 1 were determinate significant differences between treatments, highlighting the Sementel and Bohemia cultivars with the best commercial characteristics. In Experiment 2, significant differences were presented for some of the factors and interactions between nutritive solutions and cultivation, highlighting the Hoagland and Arnon SN regarding variables of plant height and aerial fresh weight. In Experiment 3, statistical differences were obtained for the variables of fresh root weight, fresh air weight and ethiolation with the use of MB *Trichoderma harzianum*, presenting the best results for these variables of growth, yield and quality.

Key words: Lettuce, NFT Hydroponics, Nutrient Solutions, *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas fluorescens*

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de productos hortícolas, especialmente las hortalizas de hoja, ha tenido un aumento significativo en los últimos años debido a la incorporación de dietas saludables, el consumo de alimentos bajos en calorías y las recomendaciones de nutricionista y médicos. Este incremento exige a los productores generar una oferta continua y competitiva que satisfaga la demanda del mercado, incentivando la búsqueda de estrategias productivas para alcanzar mayores rendimientos, sostenibilidad agrícola y a la vez obtener hortalizas que cumplan con los estándares de calidad y sanidad, libres de problemas fitopatológicos.

El uso de ambientes protegidos para la producción de hortalizas de hoja se presenta como una alternativa para cumplir con los requerimientos que demanda el mercado, brindando así mismo las condiciones ambientales óptimas para el correcto desarrollo de las plantas. En el caso de las hortalizas de hoja, como la lechuga, las condiciones del trópico generan una serie de factores climatológicos y fitopatológicos que limitan el correcto desarrollo de las plantas y por consiguiente la producción de estas, sin embargo, mediante la implementación de tecnologías como la hidroponía bajo sistemas de cultivos protegidos se hace posible la producción de esta hortaliza en regiones con aptitud no hortícola (Ramírez y Nienhuis 2012).

La hidroponía bajo sistema protegido es una técnica de cultivo donde se disminuye o anula la dependencia del suelo; el sistema radical se desarrolla en un medio acuoso o sustrato inerte que proporciona todas las condiciones de soporte, nutrición, agua y oxígeno necesarias, esta técnica genera un microambiente y medio edafoclimático modificados, brindando condiciones de luminosidad, temperatura y humedad aptas para el desarrollo y producción de hortalizas de hoja (González 2008; Inca 2013; Hernández 2017).

Dentro de las técnicas hidropónicas actuales para la producción de hortalizas de hoja se encuentra, por excelencia, el sistema hidropónico de cultivo de flujo laminar de nutrientes conocida como NFT (Nutrient Film Technique), la cual permite

augmentar la productividad mediante la explotación del espacio adaptado para el cultivo, genera un mejor aprovechamiento de las soluciones nutritivas incorporadas debido al mecanismo de recirculación, se da un explotación máxima del recurso hídrico, se favorece la capacidad de absorción del sistema radical y permite incorporar al sistema (NFT) microorganismos benéficos, promotores de crecimiento y organismos para la prevención y tratamiento de fitopatologías radicales (González 2008). Los sistemas NFT son ampliamente conocidos desde los años sesenta cuando el doctor Allan Cooper propuso este modelo de cultivo en Inglaterra, hoy en día existen variaciones, modificaciones y mejoras desarrolladas para los NFT. La implementación de las tecnologías mencionadas anteriormente permite a los horticultores obtener productos de calidad y libres de problemas patológicos, obteniendo así hortalizas de hojas (lechuga) en regiones donde las características edafoclimáticas, elevadas temperaturas, precipitaciones y problemas fitosanitarios, no son las idóneas para el desarrollo de este cultivo a campo abierto (Rojas y Paniagua 2015).

1.1 Justificación

Las condiciones agroclimáticas de la Región Huetar Norte, específicamente en el distrito de Florencia, no son favorables para el desarrollo de la agricultura de hortalizas de hoja a campo abierto, la producción de lechuga en esta región se ve afectada debido a su aptitud no hortícola. Estas condiciones generan problemas fitopatológicos y de rendimiento debido a la acumulación de látex y los procesos de etiolación asociado a los efectos de luminosidad, elevadas temperaturas y alta humedad relativa a que el cultivo es expuesto, por lo que es indispensable determinar el cultivar que presente mejor adaptación a las condiciones imperantes en la región, brindando así mismo la nutrición necesaria para satisfacer la demanda del cultivar seleccionado, además, emplear alternativas naturales como es el uso de microorganismos benéficos con el objetivo de promover el desarrollo vegetativo.

Por ello surge la necesidad de identificar los elementos necesarios para el correcto desarrollo de la técnica de hidroponía NFT bajo ambiente protegido; donde se pueda generar y brindar a los productores e investigadores información precisa,

útil y técnica para la producción de lechuga en Santa Clara de Florencia, San Carlos. El presente trabajo tiene como fin desarrollar un sistema hidropónico NFT modificado bajo condiciones protegidas de invernadero para la producción de lechuga, con el propósito de identificar el o los cultivares que mejor se adapte a la región, la utilización de diferentes soluciones nutritivas y la incorporación de microorganismos benéficos al sistema.

1.2 Objetivo general

Seleccionar los cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.) que presenten una mejor adaptación genético-ambiental, la solución nutritiva y el microorganismo benéfico que confiera mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad a estos cultivares, en un sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara de Florencia, San Carlos, Alajuela.

1.3 Objetivos específicos

- Determinar los cultivares de lechuga que presentan mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad cultivados en un sistema hidropónico NFT modificado bajo un ambiente protegido en Santa Clara de Florencia, San Carlos, Alajuela.
- Evaluar el crecimiento, rendimiento y calidad los cultivares de lechuga seleccionados utilizando diferentes soluciones nutritivas en un sistema NFT modificado en ambiente protegido.
- Evaluar el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivares de lechuga mediante la inoculación de las plantas e incorporación de microorganismos benéficos a la solución nutritiva seleccionada previamente en un sistema hidropónico NFT modificado.

1.4 Hipótesis de investigación

- Al menos una de los cultivares de lechuga cultivados en la técnica hidropónica NFT modificado presenta mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad.

- Una de las soluciones nutritivas resulta mejor en cuanto a las características de crecimiento, rendimiento y calidad de las lechugas cultivadas en la técnica hidropónica NFT modificado.
- Al menos uno de los de microorganismos benéficos mejora las características de crecimiento, rendimiento y calidad de las lechugas cultivadas en la técnica hidropónica NFT modificado.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cultivo de lechuga en Costa Rica

La lechuga, *Lactuca sativa* L; es una planta anual autógama perteneciente a la familia de las Asteráceas, clasificada como la hortaliza de hoja por excelencia y es la más consumida como ensalada verde debido a su calidad culinaria; esta especie presenta una gran diversidad debido a sus diferentes tipos de hojas y a sus hábitos de crecimiento, sin embargo, se diferencian cinco variedades botánicas: la longifolia (Lam.), donde se encuentran las lechugas Romanas o Cos; la capitata (L.) la cual se conoce como Mantecosas; la crispera L. que son conocidas como arrepolladas o cabeza redonda; la acephala Dill. o nybacea, que presenta hojas sueltas y dispersas; y la augustuana All; las cuales son lechugas esparrago o de tallo (Saavedra 2017).

La lechuga es producida prácticamente en todo el mundo mediante diferentes técnicas de cultivo, sin embargo, es mayormente producido en zonas templadas, tropicales y subtropicales donde las condiciones ambientales favorecen su crecimiento (Carrasco y Izquierdo 1996; Saavedra 2017). La temperatura óptima para el correcto crecimiento de las plantas de lechuga está entre los 15 °C y 18 °C, temperaturas inferiores a 12 °C y superiores a 24 °C el crecimiento de las plantas se ve limitado (Saavedra 2017).

La producción de lechuga en Costa Rica se ubica principalmente en el Valle Central en los cantones de Escazú en San José, Central y Alfaro Ruíz en Alajuela, y Cantón Central y Oreamuno de Cartago (OIMA 2018), para el 2014 en Costa Rica había un total de 2012 fincas dedicadas al cultivo de lechuga para un total de 817,2 hectáreas, de este total, el 44% de las fincas tenían una extensión inferior a una hectárea (Censo Nacional Agropecuario 2014). En este mismo censo se demostró que la provincia de San José tiene el mayor número de fincas (68,4 hectáreas) dedicadas a la producción de esta hortaliza pero Cartago y Alajuela la superan en extensión con 516,3 y 158,3 hectáreas respectivamente, para el 2014 el 53% de las fincas no utilizaban ninguna técnica de ambiente protegido o semiprotegido.

La lechuga es una de las hortalizas de mayor consumo en la dieta del costarricense y representa una importante fuente de empleo para muchos agricultores y productores, cerca del 90% de la producción de lechuga se consume en el país con excepción de aquella que es exportada preparada y semipreparada para su incorporación en dietas verdes y ensaladas fresca. En el año 2001 la lechuga era la tercera hortaliza más consumida en los hogares costarricenses, en el 2015 se encontraba en el quinto lugar con 4,83 kg de lechuga per cápita, sin embargo, una misma encuesta realizada en el 2015 indica que la lechuga es la tercer hortaliza más gustada por los costarricenses para consumo diario; del año 2014 al 2017 el valor agregado en lechuga ha ido en aumento con una tasa de variación de 13,8% (PIMA 2016).

El aumento en el consumo anual de lechuga hace que los productores inviertan constantemente en técnicas para la mejora de sus productos, satisfaciendo las demandas y exigencias de mercado, sin embargo las condiciones propias del Trópico en Costa Rica hacen que las plantas de lechuga sean altamente susceptible a enfermedades y plagas; su estructura, el constante contacto con el suelo y la suavidad de sus hojas la hace apetecible para insectos y moluscos (Theodoracopoulos *et al.* 2009), debido a estas características se desarrollan tecnologías de cultivo tales como la implementación de técnicas hidropónicas para disminuir la dependencia del suelo para este cultivo.

La hidroponía es una ciencia dedicada al cultivo de plantas sin el uso de sustrato o suelo, con la presencia de un medio inerte, en el cual se añaden los nutrientes necesarios y esenciales para el crecimiento y desarrollo normal de la planta donde las raíces de las plantas permanecen suspendidas sobre una lámina de solución nutritiva (Jones 2005; Enciclopedia Británica 2013; Resh 2013), los sistemas hidropónicos pueden ser cerrados o abiertos lo cual está determinado por la circulación sin pérdida del agua o la no circulación de la solución nutritiva así como pérdida de agua (Lara 2000; Keith 2003; Rodríguez *et al.* 2006; Sánchez *et al.* 2014). Algunas técnicas hidropónicas no incorporan sustrato en el medio generando un sistema de raíz flotante como los sistemas *nutrient film technique*

(NFT), *deep flow technique* (DFT) y el sistema aeropónico (Alpizar 2008, Quesada 2011 y Jones 2012).

2.2 Sistema NFT

El sistema de solución nutritiva recirculante o técnica de película de nutrientes, NFT, por sus siglas en inglés, es una tecnología hidropónica de ambiente protegido muy utilizada en el hemisferio norte para la producción de hortalizas de fruto y hoja (Carrasco y Izquierdo 1996; Inca 2013; Zambrano 2014; Hernández 2017). El sistema NFT es por excelencia la tecnología hidropónica más utilizada para el cultivo de hortalizas de hoja como la lechuga (Carrasco & Izquierdo 1996; Valverde 2013; Brenes y Jiménez 2016), fue desarrollado en los años sesenta en Inglaterra por el doctor Allan Cooper, el sistema permite suministrar eficientemente todos los macro y micronutrientes requeridos por la planta garantizando a la vez una correcta oxigenación de la solución evitando pudrición y oxidación del sistema radical (Hernández 2017).

El principio general del sistema NFT consiste en la constante circulación de una película o lámina fina de solución nutritiva que pasa a través del sistema radical de las plantas en un sistema hidropónico completamente cerrado, donde se mantiene constante el volumen de dicha solución; las plantas quedan sostenidas por un canal de cultivo generalmente construidos en PVC en cuyo interior se da la circulación de la solución mencionada hacia cotas más bajas por gravedad e impulso (Wittwer y Castilla 1995; Barría 2005; Inca 2013; Zambrano 2014). La película de solución nutritiva presente en la técnica NFT debe ser 1 mm a 4 mm de altura para lograr una adecuada oxigenación del agua, así mismo, debe contar con una pendiente de 1% a 3% y la longitud de los canales no debe exceder los 18 metros (Rivera 2015).

En los sistemas hidropónicos NFT el sistema radical de la planta está en contacto directo con los elementos necesarios para el crecimiento de la planta, el agua y oxígeno, maximizando así el potencial productivo de la planta, acortando los ciclos de cultivo, y evitando en gran medida enfermedades o fitopatologías del suelo así como problemas por estrés hídrico, el no uso de suelo evita tener que pasar por

procesos de desinfección de este y se obtiene una mayor densidad de siembra (Inca 2013; Zambrano 2014; Hernández 2017). Ramos (2010) menciona que los cultivos de lechuga hidropónicos que se desarrollan bajo la técnica de NFT permiten incrementar la producción y rendimiento, además de acortar los ciclos hasta en un 60% por lo que es indispensable conocer los cultivares de lechuga que mejor se adapten al modelo.

El sistema NFT está constituido principalmente por una bomba de impulsión, tuberías de distribución, canales de cultivo, tanque de almacenamiento y una tubería colectora, debido a su estructura se caracteriza por ser un sistema de alta inversión inicial el cual demanda un suministro constante de agua y de energía, requiere de chequeos constantes de salinidad, pH y formulación de soluciones nutritivas (Barría 2005). El sistema presenta una limitante la cual radica en la necesidad de un cocimiento previo para realizar formulaciones correctamente por lo que se requiere de un técnico o asesor, sin embargo, el aprendizaje sobre la preparación de soluciones nutritivas es sencillo, por lo que una capacitación inmediata al productor genera el conocimiento necesario para desarrollar su propio sistema (autónomo), autosuficiente; los sistemas NFT requieren de un suministro constante de solución nutritiva por lo que es indispensable conocer sobre su preparación y conceptos generales (Resh 2001; Soto 2005).

2.3 Soluciones nutritivas

Una solución nutritiva es una solución de sales minerales en agua, que contienen los nutrientes macro y micro necesarios, en forma iónica, que son absorbidos por el sistema radical de las plantas para su correcto crecimiento y desarrollo (Brenes y Jiménez 2016). Steiner (1968) y Alpízar (2008) explican que la solución nutritiva es uno de los componentes más importantes de un sistema hidropónico ya que contiene los nutrientes en las cantidades necesarias para el correcto desarrollo vegetal de la planta, donde se establece una adecuada concentración para el sano funcionamiento de las raíces, temperatura y pH óptimo que mantenga los nutrientes disponibles y de forma balanceada en cantidades de aniones y cationes. La mayoría de las soluciones nutritivas empleadas en la

hidroponía actual se derivan de dos formulaciones propuestas por Hoagland y Arnon en 1950 de un estudio denominado “*The water-culture method for growing plants without soil*”, a partir de esta propuesta de formulaciones se generaron cientos de soluciones nutritivas más (Jones 2005).

En el año de 1961, Abram Steiner propuso el concepto de “Solución Nutritiva Universal”, en la que explica que los cultivos pueden desarrollarse y crecer perfectamente cuando se realiza un correcto balance entre cationes y aniones. Steiner empleó diferentes concentraciones de cationes (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) y aniones (NO_3^- , $H_2PO_4^-$, SO_4^{-2}) logrando una relación iónica (mutua) de los principales nutrientes que requieren la mayoría de las plantas. La formulación propuesta por Steiner está en dependencia de la conductividad eléctrica, el pH y la relación iónica mutua logrando así una solución universal con las características de 60% NO_3^- , 5% $H_2PO_4^-$, 35% SO_4^{-2} , 35% K^+ , 45% Ca^{+2} y 20% Mg^{+2} , en el caso de los micronutrientes Steiner en 1984 citado por Castellanos (2009) recomienda una formulación con concentraciones de 1.3, 0.6, 0.13, 0.02, 0.05 y 0.44 ppm de Fe, Mn, Zn, Cu, Mo y B respectivamente.

Los requerimientos nutricionales derivan diferentes soluciones nutritivas que varían en función de la fenología, el tipo de cultivo (especie, cultivar) y las condiciones ambientales imperantes (Favela *et al.* 2006; Lacarra y García 2011). En el caso de lechuga existen diferentes soluciones nutritivas propuestas para este cultivo las cuales varían dependiendo del autor y de la variedad cultivada tal y como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Soluciones nutritivas y sus concentraciones en ppm para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.).

Autor	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
Furiana (1998)	198	39	183	142	38	52	2	0,4	0,02	0,06	0,3	0,06
La Molina (2001)	154	36	260	150	45	70	1	0,5	0,15	0,15	0,5	0,01
Morgan (1999)	141	25	96	0	151	25	33	2,5	0,06	0,45	1	0,05
Resh (1997)	200	50	210	200	50	113	5	0,5	0,1	0,1	0,5	0,05
Resh (2001)	190	50	210	200	40	113	2,5	0,5	0,1	0,1	0,5	0,05

Fuente: Resh 1997; Rodríguez *et al.* 2002.

Favela *et al.* (2006) describen la importancia de siempre considerar los factores de pH, temperatura, concentración de amonio y oxígeno disueltos en la solución, conductividad eléctrica, afinidad entre aniones y cationes, y el estado fisiológico de la planta, además de que se debe velar por que los fertilizantes empleados estén correctamente disueltos, concentrados y con bajo porcentaje de impurezas para asegurar así una solución nutritiva de calidad.

El pH de la solución nutritiva presenta características de inherencia a su composición mineral, además de que influye en las reacciones de combinación, disociación y precipitación de los elementos en solución, es por ello que el pH afecta directamente la distribución y biodisponibilidad de los nutrientes para la planta (Juárez *et al.* 2006). Lara (2000), Jones (2005) y Castellanos (2009) reportan valores óptimos de pH, los cuales oscilan entre 5,5 y 6,5, y Favela *et al.* (2006), Lacarra y García (2011) expresan que el pH está relacionado directamente con la concentración y el equilibrio entre aniones y cationes, generando acidez o basicidad a la solución, influyendo así con la solubilidad iónica y reportando niveles de pH entre 5 y 7, donde la mayor solubilidad de las sales se obtiene entre 5,5 y 5,8, valores superiores disminuyen la disponibilidad de calcio y fósforo así como la absorción de hierro y manganeso.

La temperatura y oxígeno disuelto en la solución son factores muy importantes a tomar en cuenta en la formulación de soluciones nutritivas ya que están estrechamente relacionados, el rango adecuado de temperatura oscila entre 18 °C y 25 °C, temperaturas inferiores a los 22 °C hacen que el oxígeno disuelto se encuentre en los valores óptimos sin embargo este nivel de temperatura puede alterar algunas funciones metabólicas y fisiológicas de la planta, así mismo temperaturas menores a 15 °C reducen considerablemente la absorción de nutrientes (López *et al.* 2011).

La conductividad eléctrica es un factor que representa la cantidad de iones disueltos en la solución, entre mayor sea la concentración de sales minerales mayor será la presión osmótica (conductividad eléctrica) y menor el potencial osmótico, la presión osmótica depende de la cantidad de partículas disueltas y en cuanto mayor

sea la cantidad de estas se genera un gasto superior de energía por parte de la planta en el momento de la absorción provocando así un desbalance nutricional (Taiz y Zeiger 2006). Putra y Yuliando (2015) describen que niveles bajos de conductividad eléctrica genera una escasa disponibilidad de nutrientes, por tanto la relación entre iones se basa en un balance de macronutrientes y debe de realizarse para los aniones y cationes entre su misma carga. Alpízar (2008) expresa que los valores de conductividad eléctrica utilizados en sistemas hidropónicos son bajos y oscilan entre 1,5 mS/cm a 2,5 mS/cm, sin embargo, este valor debe ser acorde con el cultivo y las condiciones climatológicas imperantes, la absorción de nutrientes varía dependiendo de factores como clima, latitud, técnicas de producción, etapa fenológica y especie a cultivar.

Según Juárez *et al.* (2006) la composición de las soluciones nutritivas es el factor hidropónico que más modificaciones ha sufrido a través de la historia adaptándose de acuerdo a las necesidades del cultivo, la especie, las variedades, la etapa fisiología de la planta y el sistema hidropónico a desarrollar, así mismo, se pueden manejar diferentes soluciones nutritivas con el fin de adelantar o atrasar el momento óptimo de cosecha, tal es el caso de las hortalizas de hoja, a las cuales se les puede adelantar el momento de cosecha mediante una mayor aplicación de nutrientes específicos y por medio de la promoción del desarrollo radical. Actualmente se desarrollan técnicas de incorporación de sustancias químicas y biológicas en los sistemas hidropónicos para el control de problemas fitosanitarios así como el uso de microorganismos benéficos como una alternativa para promover el desarrollo vegetativo tanto aéreo como radical (Peña y Reyes 2007).

2.4 Uso de microorganismos benéficos

A pesar de las adaptaciones de los sistemas hidropónicos y la eliminación del sustrato o suelo con la técnica NFT, las condiciones ambientales y en principal las del trópico hacen que la aparición de plagas y enfermedades sea una constante en la producción de hidropónica aún bajo ambiente protegido. Marín (2010) explica que muchos cultivos sembrados bajo ambiente protegido e hidroponía no son estacionarios por lo que los inóculos se mantienen en estado latente y cuando las

condiciones climáticas son favorables se da la aparición de plagas y enfermedades, debido a esto se han implementado técnicas para suprimir en lo posible el efecto de estas fitopatologías dentro de los sistemas productivos generando a la vez una respuesta positiva en el desarrollo vegetal, una de estas técnicas es la incorporación de organismos benéficos a los sistemas hidropónicos. Esto se presenta como una alternativa en la búsqueda de soluciones ecológicas y eficientes a esta problemática, enfocado siempre en una producción sostenible y amigable con el ambiente (Peña y Reyes 2007).

Dentro de las técnicas más utilizadas para la incorporación de organismos benéficos a los sistemas productivos se mencionan los biocontroladores, los cuales son organismos vivos que generan un efecto positivo sobre el control de fitopatologías y benefician el desarrollo vegetal, tal es el caso de los controladores microbianos y fúngicos como *Bacillus thuringiensis*, *Beauveria bassiana*, *Paenibacillus popilliae*, *Trichoderma sp.*, *Metarhizium anisopliae*, entre otros (Manjarrez 2015). Estudios mencionados por Onofre-Lemus *et al.* (2009) y Sgroj *et al.* (2009) demuestran que las bacterias promotoras del crecimiento vegetal contribuyen no solo en el desarrollo vegetativo sino también en la fijación biológica de nitrógeno atmosférico, solubilización de fósforo inorgánico, mineralización de fósforo orgánico, producción de auxinas, sideróforos, ácido salicílico, ácido cianhídrico, y actividad ACC desaminasa. Amplios estudios realizados con *Pseudomonas fluorescens* demuestran que estos microorganismos confieren características benéficas al cultivo de lechuga, donde generan una mayor tasa de crecimiento así como sanidad general.

Dentro de los microorganismos benéficos más empleados en la agricultura costarricense y la hidroponía hortícola se encuentra el *Trichoderma*, género natural de hongos del suelo que presenta alta capacidad biocontroladora contra un gran número de patógenos (Morgan 2012); existen numerosos estudios que demuestran su efecto benéfico dentro de los sistemas agrícolas sin suelo, por tanto existen formulaciones específicas de este hongo para uso hidropónico debido a su capacidad como promotor de crecimiento, también ayuda a la absorción y

concentración de nutrientes como Cu, P, Na, Fe y Mn en la raíz de plantas; los beneficios obtenidos por este hongo se achacan al hecho de que mejoran la estructura y tamaño físico e interno de la raíz de la planta, desactiva compuestos tóxicos en la zona radicular, solubiliza nutrientes para la absorción y mejora el uso del nitrógeno (Sgroy *et al.* 2009; Morgan 2012).

Estudios realizados con *Trichoderma* sp. reportan beneficios en el desarrollo vegetal y crecimiento de las plantas debido a la actividad solubilizadora de fosfatos, producción de metabolitos y a través de la liberación de nutrientes inmediatamente disponibles propio del efecto de descomposición de materia orgánica que cumple el hongo (Howell 2003; Godes 2007; Valencia *et al.* 2007; Valero 2007). Altomare *et al.* (1999) y Vera *et al.* (2002) explican que este hongo tiene la capacidad de reproducirse y crecer en el sustrato colonizando el sistema radical de la plantas, liberando auxinas, giberelinas y citoquininas que estimulan el desarrollo de las plantas; otros reportes de literatura demuestran una mejora notablemente el peso seco de la raíz, peso fresco de la raíz, crecimiento radicular y longitud de raíz en plantas de arveja, maíz, pastos, maracuyá y jitomate al emplear este hongo (Harman *et al.* 2004; Cubillos *et al.* 2009; Camargo y Ávila 2014; Ruiz *et al.* 2018).

Muchos de estos microorganismos benéficos son empleados hoy día en Costa Rica, como una alternativa para el control de enfermedades a nivel hidropónico y en producción de hortalizas de hojas como la lechuga, así como una alternativa para el desarrollo vegetativo y radicular de la planta. El uso de microorganismos benéficos ha tomado auge en la última década incentivando la agricultura con responsabilidad ecológica, buscando la sostenibilidad y la incentivación en el manejo integrado de plagas y enfermedades.

Según el INM (2011) y de acuerdo a la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge (1971; 1982), citado por Quesada (2007), en Santa Clara se presentan condiciones de clima y bosque tropical húmedo (bh-T) con una temperatura promedio superior a los 24 °C, una altura de 165 msnm, una humedad relativa promedio superior al 80% y precipitación anual media entre 2000 mm y 4000 mm muy distribuidas durante todos los meses del año.

3.2 Descripción general de la investigación

El ensayo se llevó a cabo bajo condiciones de ambiente protegido empleando un sistema hidropónico cerrado mediante la técnica NFT modificado estructurado de forma piramidal mediante el uso de tubería PVC y madera. El ensayo se dividió en tres experimentos los cuales fueron consecutivos y determinados por los resultados del experimento anterior. En el Experimento 1 se emplearon seis cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.), utilizando la solución nutritiva recomendada por el laboratorio de Fisiología Vegetal del Instituto Politécnico Nacional de Toulouse en Francia, dirigida por el doctor Philippe Morard. En el Experimento 1 se seleccionaron los cultivares que presentaron mejor adaptación genético-ambiental, esto se determinó mediante la evaluación de variables de crecimiento, producción y calidad. En el Experimento 2 se tomaron los cultivares seleccionados en el experimento anterior y se cultivaron en tres diferentes soluciones nutritivas para determinar cuál solución le confiere a las plantas de lechuga mejores característica de crecimiento, rendimiento y calidad. Finalmente, el Experimento 3 consistió en establecer los cultivares seleccionados en la solución anteriormente elegida e incorporando a esta última microorganismos benéficos (*Trichoderma harzianum* y *Pseudomonas fluorescens*) como promotores de crecimiento para el cultivo. Durante todos los experimento se evaluarán variables de crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo, se realizó un monitoreo constante de plagas y enfermedades, se realizaron mediciones diarias de pH, CE y temperatura de las soluciones nutritivas y se evaluaron las condiciones ambientales de humedad relativa, temperatura y luminosidad bajo registro digital por medio de un registrador de datos (data logger).

3.3 Descripción de la estructura de cultivo y equipo

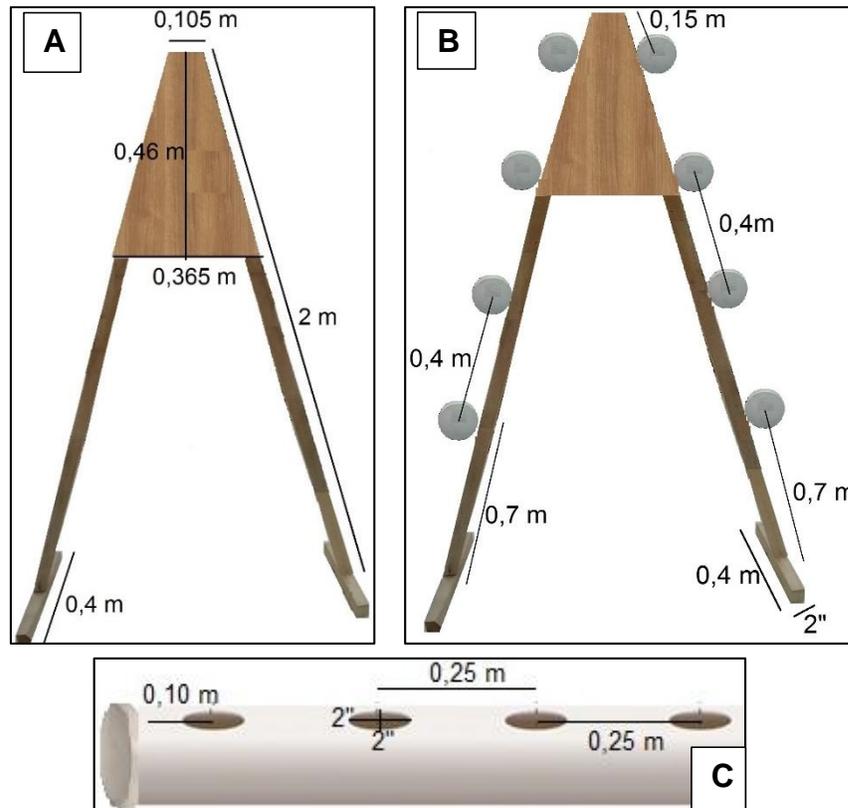
3.3.1 Invernadero y características

El invernadero se encuentra orientado en dirección Norte a Sur, cuenta con un área de 120 m² de los cuales solo se utilizará una cuarta parte para el ensayo, presenta una longitud de 12 m, un ancho de 10 m, 3 m de altura de pared, 5 m de altura de la cumbrera y 0,8 m de abertura cenital fija; el techo es tipo capilla el cual presenta una cobertura plástica de polietileno de baja densidad con filtro UV de 400 galgas. Los laterales de la estructura constan de paredes con malla de nylon antiáfidos de 30x30 (hilos por pulgada lineal), el piso dentro del invernadero es de piedra roja y se le colocó una cobertura de ground cover sobre este el cual consiste en un plástico blanco permeable que permite un mayor aprovechamiento y uniformidad de la luz debido a la reflexión.

3.3.2 Estructura piramidal de soporte y canales de recirculación

Para la elaboración del sistema hidropónico NFT modificado se emplearon tres estructuras de soporte en forma piramidal con las siguientes características. Cada pirámide posee tres bases construidas con piezas de madera de 2" x 2" por 2 m de largo, a estas piezas se les unen dos láminas de Plywood (una por cada cara) las cuales permiten obtener el ángulo de colocación de las patas de la estructura, a la parte que queda apoyada en el suelo se añade transversalmente una pieza de 2" x 2" para dar mayor sujeción a la estructura. Los materiales necesarios para la elaboración de cada estructura de soporte (pirámide con tres apoyos) se observa en el Anexo 1. El largo de la estructura piramidal está dado por los canales de recirculación los cuales corresponden a ocho tubos PVC sanitario blanco de 3" y 3 m de largos colocados en los laterales de la estructura con un grado de pendiente de dos por ciento para favorecer la recirculación, los mismos sujetos con gazas plásticas de PVC y tornillos. Cada estructura piramidal posee cuatro niveles dados por la altura de colocación de los tubos de recirculación espaciados entre sí para evitar el contacto entre plantas (Figura 2, B), cada canal de recirculación posee 12

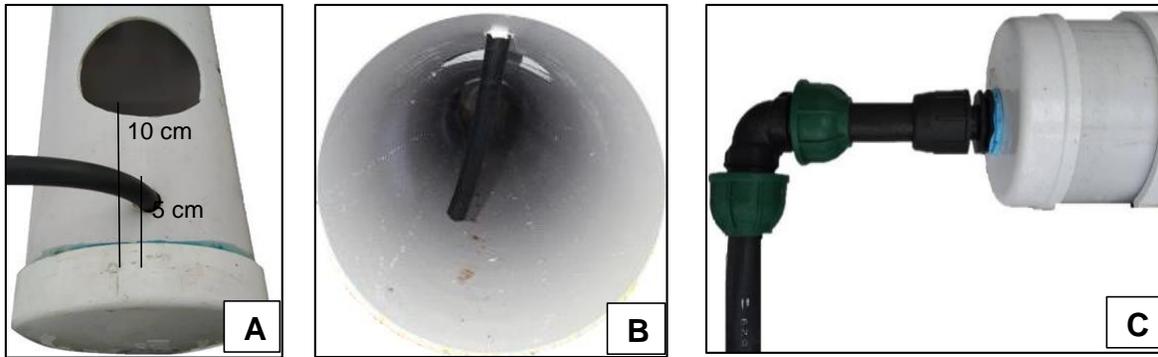
agujeros los cuales corresponden a los puntos de siembra obteniendo así una densidad de 26 plantas/m².



A: Base de la pirámide; **B:** ubicación y medidas de los canales de recirculación en la base; **C:** puntos de siembra en los canales de recirculación.

Figura 2. Base de soporte piramidal y diseños de la ubicación, medidas, colocación y sujeción de los canales de recirculación con sus respectivas partes y medidas empleadas en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Los canales de recirculación se sellaron en un extremo con tapas de PVC de 3", en la parte superior del tubo PVC, cerca de esta tapa, se realiza un agujero para el ingreso de la manguera de alimentación (Figura 3, A y B), en el otro extremo del tubo PVC también se selló con una tapa de PVC de 3" la cual posee un agujero de 1/2" ubicado a 3,5 cm de la base, este agujero permite la salida del remanente de solución permitiendo establecer una película de solución nutritiva necesaria para que las raíces de las plantas entren en contacto con dicha solución. En cada agujero de salida de remanente se colocaron uniones PVC de 1/2", adaptadores plástico de poliducto y codos plástico diseñando así las salidas de remante de solución nutritiva (Figura 3, C).



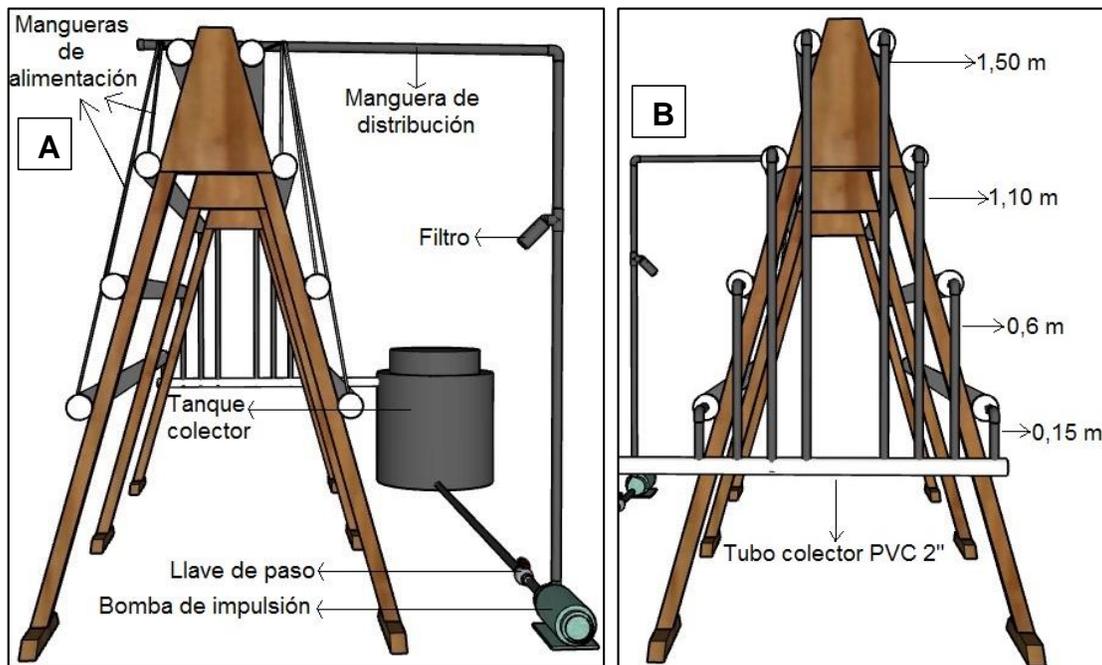
A: entrada de la manguera de alimentación al canal de recirculación; B: vista interior del canal de recirculación con la manguera de alimentación; C: salida de remanente con sus respectivos adaptadores, uniones y codo.

Figura 3. Entradas y salidas de los canales de recirculación empleados en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

3.3.3 Tanque colector, red de distribución y tubería colectora

Para el Experimento 1 se empleó un tanque colector Rotoplas con capacidad de 250 litros de plástico negro duro con una capa interna color blanco (tricapa), para verificar el volumen en litros de solución nutritiva presente en el tanque colector se colocó una manguera de nivel transparente por fuera del tanque con graduación, esta manguera se conectó con la manguera de salida del tanque por medio de una unión PVC de $\frac{1}{2}$ ", para los Experimentos 2 y 3 se emplearon tres tanques colectores idénticos al descrito anteriormente para independizar cada sistema piramidal por lo que se procedió a corregir la red de distribución, el sistema recolector de remate el sistema de impulsión. Del tanque colector sale una manguera de poliducto de 1" de diámetro la cual está ensamblada al tanque por medio de uniones plásticas de poliducto, esta manguera posee una llave de paso de rosca plástica, una bomba de impulsión y un filtro plástico de discos "tipo y" de 120 mesh para lograr distribuir correctamente la solución nutritiva hasta el extremo superior del sistema. Por medio de distribuidores de cuatro salidas verticales se uniformiza la cantidad y presión de la solución nutritiva que alimenta los canales de recirculación, a estos distribuidores se les colocó una manguera de alimentación de goma (hule) negra de alta presión con un diámetro de 5 mm, estas mangueras ingresan por uno de los extremos de los tubos PVC mediante un agujero realizado en la parte superior del tubo PVC (Figura 3, A y B).

Para el sistema de tubería colectora se utilizó un tubo PVC de 2" de diámetro por seis metros de longitud al cual se le realizaron 24 huecos de ½" para permitir el ingreso de las mangueras de poliducto de ½", estas mangueras se conectaron directamente con las salidas de los canales de recirculación detallados anteriormente. El tubo colector posee un desnivel de cinco por ciento para facilitar la circulación del remante de solución nutritiva hasta el tanque colector. Para los Experimentos 2 y 3 del ensayo se procedió a cortar el tubo colector para independizar cada pirámide y se realizaron los ajustes necesarios para dirigir cada tubería colectora a su respectivo tanque colector.



A: Diagrama general de la red de distribución y sus componentes; B: tubería colectora de remanente
Fuente: Cordero (2020).

Figura 4. Red de distribución y diseño de la ubicación y medidas de la tubería colectora empleada en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

3.3.4 Bomba, sistema de activación de la bomba y monitoreo climatológico

Para la circulación de la solución nutritiva en el Experimento 1 se instaló una bomba de centrífuga de 0,5 hp/110v modelo PM60 (Foras, Italia), para los Experimentos 2 y 3 se utilizaron tres bombas idénticas a la descrita anteriormente para independizar los sistemas NFT. El sistema de activación de la bomba de

impulsión es activado por un sistema electrónico compuesto por dos Timer Digitales EZ Pro jr 8300 (Nelson, USA) y dos contactores LC1D12 (Schneider Electric, Francia) para realizar el disparo de arranque, realizando 18 activaciones diarias con una duración de quince minutos iniciando, los periodos y tiempos de arranque se detallan en el Anexo 2. Se evaluaron las condiciones ambientales de humedad relativa, temperatura y luminosidad bajo registro digital por medio de un “data logger” ONSE-U12-012, los datos fueron almacenados y analizados por medio de la App para PC HOBO MX.

3.4 Material experimental vegetal

En el Experimento 1 del ensayo se emplearon seis cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivados de forma independiente en cada uno de los puntos de siembra, cada canal de recirculación posee capacidad para doce plantas por lo que se cultivaron dos plantas por cada cultivar en cada canal, ubicados completamente al azar, logrando así un total de 288 plantas, 48 por cada cultivar. En el Cuadro 2. Se observan los cultivares utilizados así como el país de origen de la semilla.

Cuadro 2. Cultivares de lechuga utilizados en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Especie	Cultivar (cv.)	Casa Comercial	País de origen
<i>Lactuca sativa</i> L.	Antedis	Bejo Zaden	Holanda
<i>Lactuca sativa</i> L.	Bohemia	Enza Zaden Beheer	Holanda
<i>Lactuca sativa</i> L.	Sementel	Bejo Zaden	Holanda
<i>Lactuca sativa</i> L.	Spectation	Bejo Zaden	Holanda
<i>Lactuca sativa</i> L.	Sargazo	Rijk Zwann Export	Holanda
<i>Lactuca sativa</i> L.	Bacio	Enza Zaden Beheer	Holanda

Del Experimento 1, se seleccionaran los cultivares necesarios para ser utilizados en los Experimentos 2 y 3. En los Experimentos 2 y 3 se realizó la siembra de los cultivares seleccionados anteriormente; en el Experimento 3 del ensayo la metodología de siembra de las plantas cambió, ya que previo a su trasplante se inocularon con el microorganismo correspondiente.

3.5 Elaboración de las soluciones nutritivas

Para el Experimento 1 de cultivo se empleó la solución nutritiva desarrollada por el laboratorio de Fisiología Vegetal del Instituto Politécnico Nacional de Toulouse

en Francia, dirigida por el doctor Philippe Morard; para el Experimento 2 se emplearon tres soluciones nutritivas las cuales corresponden a la Solución Nutritiva propuesta por Cooper (1975), la Solución de Hoagland y Arnon (1938) y la solución utilizada en el Experimento 1. En el Experimento 3 se utilizó la solución nutritiva que confirió mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad a las plantas de lechuga cultivadas en el Experimento 2. Para la elaboración de las soluciones nutritivas se empleó la metodología de cuadros de doble entrada en la que se colocan los equivalentes de los cationes en la fila horizontal y los aniones en la columna vertical, siendo la sumatoria de cada grupo la concentración (eq/1000 litros) que tendrá la solución, la intersección resultante entre los aniones da como resultado la sal fertilizante empleada para la preparación de la solución nutritiva en unidades de equivalentes a disolver en un volumen de 1000 litros de agua; en los Cuadros 3, 4 y 5 se observan los detalles de los cuadros de doble entrada y los equivalentes de los iones utilizados.

Cuadro 3. Cuadro de doble entrada para la preparación de la solución nutritiva de Philippe Morard con una conductividad eléctrica de 2 mS/cm a partir de la intersección entre los equivalentes de los cationes y aniones.

Catión/Anión	Ca ⁺²	K ⁺	Mg ⁺²	Σ
NO ₃ ⁻	10	5		15
H ₂ PO ₄ ⁻		2		2
SO ₄ ⁻²			3	3
Σ	10	7	3	20

Cuadro 4. Cuadro de doble entrada para la preparación de la solución nutritiva de Cooper (1975) con una conductividad eléctrica de 2 mS/cm a partir de la intersección entre los equivalentes de los cationes y aniones.

Catión/Anión	Ca ⁺²	K ⁺	Mg ⁺²	H ⁺	Σ
NO ₃ ⁻	8,4	6,6			15
H ₂ PO ₄ ⁻		1,9		0,8	2,7
SO ₄ ⁻²			4		4
Σ	8,4	8,5	4	0,8	21,7

Cuadro 5. Cuadro de doble entrada para la preparación de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1938) con una conductividad eléctrica de 2 mS/cm a partir de la intersección entre los equivalentes de los cationes y aniones.

Catión/Anión	Ca ⁺²	K ⁺	Mg ⁺²	NH ₄ ⁺	Σ
NO ₃ ⁻	8	6			14
H ₂ PO ₄ ⁻				1	1
SO ₄ ⁻²			4		4
Σ	8	6	4	1	19

Después de completar los cuadros de doble entrada se procedió a verificar la sal fertilizante obtenida y la cantidad a utilizar. El cálculo de la cantidad se obtuvo al multiplicar los equivalentes respectivos por su peso molar y se dividió entre la valencia química de la sal, obteniendo en gramos las cantidades necesarias de fertilizantes para preparar 1000 litros de solución nutritiva con una CE de 2 mS/cm. Para la corrección de la CE de las soluciones nutritivas a un valor de 2 mS/cm, se procedió a recalcular la cantidad de sales mediante la corrección en la cantidad de iones utilizados, ya que la sumatoria de cationes y aniones debe corresponder siempre a 20 eq. Posterior a esto se realizó el pesaje de las sales necesarias para cada soluciones nutritivas, para ello se hizo uso de una Balanza digital portátil Scout Pro SP2001. En los Cuadros 6, 7 y 8 se encuentran las cantidades en gramos de cada sal empleada para elaborar las soluciones nutritivas. La solución nutritiva se monitoreó constantemente para mantener siempre un pH entre superior a cinco e inferior a siete así como una conductividad eléctrica (CE) de 2 mS/cm. En caso de existir alguna variación en pH o CE se procedió a la corrección inmediata.

Cuadro 6. Cantidad de sales fertilizantes necesarias para preparar un volumen de 1000 litros de la solución nutritiva de Philippe Morard con una concentración de 2 mS/cm.

Sal mineral	Equivalentes (eq)	Peso molar (g/mol)	Valencia química (eq/mol)	Peso equivalente (g/eq)	Cantidad (g)
Ca(NO ₃) ₂ * 4 H ₂ O	10	236,2	2	118,1	1700,6
MgSO ₄ * 7 H ₂ O	3	246,5	2	123,3	758,3
KNO ₃	5	101,0	1	101,0	505,0
KH ₂ PO ₄	2	136,1	1	136,1	272,2

Cuadro 7. Cantidad de sales fertilizantes necesarias para preparar un volumen de 1000 litros de la solución nutritiva de Cooper (1975) con una concentración de 2 mS/cm.

Sal mineral	Equivalentes (eq)	Peso molar (g/mol)	Valencia química (eq/mol)	Peso equivalente (g/eq)	Cantidad (g)
Ca(NO ₃) ₂ * 4 H ₂ O	8,4	236,2	2	118,1	1315,7
MgSO ₄ * 7 H ₂ O	4,0	246,5	2	123,3	931,2
KNO ₃	6,6	101,0	1	101,0	613,9
KH ₂ PO ₄	1,9	136,1	1	136,1	238,2
H ₃ PO ₄	0,8	98,0	1	98,0	42,5

Cuadro 8. Cantidad de sales fertilizantes necesarias para preparar un volumen de 1000 litros de la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1938) con una concentración de 2 mS/cm.

Sal mineral	Equivalentes (eq)	Peso molar (g/mol)	Valencia química (eq/mol)	Peso equivalente (g/eq)	Cantidad (g)
Ca(NO ₃) ₂ * 4 H ₂ O	8	236,2	2	118,1	1431,2
MgSO ₄ * 7 H ₂ O	4	246,5	2	123,3	1063,6
KNO ₃	6	101,0	1	101,0	637,5,1
(NH ₄)H ₂ PO ₄	1	115,0	1	115,0	120,9

Para aportar los micronutrientes se utilizaron 15 g por cada mil litros de agua del fertilizante *Microplex*®, así mismo se utilizaron 10 g de ácido bórico (H₃BO₄) y 10 g de sulfato de zinc (ZnSO₄*7H₂O) por cada 1000 litros de solución. Para el Experimento 3 se utilizó únicamente un sustituto del fertilizante *Microplex*®, en su lugar se empleó 15 g del fertilizante Nutrex Micros. La composición porcentual de los productos mencionados se presenta en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Composición de las fuentes de micronutrientes empleadas en conjunto con las soluciones nutritivas utilizadas en el sistema hidropónico NFT modificado en Santa Clara de San Carlos. 2019-2020.

Producto comercial	Nutriente	Contenido (%)
<i>Microplex®</i>	Boro (B)	0,50%
	Manganeso (Mn)	4,00%
	Zinc (Zn)	1,50%
	Hierro (Fe)	4,00%
	Cobre (Cu)	1,50%
	Magnesio (Mg)	5,43%
	Molibdeno (Mo)	0,10%
	Cobalto (Co)	0,05%
Nutrex Micros	Boro (B)	1.75%
	Manganeso (Mn)	8.50%
	Zinc (Zn)	5.00%
	Hierro (Fe)	7.50%
	Cobre (Cu)	3.00%
	Molibdeno (Mo)	0.06%
	Azufre (S)	7.30%
H ₃ BO ₄	Boro (B)	17,50%
ZnSO ₄ *7H ₂ O	Zinc (Zn)	14,30%
	Azufre (S)	11,00%

3.6 Preparación de las aplicaciones de microorganismos benéficos

En el Experimento 3 se aplicaron los microorganismos benéficos *Trichoderma harzianum* y *Pseudomonas fluorescens* en la solución nutritiva seleccionada en el Experimento 2 para evaluar el comportamiento de las variables de crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo de lechuga ante la presencia de estos microorganismos. El hongo *Trichoderma harzianum* fue donado por el Laboratorio de Fitopatología y Biocontroladores, ITCR, San Carlos; la bacteria *Pseudomonas fluorescens* se obtuvo mediante el uso del producto Bioprotection Fosforin (Laboratorios Dr. Obregón). Las concentraciones y dosis de los microorganismos se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Microorganismos benéficos empleados en el sistema hidropónico NFT modificado en Santa Clara de San Carlos. 2019-2020.

Microorganismo biológico	Dosis	Concentración aplicada
<i>Trichoderma harzianum</i>	16,95 L/1000 L de agua	6,0 x 10 ⁷ conidios/mL
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	1 L/1000 L de agua	7,2 x 10 ⁷ UFC/mL

En recipientes aparte, se prepararon 500 mL de cada producto con su respectiva concentración y se procedió a sumergir la raíz de las plantas de lechuga durante 60 segundos en este, logrando así la inoculación directa del sistema radical y el sustrato propio del almácigo.

3.7 Descripción de los tratamientos

Los tratamientos se describen a continuación según cada experimento del ensayo. En el Experimento 1 los tratamientos presentaron un arreglo unifactorial (cultivar) detallado en el Cuadro 11. Cada tratamiento está determinado por el cultivar empleado.

Cuadro 11. Descripción de los tratamientos empleados en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Cultivo	Cultivar (cv.)	Solución Nutritiva (SN)	Tratamiento
<i>Lactuca sativa</i> L.	Bohemia	Philippe Morard	T1
<i>Lactuca sativa</i> L.	Spectation		T2
<i>Lactuca sativa</i> L.	Antedis		T3
<i>Lactuca sativa</i> L.	Sargazo		T4
<i>Lactuca sativa</i> L.	Bacio		T5
<i>Lactuca sativa</i> L.	Sementel		T6

Para el Experimento 2, los tratamientos e interacciones se derivaron de un arreglo factorial que integró dos factores cualitativos (cultivares y soluciones nutritivas) para la especie de cultivo *Lactuca sativa* L. En el Cuadro 12 se describe cada tratamiento y el arreglo de cada factor.

Cuadro 12. Descripción de los tratamientos (factores) empleados en el Experimento 2 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Cultivo	Cultivar (cv.)	Solución Nutritiva (SN)	Tratamiento
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 1	Cooper (1975)	T1
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 2		
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 1	Philippe Morard	T2
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 2		
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 1	Hoagland y Arnon (1938)	T3
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 2		

Para el Experimento 3, los tratamientos e interacciones se derivaron de un arreglo factorial que integró dos factores cualitativos (cultivares y microorganismo biológico). En el Cuadro 13 se describe cada tratamiento y el arreglo de cada factor.

Cuadro 13. Descripción de los tratamientos (factores) empleados en el Experimento 3 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Cultivo	Cultivar (cv.)	Microorganismos benéficos (MB)	Tratamiento
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 1	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	T1
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 2		
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 1	Control*	T2
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 2		
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 1	<i>Trichoderma harzianum</i>	T3
<i>Lactuca sativa</i> L.	Cultivar 2		

*Se utilizó la solución nutritiva pura, sin aplicación de ningún tipo de microorganismos.

3.8 Descripción de la unidad experimental y repeticiones

En el Experimento 1, la unidad experimental estuvo compuesta por cada canal de recirculación con doce plantas, sembradas a 0,25 m entre sí dejando 0,10 m al inicio, para una longitud total por parcela de 3 m. Se contó con seis tratamientos, con 24 repeticiones correspondientes a la unidad experimental, cada tratamiento tuvo 48 unidades de observación, cada unidad experimental contó por tanto con dos unidades de observación por cultivar colocadas aleatoriamente (Figura 5).

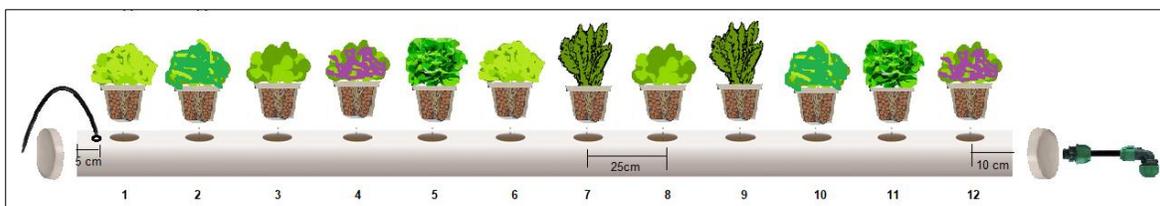


Figura 5. Unidad experimental compuesta por doce plantas, dos unidades de observación por tratamiento, cultivadas en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Para el muestreo final se seleccionó al azar una planta por cada unidad experimental, generando un total de 24 datos por tratamiento para los respectivos análisis estadísticos. Todas las plantas dentro de la unidad experimental fueron sometidas a la toma de datos (altura y número de hojas) cada cuatro días, a partir del 4 DDT.

En los Experimentos 2 y 3 la unidad experimental estuvo compuesta por cada canal de recirculación con doce plantas, sembradas a 0,25 m entre sí dejando 0,10 m al inicio, para una longitud total por parcela de 3 m. Se contó con tres tratamientos definidos por cada estructura piramidal con ocho parcelas grandes por tratamiento con dos subparcelas (cada cultivar). Cada subparcela presentó seis unidades de observación por cultivar colocadas aleatoriamente, para un total de 48 unidades de observación por tratamiento (Figura 6).

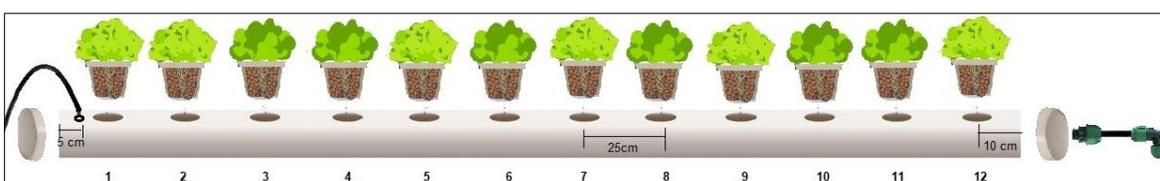


Figura 6. Unidad experimental compuesta por doce plantas cultivadas en los Experimentos 2 y 3 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Para el muestreo final se seleccionó al azar tres plantas (datos) por cada unidad experimental generando un total de 24 datos por tratamiento, los datos de esas tres plantas por unidad experimental se unificaron para los respectivos análisis estadísticos. Cada cuatro días a partir del día 4 DDT, se realizaron mediciones de altura de las plantas y número de hojas por planta para todas las plantas de lechuga.

3.9 Distribución espacial de los tratamientos

Para la evaluación de los Experimentos 2 y 3, el ensayo se dividió en tres secciones correspondientes a cada estructura piramidal NFT modificada independiente, posteriormente, dentro de cada sección se sembraron los cultivares aleatoriamente para homogenizar la distribución.

3.10 Variables evaluadas

Las variables agronómicas evaluadas durante el ensayo están asociadas a crecimiento, rendimiento y calidad, las mismas se describen con mayor detalle en el Cuadro 14.

Las variables de calidad: etiolación de la planta, presencia de látex en planta y sabor amargo en hojas son determinantes para la elección de una lechuga con aptitud comercial, dentro de este grupo de variables, la variable de sabor amargo en hojas es la de mayor importancia ya que esta característica organoléptica hace que la planta sea rechazada para consumo por lo que esta variable es determinante para la selección de cultivares, una lechuga comercial está influenciada por un aspecto subjetivo que incluye las características apreciables por los sentidos a nivel organoléptico como el color, olor, aspecto, textura y palatabilidad (Pimpini *et al.* 2000). La variable días a cosecha es determinante para elegir los cultivares ya que una edad a cosecha más corta genera ciclos menores y aumentar los periodos de siembra, la elección de la edad de cosecha se determina principalmente por el tamaño, uniformidad y edad de cultivo (Alvarado 2004), así mismo estas características permiten obtener una lechuga con tamaño y cantidad de hojas. El mercado exige plantas sin etiolación y sabor amargo por tanto estas variables se eligieron también como determinantes para la edad a cosecha (Cerdas y Montero 2004).

Se registraron diariamente variables climáticas de temperatura, humedad relativa e intensidad de luz (Anexo 3 y 4). Para ello se utilizó un sensor electrónico ONSE-U12-012 colocado dentro del invernadero. Los datos fueron almacenados y analizados por medio de la App para PC HOBOT MX data loggers; los datos

climáticos externos (Anexo 5) a la estructura del invernadero fueron suministrados por la estación meteorológica del Campus, ubicada a 60 m del invernadero.

Cuadro 14. Variables evaluadas en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Abreviación	Variable (unidades)	Frecuencia de medición	Descripción
Alt ¹	Altura de la planta (cm)	Cada cuatro días a partir del día 4DDT. Se realizó una medición el día de la cosecha.	Se midió desde la base de la planta hasta la altura máxima de la planta (hoja más alta) con un Vernier graduado en milímetros.
H ¹	Nº de hojas por planta (#)		Se contó el número total de hojas abiertas por planta.
PFA ²	Peso fresco aéreo (g)		Se pesó la parte aérea de la planta con la ayuda de una alanza digital portátil Scout Pro SP2001 con capacidad para 2000 gramos de un decimal. La planta se cortó en la base para realizar la toma del peso.
PFR ¹	Peso fresco de raíz (g)		Se pesó la parte radical de la planta con la ayuda de una balanza digital portátil Scout Pro SP2001 con capacidad para 2000 gramos de un decimal. La planta se cortó en la base para realizar la toma del peso.
VR ¹	Volumen de raíz (ml)	A cosecha, independiente para cada experimento del ensayo.	Se midió el volumen radical mediante un proceso de desplazamiento de volumen de agua. Se sumergió la raíz en un beaker de 500 mL con un volumen inicial conocido y se determinó el desplazamiento de dicho volumen, obteniendo así el volumen radical mediante una operación de resta: Volumen final - Volumen inicial.
Et ²	Etiolación de la planta (%)		Se determinó la presencia de etiolación en cada planta analizada. Las plantas con de elongación entre nudos (hipocótilo y epicótilo) se caracterizaron como plantas etioladas.
Lx ²	Presencia de látex en la planta (%)		Se determinó la presencia de látex en cada planta analizada. Se cortó el tallo en la base y se determinó en un periodo de 15 segundos la presencia o no de látex, categorizándose como planta con látex toda aquella que cubriera TODA el área de corte con la sustancia lechosa. Así mismo se evaluó la presencia de

látex en las hojas de la planta mediante un corte en la base de estas.

Sab ²	Sabor amargo en hojas (%)	Mediante una prueba gustativa realizada por la misma persona, se comprobó la existencia o no de sabor amargo (concentración de látex) en la planta (hojas bajas, medias y altas) analizada.
DAC ¹	Días a cosecha (días)	Se contabilizaron los días desde el momento de trasplante hasta cosecha.

Variables de: ¹Crecimiento vegetativo. ²Rendimiento y calidad.

3.11 Modelo estadístico y diseño experimental

Los tres experimentos de la investigación se realizaron en condiciones parcialmente controladas. Para el Experimento 1 se empleó un diseño Completamente al Azar (DCA) o Irrestricto al Azar. El modelo estadístico lineal experimental en el que se basó el Experimento 1 del estudio es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde μ es la media general, T_j es el efecto del tratamiento (cultivar de lechuga cultivada) y ε el error experimental o error aleatorio asociado a la observación.

Los Experimentos 2 y 3 se analizaron bajo un diseño de Parcelas Divididas (DPD) en Bloqueo, debido a que el factor solución no fue posible aleatorizarlo por limitaciones de cuerpos piramidales disponibles, por lo que se siguió la estrategia de asignarle un error experimental solo para este. El factor de bloqueo consistió en cada una de las alturas determinadas por los canales de recirculación. El factor subparcela se asignó al cultivar el cual fue aleatorizado a razón de seis plantas por cada canal de recirculación. El modelo estadístico lineal experimental en el que se basaron los Experimentos 2 y 3 del estudio es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_k + PP_i + \varepsilon_{pp(ki)} + SP_j + PP_i * SP_j + \varepsilon_{ijk}$$

Donde μ es la media general, B_k es el efecto del k-ésimo bloque, PP_i es el efecto del i-ésimo solución o parcela principal (solución nutritiva o microorganismo

benéfico según el experimento del ensayo), $\varepsilon_{pp(ki)}$ es el error de la parcela principal, SP_j es el efecto del j-ésimo cultivar sobre la subparcela, PP_i*SP_j es la interacción entre la parcela principal y la subparcela, y ε_{ijk} el error experimental del ensayo.

En todos los experimentos de la investigación se trabajó con un nivel de confianza de 95%, nivel utilizado generalmente en experimentos de carácter agronómico. Los grados de libertad variaron según el modelo estadístico empleado (Anexo 6).

3.11.1 Análisis estadístico de los datos

Se determinaron los valores de la media, la desviación estándar, el error estándar y el coeficiente de variación para las variables de respuesta predefinidas. Posteriormente se utilizó la técnica de modelos lineales generales y mixtos. En el Experimento 1 se realizó corrección de heterocedasticidad para las variables y una prueba de comparación múltiple de Bonferroni para determinar diferencias significativas entre tratamientos siguiendo un análisis más riguroso en el análisis de los datos. En los Experimentos 2 y 3 se utilizó una prueba de comparación múltiple de LSD Fisher para encontrar diferencias significativas entre tratamientos, siendo esta prueba más liberal para los experimentos en análisis.

Todos los análisis se ejecutaron con el programa estadísticos *InfoStat/P 2018 para Windows* (Di Rienzo *et al.* 2018) con un nivel de significancia de 5% ($\alpha=0,05$).

3.12 Manejo agronómico

3.12.1 Trasplante al sistema hidropónico NFT modificado

Las plantas se trajeron en almácigos con una edad de 25 DDS provenientes de la Empresa Almácigos de San Juan, ubicada en San Juan de Naranjo, Alajuela. Los almácigos se compraron en bandejas de 200 celdas con sustrato de Peat Moss (Germination mix, Fafard Canadá) y se trasladaron hasta el invernadero del ensayo para su siembra. Una vez establecido el sistema NFT modificado se aseguró que el agua circule adecuadamente y se elaboraron las soluciones nutritivas siguiendo los lineamientos descritos en los Cuadros del 3 al 10; cada plántula fue colocada dentro de una canastilla hidropónica de plástico negro cuyas dimensiones son 5 cm

de largo por 5 cm de ancho en la parte superior y 2,5 cm de ancho en la parte inferior, posteriormente se plantaron en los canales de recirculación. .

3.12.2 Fitosanidad y desinfección

Durante los tres experimentos se dio un estricto seguimiento en el control de problemas fitosanitarios, procurando un manejo integrado de plagas y enfermedades en el cultivo. El riesgo de la aparición de algún problema fitosanitarios se reduce drásticamente debido a las condiciones propias del invernadero y el control parcial de las condiciones ambientales, sin embargo es indispensable el monitoreo de problemas fitosanitarios que puedan ocurrir circunstancialmente.

Finalizado cada experimento se procedió a desinfectar todo el sistema hidropónico NFT modificado con cloro comercial a 7ppm para eliminar cualquier residuo o material patológico presente. El cloro se diluyó en agua y se dejó en recirculación durante 24 horas para luego hacer un lavado con agua potable.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante los tres experimentos de la investigación se determinaron variables de crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad. Seguidamente se muestran los resultados obtenidos en cada experimento para crecimiento vegetativo, rendimiento y calidad.

4.1 Experimento 1: evaluación de seis cultivares de lechuga

4.1.1 Crecimiento vegetativo

En el cuadro 15 se muestran los resultados para las variables de crecimiento obtenidos para cada cultivar de lechuga.

Cuadro 15. Crecimiento vegetativo de seis cultivares de *Lactuca sativa* L; en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Tratamiento/ Cultivar (cv.)	Altura de la planta (cm)	Nº de hojas por planta (#)	Peso fresco de raíz (g)	Volumen de raíz (ml)	Días a cosecha (días)
T1/Bohemia	19,98 ± 0,32 B	18,25 ± 0,57 D	30,72 ± 0,68 B	26,85 ± 0,96 B	25 A
T2/Spectation	17,38 ± 0,32 C	19,64 ± 0,57 D	28,80 ± 0,68 B	28,02 ± 0,96 B	30 B
T3/Antedis	18,25 ± 0,32 C	37,83 ± 0,57 A	30,40 ± 0,68 B	28,23 ± 0,96 B	30 B
T4/Sargazo	19,93 ± 0,32 B	13,71 ± 0,57 E	28,51 ± 0,68 B	24,83 ± 0,96 B	25 A
T5/Bacio	26,59 ± 0,32 A	24,83 ± 0,57 B	32,55 ± 0,68 A	31,57 ± 0,96 A	30 B
T6/Sementel	19,25 ± 0,32 B	21,71 ± 0,57 C	33,38 ± 0,68 A	28,80 ± 0,96 B	25 A

Datos con letras en común NO son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba de Bonferroni

Los resultados obtenidos para el cv. Bacio coincidió con lo reportado para este tipo de lechuga Romana caracterizadas por ser de porte alto, con la mayor longitud de tallo, alta producción de hojas largas, grandes y erguidas de verde intenso entre los 20 cm a 30 cm de largo lo que determina la altura de la planta (Alvarado 2004; Montesdeoca 2009; Saavedra 2017), el cv. Bacio presentó desde el día 5 DDT una estructura de cabeza abierta y hojas separadas (Figura 7) contrario a lo descrito por Montesdeoca (2009) y Saavedra (2017) quienes la describen como una variedad con tallo cubierto por hojas, cabeza semiabierta y ovalada donde las hojas se aprietan una contra la otra.



Figura 7. Plantas del cultivar Bacio a los 15, 25 y 30 DDT respectivamente, en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Los cv. Bohemia, Sargazo y Sementel pertenecen a las lechugas tipo Batavia que se caracterizan por ser de porte bajo donde (Bejo Zaden 2019), se obtuvieron alturas desde los 17,38 cm hasta los 19,98 cm resultados similares a los obtenidos por Monge *et al.* (2013) quienes reportan alturas promedio de 12,6 cm, 19,4 cm y 16,3 cm en el cv. Sargazo utilizando una mezcla de piedra caliza y lombricompost en un sistema hidropónico al aire libre en Matambú, Guanacaste, Costa Rica, zona con aptitud considerada no hortícola, igualmente Vásquez (2015) obtuvo promedios de 10,23 hojas por planta en el cv. Bohemia y de 16,85 hojas para Sargazo en un ensayo a campo abierto con fertirriego en la Tigra de San Carlos, Costa Rica, datos semejantes a los resultados obtenidos.

Los datos obtenidos para el cv. Antedis coincidieron con lo reportado por Vallejo y Estrada (2004), Halsouet y Miñambres (2005), VelSid (2009), Granval y Gaviola (s.f.) quienes describen las lechugas mantecosas como plantas de cabeza suave con arrollamiento de hojas y de porte bajo o medianas, con una alta producción de hojas; Barrios (2004) obtuvo altura promedio de 19,41 cm en lechugas de este tipo bajo sistema hidropónico, así mismo, Gutiérrez (2011) obtuvo altura promedio de 13,69 cm y 30 hojas por planta para esta misma variedad en un ensayo a campo abierto.

En el caso de la variable peso fresco de raíz los resultados obtenidos presentaron valores desde los 28,5 g hasta los 33,4 g los cuales fueron consistentes por los reportados por Guerrero *et al.* (2014) donde obtuvieron valores en peso de raíz de 26,35 g, 34,73 g y 35,55 g empleando lechugas tipo Batavia en un sistema

hidropónico con sustratos, Rivera (2015) obtuvo un promedio de peso de raíz de 29,50 g para este mismo tipo de lechugas, así mismo evidenció que los cultivares genéticos presentan diferencias en el crecimiento de masa radicular. Cruz (2016) explica que los efectos en el tamaño, peso y volumen de raíz en lechuga están determinados por la variedad, características morfológicas y genéticas siendo consistente con los resultados obtenidos en el experimento.

Los cv. Bohemia, Sargazo y Sementel se cosecharon a los 25 DDT adelantándose cinco días respecto a los cv. Spectation, Antedis y Bacio los cuales requirieron cinco días más de tiempo para alcanzar el tamaño y características de cosecha; la edad de cosecha obtenida se encuentra dentro del promedio esperado para los sistemas NFT los cuales se encuentran desde 25DDT a 40 DDT (Carrasco 2004). Gutiérrez (2011) cosechó entre los 28 DDT hasta los 45 DDT en lechugas tipo mantecosas a campo abierto, Garzón (2006) obtuvo una edad de cosecha de 38 DDT para variedades Romanas. La elección de cultivares más precoces permite desarrollar más ciclos de cultivo obteniendo más plantas anualmente (Alvarado 2004).

4.1.2 Rendimiento y calidad

En el Cuadro 16 se presentan los resultados obtenidos para las variables de rendimiento y calidad, destacándose diferencias significativas respecto a peso fresco aéreo, presencia de látex y sabor amargo en hojas entre tratamientos a excepción de la etiolación de la planta.

Cuadro 16. Rendimiento y calidad de seis cultivares de *Lactuca sativa* L; en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Tratamiento/ Cultivar (cv.)	Peso fresco aéreo (g)	Presencia de látex en la planta (%)	Sabor amargo en hojas (%)	Etiolación de la planta (%)
T1/Bohemia	121,36 ± 4,18 B	0 C	0 C	0 A
T2/Spectation	114,19 ± 4,09 B	32 B	16 BC	0 A
T3/Antedis	122,58 ± 4,18 B	71 A	13 BC	0 A
T4/Sargazo	116,60 ± 4,18 B	29 B	25 B	0 A
T5/Bacio	137,30 ± 4,27 A	57 A	65 A	0 A
T6/Sementel	146,15 ± 4,18 A	0 C	0 C	0 A

Datos con letras en común NO son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba de Bonferroni

Vásquez (2015) reporta datos promedio de 101,5 g por planta del cv. Sargazo y de 129,0 g para variedades Americanas cultivadas en la Tigra de San Carlos, Costa Rica a campo abierto; Cajo (2016) obtuvo peso fresco promedio por planta desde los 96,1 g hasta los 161,0 g en lechugas tipo Batavia utilizando la técnica NFT; Monge *et al.* (2013) reporta peso promedio de 100,4 g en cv. Sargazo en un sistema hidropónico con fibra de coco a campo abierto en Guanacaste; Garzón (2006) reporta pesos promedio de 108 g y 167 g por planta de lechugas Romanas utilizando dos soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT; así mismo reporta valores desde los 52 g hasta 98 g para lechugas tipo Batavia, resultados consistentes a los obtenidos en el experimento donde se obtuvieron promedios desde 114 g hasta los 146 g para este mismo tipo de lechuga.

Los cv. Spectation, Antedis, Sargazo y Bacio presentaron látex y sabor amargo en hojas las cuales son características no deseables en una lechuga comercial, Carrasco y Sandoval (2016) explican que el sabor amargo se debe principalmente a la presencia de látex en su interior vascular, lo cual concuerda con los resultados obtenidos ya que los cultivares que no presentaron látex tampoco presentaron sabor amargo en hojas; Vásquez (2015) reporta un 51% de látex en Sargazo y 100% en plantas Bohemia cultivadas a campo abierto en San Carlos, C.R, lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en el experimento a excepción de los cv. Bohemia y Sementel los cuales no presentaron látex ni sabor amargo lo que las caracteriza como plantas adecuadas para ser comerciables.

Caicedo (1993) explica que cuando las plantas de lechuga se exponen a temperaturas entre 18 °C y 24 °C se da el inicio de la maduración haciendo que las plantas se pongan amargas; sin embargo, la respuesta de la planta a las condiciones de estrés depende del genotipo vegetal. El estrés abiótico desencadena mecanismos de supervivencia haciendo que la planta produzca sustancias como respuesta química de protección aumentando los niveles de látex y por consiguiente el sabor amargo (Vega 2013) coincidiendo con los resultados obtenidos para los cv. Spectation, Antedis, Sargazo y Bacio.

Cuadro 17. Comportamiento de las variables ambientales presentes en el interior del invernadero en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Variable ambiental	Máxima	Mínima	Promedio
Temperatura °C	49,68	18,41	27,98
Humedad Relativa (HR) %	93,04	26,26	71,5
Intensidad lumínica, Lux	32 280,10	3,90	9 804,28

Casaca (2005), Lucero (2012) y Rivera (2015) reportan valores óptimos de humedad relativa para lechuga entre 60% y 80%, a pesar que los resultados obtenidos muestran un promedio de HR entre lo recomendado se puede evidenciar valores máximos y mínimos muy diferentes a los rangos óptimos; Maynard y Houchmuth (1997), Axayacatl (2012) reportan un rango óptimo de temperatura para lechuga entre 15,5 °C y 18,3 °C, con valores mínimos de 7,7 °C y máximos de 23,8 °C. Los datos de temperatura obtenidos en el experimento evidencian que las plantas crecieron bajo condiciones no favorables pudiendo generar problemas de estrés asociados con características no deseables para una planta comercial así como el desarrollo anormal (Vega 2013) como en el caso del cv. Bacio; la intensidad lumínica promedio registrada se encuentran dentro del rango requerido para lechuga el cual va desde los 12 000 a 30 000 lux (Hydro Environment 2015). El hecho de que algunas plantas presentaran una respuesta negativa al estrés se debe a la adaptación genético-ambiental de cada cultivar, Vega (2013) explica que el tipo de respuesta al estrés y la intensidad de la misma depende estrictamente del genotipo vegetal.

Mediante la interpretación de los resultados obtenidos los cv. Sementel y Bohemia se eligen como los mejores cultivares para proseguir con los experimentos 2 y 3 del ensayo. En el caso de las variables de crecimiento estos cultivares presentaron características congruentes con los valores esperados para una planta comercial, así mismos, la edad a cosecha se encuentra dentro del margen esperado para lechugas hidropónicas. El comportamiento de los cv. Sementel y Bohemia respecto a rendimiento y calidad fueron determinantes para su elección como los mejores cultivares, la ausencia de látex y de sabor amargo en hojas se definen como

las características principales y determinantes que hacen que estos cultivares sean seleccionados para proseguir con los demás experimentos.

4.2 Experimento 2: evaluación de tres soluciones nutritivas

En este experimento se utilizaron dos cultivares de lechuga: Bohemia y Sementel, los cuales fueron elegidos en el Experimento 1 al presentar mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad.

4.2.1 Crecimiento vegetativo

En el Cuadro 18 se muestran los resultados de significancia respecto al crecimiento vegetativo obtenidos, según factores y su interacción en el cultivo de *Lactuca sativa* L., destacándose diferencias significativas únicamente en la interacción para la altura de la planta.

Cuadro 18. Significancia para las variables de crecimiento vegetativo en dos cultivares de *Lactuca sativa* L; empleando tres soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Factor	Altura de la planta (cm)	Nº de hojas por planta (#)	Peso fresco de raíz (g)	Volumen de raíz (ml)	Días a cosecha (días)
Solución Nutritiva	*	*	NS	NS	NS
Cultivar	*	*	*	*	NS
Solución Nutritiva*Cultivar	*	NS	NS	NS	NS

* indica diferencias significativas ($p > 0,05$)

En el Cuadro 19 se presentan los valores obtenidos para las variables de crecimiento vegetativo para todos los tratamientos.

Cuadro 19. Crecimiento vegetativo para los dos cultivares de *Lactuca sativa* L; empleando tres soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Cultivar (cv.)	Tratamiento/Solución Nutritiva (SN)	Altura de la planta (cm)	Nº de hojas por planta (#)	Peso fresco de raíz (g)	Volumen de raíz (ml)	Días a cosecha (días)
Bohemia	T1/Cooper (1975)	23,52 ± 0,62 B	13,79 ± 0,50 A	26,08 ± 0,98 A	22,08 ± 1,32 A	23 A
	T2/Philippe Morard	21,47 ± 0,62 C	13,04 ± 0,50 A	24,72 ± 0,98 A	22,71 ± 1,32 A	23 A
	T3/Hoagland y Arnon (1938)	25,00 ± 0,62 A	16,00 ± 0,50 A	26,76 ± 0,98 A	22,96 ± 1,32 A	23 A
Sementel	T1/Cooper (1975)	20,51 ± 0,62 D	18,33 ± 0,50 A	27,05 ± 0,98 A	25,63 ± 1,32 A	23 A
	T2/Philippe Morard	20,34 ± 0,62 D	17,96 ± 0,50 A	27,80 ± 0,98 A	23,96 ± 1,32 A	23 A
	T3/Hoagland y Arnon (1938)	21,81 ± 0,62 C	21,13 ± 0,50 A	28,47 ± 0,98 A	23,96 ± 1,32 A	23 A

Datos con letras en común NO son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba LSD Fisher

Ninguna de las soluciones nutritivas fue una limitante para el crecimiento de las plantas, las mismas poseen una relación entre aniones y cationes dentro de los valores sugeridos para lechuga (Resh 1997; Rodríguez *et al.* 2002; Rivera 2015). El cv. Bohemia presentó la altura de planta superior con un valor máximo promedio de 25 cm y el cv. Sementel desarrolló mayor cantidad de hojas independientemente de la SN utilizada por lo que se confirma el efecto varietal presente en el Experimento 1. La SN de Hoagland y Arnon a pesar de generar una diferencia significativa respecto a la altura de la planta se logró determinar que el cv. utilizado influyó significativamente en el valor, Infoagro (2013) explica que esta característica está ligada directamente a la genética de las variedades así como su susceptibilidad a sufrir el efecto fisiológico de la etiolación.

La SN de Hoagland y Arnon presentó una diferencia respecto a las demás SN ya que aporta nitrógeno en forma de anión nitrato (NO_3^-) y en forma de catión amonio (NH_4^+), las demás SN evaluadas no contenían amonio. Zárate (2014), Beltrano y Giménez (2015) explican las SN deben aportar N en las dos formas en un equilibrio mixto de cationes y aniones generando un balance en el interior de la planta favoreciendo el crecimiento vegetal, desarrollo de hojas, tallos y mejorando la calidad en hortalizas de hoja, así mismo, explican que una alta disponibilidad de

N favorece estas características, lo anterior concuerda con las características presentes en la SN de Hoagland y Arnon la cual aporta una cantidad superior de equivalentes (eq) de N (NO_3^- y NH_4^-) respecto a las demás soluciones, la SN de Hoagland y Arnon presenta un total de iones de N (NO_3^- y NH_4^-) de 15,79 equivalentes (eq) por tanto generó una mayor producción de hojas y favoreció el crecimiento y altura de la planta.

El cv. Sementel presentó los valores más altos de peso fresco de raíz y volumen de raíz con valores máximos promedio de 28,47 g y 25,63 mL respectivamente, por lo que se pudo determinar que estas variables están influenciadas por el factor de la SN y por el factor cv. Castellanos *et al.* (2000) expresa que la longitud, cantidad de raíces y pelos radicales generados está determinado por el genotipo vegetal. En los resultados obtenidos no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para las variables de peso fresco de raíz y volumen de raíz, sin embargo la SN de Hoagland y Arnon presentó valores más altos en el peso fresco de raíz; según Castellanos *et al.* (2000) el P es indispensable para el desarrollo de los tejidos meristemáticos radicales, el crecimiento lateral de raíces y nodulación, valores altos de P hace que el desarrollo radical se vea limitado, así mismo, una elevada disponibilidad de P genera un efecto antagónico con otros iones (FAO 2002); lo anterior concuerda con los resultados obtenidos donde la SN de Hoagland y Arnon presenta 1,05 eq de H_2PO_4^- lo cual corresponde al 5,25% del total de los aniones, la SN de Cooper y de Philippe Morard presentaron valores de 12,25% y 10% de H_2PO_4^- respectivamente valores que superan el valor de equivalentes de H_2PO_4^- recomendado (5%) por Steiner (1984) respecto al total de aniones.

Todos los tratamientos fueron cosechados en el mismo momento, la edad de cosecha obtenida se encuentra entre el promedio esperado para los sistemas hidropónicos NFT (Carrasco 2004); Garzón (2006), Birgi (2015), Rivera (2015) y Brenes y Jiménez (2016) cultivaron lechugas Americanas en sistemas NFT en condiciones ambientales óptimas para el desarrollo del cultivo alcanzando la edad de cosecha a los 35 DDT, 36 DDT, 35 DDT y 49 DDT respectivamente.

4.2.2 Rendimiento y calidad

El Cuadro 20 presenta la significancia de cada una de las variables de rendimiento y calidad para cada factor y su interacción en el cultivo de *Lactuca sativa* L.

Cuadro 20. Significancia para las variables de rendimiento y calidad en dos cultivares de *Lactuca sativa* L; empleando tres soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Factor	Peso fresco aéreo (g)	Presencia de látex en la planta (%)	Sabor amargo en hojas (%)	Etiolación de la planta (%)
Solución Nutritiva	*	NS	NS	NS
Cultivar	*	NS	NS	*
Solución Nutritiva*Cultivar	*	NS	NS	NS

* indica diferencias significativas ($p > 0,05$)

Las variables, presencia de látex en la planta y sabor amargo en hojas no presentó diferencias en ningún factor, demostrando así que estas características están influenciadas por un factor genético-ambiental que se expresa de manera diferente entre cultivares tal y como se demostró en el Experimento 1.

Los valores para las variables de rendimiento y calidad se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Variables de rendimiento y calidad de dos cultivares de *Lactuca sativa* L; empleando tres soluciones nutritivas en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Cultivar (cv.)	Tratamiento/Solución Nutritiva (SN)	Peso fresco aéreo (g)	Presencia de látex en la planta (%)	Sabor amargo en hojas (%)	Etiolación de la planta (%)
Bohemia	T1/Cooper (1975)	88,78 ± 4,99 D	0 A	0 A	100,00 A
	T2/Philippe Morard	75,03 ± 4,99 E	0 A	0 A	79,17 A
	T3/Hoagland y Arnon (1938)	122,40 ± 4,99 B	0 A	0 A	95,83 A
Sementel	T1/Cooper (1975)	96,38 ± 4,99 CD	0 A	0 A	16,67 A
	T2/Philippe Morard	103,53 ± 4,99 C	0 A	0 A	8,33 A
	T3/Hoagland y Arnon (1938)	134,39 ± 4,99 A	0 A	0 A	8,33 A

Datos con letras en común NO son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba LSD Fisher

La SN de Hoagland y Arnon influyó directamente en el peso fresco aéreo de la planta independientemente del cv. utilizado generando valores superiores respecto a las demás SN. Las plantas absorben la mayor parte del N en forma de nitrato (NO_3^-), sin embargo una pequeña fracción de N en forma de amonio (NH_4^+) genera una variación en la disponibilidad de los nutrientes disueltos y la facilidad con que la planta los incorpora en su sistema vascular para llevar a cabo procesos fisiológicos generando mayor número de hojas, hojas más grandes y por consiguiente mayor peso en la parte aérea de la planta (Lara 2000; Santos y Ríos 2016), las características de la SN de Hoagland y Arnon se ajustan con lo descrito anteriormente; Lara (2000), Guzmán (2004), Santos y Ríos (2016) expresan que un alto contenido de NH_4^+ en la SN afecta la disponibilidad de K^+ y Ca^{+2} , Steiner (1984) recomienda una relación $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ de 1/10 sin exceder este 10%, lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en el experimento para la SN de Hoagland y Arnon ya que presenta N en forma de NO_3^- y NH_4^+ a una relación de 10/0,7. El cv. Sementel presentó valores más altos para el peso fresco aéreo en todas las SN con valores desde los 96,38 g hasta los 134,39 g, mismo efecto varietal observado en el Experimento 1; la variable peso fresco aéreo presentó una correlación positiva ($r = 0,69$) con el N° de hojas por planta así como una correlación positiva ($r = 0,60$) con el peso fresco de raíz.

No se presentaron problemas asociados con presencia de látex en la planta y sabor amargo en hojas; sin embargo, se logró comprobar que el cv. Bohemia presentó valores de etiolación considerables con valores desde 79,17% hasta 100% de etiolación, efecto relacionado directamente con la genética del cultivar, este proceso fisiológico influye directamente en la altura de la planta donde se encontró una correlación positiva ($r = 0,61$) entre estas variables lo que concuerda con Carrozzi (2014) quien argumenta que los cv. de cabeza abierta como Bohemia son más susceptibles a desarrollar etiolación lo cual influye directamente en la altura total de la planta. Caicedo (1993), Infoagro (2013), Vega (2013) y Carrozzi (2014) explican que las condiciones de estrés abiótico hacen que las plantas desarrollen el tallo floral, sin embargo esta condición depende del genotipo de los cultivares y su susceptibilidad a la elongación del tallo.

Según los datos obtenidos en este experimento se logró determinar que la solución nutritiva de Hoagland y Arnon influye positivamente en algunas variables de crecimiento, rendimiento y calidad en mayor medida que las demás soluciones nutritivas empleadas generando así diferencias significativas respecto al peso fresco de la planta y el tamaño de la misma, presentando además valores más altos para las variables de peso fresco de raíz y N° de hojas. La forma en que se administre el N en una SN tiene un impacto directo en la variación de la relación en la absorción entre aniones y cationes es por ello que la SN de Hoagland y Arnon presenta una ventaja sobre las demás SN al incorporar 1.05 eq de NH_4^+ , así mismo esta SN presenta mejores relaciones iónicas lo que influyó positivamente en el correcto desarrollo y crecimiento de las plantas de lechuga cultivadas por tanto fue elegida como la mejor SN para continuar con el Experimento 3.

4.3 Experimento 3: uso de microorganismos benéficos

En este experimento se utilizó la solución nutritiva de Hoagland y Arnon (1938) la cual fue elegida en el Experimento 2 al presentar mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad respecto a las demás SN y se continuó con el uso de los cv. Bohemia y Sementel elegidos en el Experimento 1.

4.3.1 Crecimiento vegetativo

La significancia de las variables de crecimiento vegetativo se presenta en el Cuadro 22. Los factores cultivar y microorganismo benéfico (tratamientos) presentaron diferencias altamente significativas para todas las variables, donde solamente la variable días a cosecha no presentó este comportamiento.

Cuadro 22. Significancia de las variables de crecimiento vegetativo en dos cultivares de *Lactuca sativa* L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Factor	Altura de la planta (cm)	N° de hojas por planta (#)	Peso fresco de raíz (g)	Volumen de raíz (ml)	Días a cosecha (días)
Microorganismo benéfico	*	*	*	*	NS
Cultivar	*	*	*	*	NS
Microorganismo benéfico *Cultivar	NS	*	*	NS	NS

* indica diferencias significativas ($p > 0,05$)

Los valores obtenidos para las variables de crecimiento vegetativo se presentan en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Crecimiento vegetativo de los dos cultivares de *Lactuca sativa* L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Cultivar (cv.)	Tratamiento/ Microorganismo benéfico (MB)	Altura de planta (cm)	Nº de hojas por planta (#)	Peso fresco de raíz (g)	Volumen de raíz (ml)	Días a cosecha (días)
Bohemia	T1/ <i>Pseudomonas fluorescens</i>	26,08 ± 0,86 A	17,83 ± 0,67 B	24,40 ± 1,18 BC	22,17 ± 1,15 A	29 A
		23,17 ± 0,86 A	19,04 ± 0,67 B	23,49 ± 1,18 C	20,42 ± 1,15 A	29 A
	T2/Control	23,47 ± 0,86 A	15,75 ± 0,67 C	24,35 ± 1,18 BC	27,21 ± 1,15 A	29 A
		T3/ <i>Trichoderma harzianum</i>	22,09 ± 0,86 A	24,08 ± 0,67 A	26,17 ± 1,18 B	24,25 ± 1,15 A
	Sementel		19,80 ± 0,86 A	23,96 ± 0,67 A	26,35 ± 1,18 B	23,58 ± 1,15 A
		T3/ <i>Trichoderma harzianum</i>	21,58 ± 0,86 A	24,33 ± 0,67 A	30,75 ± 1,18 A	32,21 ± 1,15 A

Datos con letras en común NO son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba LSD Fisher

El uso de *P. fluorescens* según ensayos realizados por Díaz *et al.* (2001) generó diferencias significativas para las variables de crecimiento y aérea foliar respecto al tratamiento testigo, Sánchez *et al.* (2014) realizaron un estudio en lechuga tipo mantecosa donde evaluaron el efecto de varias cepas de *P. fluorescens* obteniendo alturas de planta superiores al tratamiento control, resultados consistente con los datos obtenidos en el experimento.

El tratamiento con MB *T. harzianum* generó plantas de mayor altura respecto al tratamiento Control coincidiendo con resultados obtenidos en diversos estudios donde explican el MB *Trichoderma* sp. genera un mayor desarrollo vegetal, aumento de biomasa, mayor longitud de tallo y altura de la planta en especies herbáceas como lechuga, maíz, maracuyá y tabaco (Howell 2002; Donoso y Lobos 2008; Contreras *et al.* 2009; Cubillos *et al.* 2009; Vinodkumar *et al.* 2017). El cv. Bohemia presentó valores superiores de altura de la planta en todos los tratamientos corroborando una vez más el efecto varietal evidenciado en los Experimentos 1 y 2.

El tratamiento Control presentó más cantidad de hojas lo cual no concuerda con lo reportado por Díaz *et al.* (2001), Howell (2002), Donoso y Lobos (2008), Vinale *et al.* (2008) quienes demuestran que el uso de MB como *P. fluorescens* y *T. harzianum* estimulan el desarrollo vegetal generando una mayor área foliar y número de hojas; así mismo Wanglom *et al.* (2019) obtuvo mayor número de hojas en plantas de lechuga cultivadas in vitro expuestas a metabolitos volátiles producidos por *T. harzianum*; también Gagliano *et al.* (2016) reporta mayor número de hojas en plantas de lechuga al ser tratadas con este hongo mediante una aplicación al sustrato de forma pulverizada. El cv. Sementel presentó los valores superiores en número de hojas independientemente del tratamiento empleado, resultado semejante a los obtenidos en los Experimentos 1 y 2 por lo que se añade esta respuesta a un efecto varietal según lo descrito por Vega (2013) quien expresa que la diferencia en el número de hojas está determinado por la morfología y genética vegetal.

El tratamiento con el MB *T. harzianum* generó valores superiores de peso fresco de raíz y volumen de raíz con valores de 30,75 g y 32,21 mL respectivamente, lo que concuerda con Wanglom *et al.* (2019), los cuales bajo condiciones in vitro utilizando *T. harzianum* en plantas de lechuga presentaron mayor peso de raíz y volumen de raíz respecto al testigo; Gagliano *et al.* (2016) reportan valores superiores de peso fresco y seco de raíz, volumen de raíz y longitud de raíz en plantas de lechuga sembradas en el suelo e inoculadas con *T. harzianum*; Sutton y Peng (1993), Altomare *et al.* (1999), Galeano *et al.* (2002), Wei Lin y Zhang (2006) explican que *Trichoderma* sp. coloniza las raíces de las plantas liberando hormonas y sustancias, al mismo tiempo sintetizan péptidos que promueven el crecimiento radical y desarrollo de las plantas proporcionándoles mayor vigor; Valencia *et al.* (2005) reporta que el hongo *T. harzianum* puede producir ácido 3-indol acético (AIA) sustancia hormonal vegetal que favorece el desarrollo del sistema radical y su vigor. En el caso de *P. fluorescens* se obtuvo peso fresco de raíz y volumen de raíz superiores al tratamiento Control; lo cual concuerda con Pereira *et al.* (1988) y Kloepper *et al.* (1991), Díaz *et al.* (2001), Sánchez *et al.* (2014) quienes mencionan que el uso de *P. fluorescens* incrementan el desarrollo, longitud, volumen y peso

fresco de raíces en el cultivo de lechugas; otros estudios han demostrado que *Pseudomonas* sp. produce sustancias que inducen la iniciación radicular e incrementa la formación de raíces y pelos radiculares (Diyansah *et al.* 2014).

La edad a cosecha fue igual para todos los tratamientos y se encuentre dentro del promedio esperado para el cultivo hidropónico de lechuga (Carrasco 2004), sin embargo Valencia *et al.* (2007) explica que la producción de sustancias a nivel radical por parte de *Trichoderma* sp. actúa como aceleradores de los tejidos meristemáticos primarios de las plantas haciendo que estas se desarrollen más rápido efecto que no se obtuvo en el estudio.

4.3.2 Rendimiento y calidad

El Cuadro 24 presenta la significancia de cada una de las variables de rendimiento y calidad para cada factor y su interacción en el cultivo de lechuga.

Cuadro 24. Significancia de las variables de rendimiento y calidad en dos cultivares de *Lactuca sativa* L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Factor	Peso fresco aéreo (g)	Presencia de látex en la planta (%)	Sabor amargo en hojas (%)	Etiolación de la planta (%)
Microorganismo benéfico	*	NS	NS	*
Cultivar	*	NS	*	*
Microorganismo benéfico *Cultivar	NS	NS	*	*

* indica diferencias significativas ($p > 0,05$)

No existieron diferencias significativas respecto a la presencia de látex en la planta ya que el valor fue cero para todos los factores. Lo factores cv. y MB presentaron diferencias significativas para las variables de rendimiento y calidad a excepción del factor MB para la variable sabor amargo en hojas; en el Cuadro 25 se presentan los valores obtenidos para cada variable de rendimiento y calidad.

Cuadro 25. Rendimiento y calidad de dos cultivares de *Lactuca sativa* L; utilizando microorganismos benéficos en un sistema hidropónico NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Cultivar (cv.)	Tratamiento/ Microorganismo benéfico (MB)	Peso fresco aéreo (g)	Presencia de látex en la planta (%)	Sabor amargo en hojas (%)	Etiolación de la planta (%)
Bohemia	T1/ <i>Pseudomonas fluorescens</i>	95,00 ± 5,64 A	0 A	16,67 A	79,33 A
	T2/Control	94,82 ± 5,64 A	0 A	0 B	0 B
	T3/ <i>Trichoderma harzianum</i>	98,50 ± 5,64 A	0 A	0 B	0 B
Sementel	T1/ <i>Pseudomonas fluorescens</i>	111,13 ± 5,64 A	0 A	0 B	4,33 B
	T2/Control	105,09 ± 5,64 A	0 A	0 B	0 B
	T3/ <i>Trichoderma harzianum</i>	132,97 ± 5,64 A	0 A	0 B	0 B

Datos con letras en común NO son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba LSD Fisher

El cv. Sementel presentó valores superiores de peso fresco aéreo en todos los tratamientos por lo que se atribuyó como una característica varietal; el tratamiento *T. harzianum* presentó valores superiores para esta misma variable con un promedio de 132,97 g, resultados consistentes con los reportados por Yossen *et al.* (2003), Méndez (2009), Gagliano *et al.* (2016), Wanglom *et al.* (2019) quienes obtuvieron mayor peso fresco aéreo y de biomasa en plantas de lechuga tratadas con *Trichoderma* sp. Sutton y Peng (1993), Altomare *et al.* (1999), Ruíz *et al.* (2018) explican que el hongo *Trichoderma* sp. coloniza las raíces de las plantas liberando auxinas, giberelinas y citoquininas generando un estímulo en el desarrollo vegetal y peso fresco de las plantas. *Trichoderma* sp. produce metabolitos volátiles que actúan como promotores del crecimiento vegetal (Mathivanan *et al.* 2008; Vinale *et al.* 2008) como el 6-pentil- α -pirona (6-PP) y el 2metil-1-butanol (Ryu *et al.* 2003; Harman *et al.* 2004; Vinale *et al.* 2008; Hung *et al.* 2015; Lee *et al.* 2016); así mismo la harzianolida producida por *T. harzianum* es un regulador del crecimiento de las plantas (Cutler *et al.* 1991; Ghisalberti y Rowland 1993).

Estudios realizados por Díaz *et al.* (2001) y Someya *et al.* (2008) en el cultivo de lechuga demostraron que *P. fluorescens* favorece el crecimiento del área foliar y peso fresco; Díaz *et al.* (2001) observaron una correlación positiva ($r = 0,75$) entre el volumen radical y el área foliar, lo anterior coincide con los resultados obtenidos en el experimento ya que se obtuvo una correlación positiva ($r = 0,76$) entre el peso fresco aéreo y el peso fresco de raíz.

P. fluorescens presentó valores altos de sabor amargo en hojas y etiolación, con un 79,33 % de etiolación, los tratamiento Control y *T. harzianum* presentaron 0% para estas mismas variables lo que evidencia un efecto de *P. fluorescens* sobre estas variables. Díaz *et al.* (2001) y Sánchez *et al.* (2014) reportan mayor disponibilidad, absorción y presencia de P en plantas de lechuga al utilizar *P. fluorescens* en sustrato, donde determinaron que esta bacteria aumenta los niveles de P en la zona cercana a la rizósfera, lo anterior se asemeja con los resultados obtenidos donde se evidencia un proceso de maduración más precoz en el tratamiento con *P. fluorescens*; Fgaier *et al.* (2008) expresa que una planta con alta disponibilidad y absorción de P madura más temprano favoreciendo la floración; Siddiqui y Shaukat (2003), Alves *et al.* (2004), Fgaier *et al.* (2008) y Rosas *et al.* (2009) explican que *P. fluorescens* sintetiza fitohormonas y vitaminas estimulando la solubilización de P efecto que se relaciona con la maduración de las plantas y el desarrollo de la inflorescencia; los resultados son consistentes con lo descrito anteriormente. Según las observaciones diarias y las evaluaciones realizadas cada 4 DDT, se comprobó que las plantas del tratamiento con *P. fluorescens* presentaron etiolación a partir del día 25 DDT en el caso del cv. Bohemia (6% de las plantas) y a partir del día 27 DDT para el cv. Sementel (2% de las plantas) comprobando así un efecto de la bacteria en la maduración de las plantas por lo que se debió proceder con la cosecha sin embargo este procedimiento no se realizó inmediatamente ya que las plantas no contaban con las características de tamaño comercial para cosecha y no presentaban sabor amargo en hojas.

Cassán *et al.* (2014) y Vega *et al.* (2016) argumentan que *P. fluorescens* convierten los exudados radiculares en sustancias promotoras del crecimiento como citoquininas y auxinas, además sintetiza ácido indol-3-acético (AIA) el cual está estrechamente relacionado con el desarrollo y crecimiento de las plantas; Glick *et al.* (1997) utilizaron diferentes cepas de *Pseudomonas* sp. donde lograron demostrar que estas bacterias ejercen un efecto de elongación en plantas de lechuga y canola, resultados consistentes con los obtenidos en el experimento.

Una disminución en la disponibilidad de la luz hace que las plantas se desarrollen más lento (Del Pino 2019), lo anterior coincide con los resultados obtenidos ya que la edad a cosecha fue más larga en este experimento donde la intensidad lumínica fue inferior (Cuadro 26) a la recomendada por Hydro Environment (2015) para lechuga con valores óptimos van desde los 12 000 a 30 000 lux. Los datos de temperatura y humedad relativa obtenidos evidencia que las plantas a pesar de crecer bajo condiciones de estrés (Maynard y Houchmuth 1997; Casaca 2005; Lucero 2012; Axayacatl 2012; Rivera 2015) no se obtuvo una respuesta negativa en desarrollo y crecimiento.

Cuadro 26. Comportamiento de las variables ambientales presentes en el interior del invernadero en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Variable ambiental	Máxima	Mínima	Promedio
Temperatura °C	53,26	20,96	29,25
Humedad Relativa (HR) %	93,92	23,18	74,81
Intensidad lumínica, Lux	32 280,10	3,90	10 489,06

Los MB al igual que las plantas requieren de condiciones y rangos óptimos de temperatura, humedad, pH y luminosidad para su desarrollo y supervivencia, así mismo, estos factores pueden generar una respuesta sinérgica o antagónica (Vásquez *et al.* 2000; Piromyou *et al.* 2011; Bhattacharyya y Jha 2012; Castro y Rivillas 2014) por tanto, es de suma importancia tener en cuenta las condiciones donde los MB se desarrollan ya que estas afectan su eficiencia.

Según los datos obtenidos para las plantas de lechuga respecto a las variables de crecimiento, rendimiento y calidad se logró determinar que el tratamiento *T. harzianum* fue superior en algunas variables respecto a los demás tratamientos, por tanto se elige como el mejor MB promotor de crecimiento vegetal en este experimento y se presenta mediante resultados contundentes como un eficiente bioestimulante en las plantas de lechuga.

5. CONCLUSIONES

Los cultivares de lechuga Bohemia y Sementel presentaron mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad, demostrando así una mejor adaptación genético-ambiental a las condiciones bajo las cuales se desarrolló el experimento.

La cultivares Bohemia y Sementel presentaron mejor respuesta para las variables de crecimiento, rendimiento y calidad al utilizar la solución nutritiva de Hoagland y Arnon.

La solución nutritiva de Hoagland y Arnon presentó una ventaja ante las demás soluciones nutritivas al aportar nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) confiriendo así mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad a los cultivares de lechuga seleccionados.

La inoculación de plantas de lechuga con microorganismo benéfico *Trichoderma harzianum* y la incorporación de este microorganismo benéfico en la solución nutritiva de Hoagland y Arnon generó un efecto positivo en el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivares seleccionados.

6. RECOMENDACIONES

Es necesario realizar análisis químico del agua previo a la elaboración de la solución nutritiva para verificar el aporte iónico de esta fuente hídrica.

Es importante realizar experimentos con los cultivares de lechuga y solución nutritiva seleccionados en este estudio empleando diferentes conductividades eléctricas (CE) para identificar la concentración de iones ideal para el correcto desarrollo del cultivo.

Se recomienda realizar un ensayo con los cultivares de lechuga y solución nutritiva seleccionados para verificar la extracción de nutrientes por parte de la planta en diferentes etapas del ciclo vegetativo y así establecer un plan de nutrición de acuerdo a las demandas nutricionales de su desarrollo.

Es importante realizar investigaciones con cultivares de lechuga que cuenten con resistencia a altas temperaturas y con características genéticas adaptadas a las condiciones del Trópico.

En el caso del microorganismo benéfico *Trichoderma harzianum* es indispensable realizar un análisis biológico y químico de la solución nutritiva durante y al finalizar el ciclo de cultivo de lechuga para cuantificar la concentración de conidios por mililitro de solución nutritiva y evaluar el progreso del hongo en el sistema hidropónico así como identificar el o los metabolitos secundarios específicos que actúan como promotores de crecimiento vegetal.

Se recomienda realizar una evaluación financiera para determinar la rentabilidad económica y enriquecer integralmente la información existente sobre esta tecnología hidropónica de cultivo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alpizar, A. 2008. Hidroponía cultivo sin tierra. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 104p.
- Altomare, Norvell, Björkman, Harman. 1999. Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant-growth-promoting and biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. Appl. Environ. Microb. 65(7): 2926-2933.
- Alvarado, C. 2004. Inducción del desarrollo reproductivo en *Lactuca sativa*, L; Var. Batavia larga, bajo las condiciones no inductivas de la sabana de Bogotá. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de Lic. en Biología. Pontificia Universidad Javeriana. 127p.
- Alvarado, Benavides, Calvo, Carrizales, Espinosa, Hernández, Ortega, Sancho. 2016. Diagnóstico situacional del Cantón de San Carlos. Facultad de Ciencias Sociales. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 232p.
- Alves, S; Da Silva, R; Macagnan, D; De Almeida, H; Baracat, M; Mouteerd, A. 2004. Rhizobacterial induction of systemic resistance in tomato plants: non-specific protection and increase in enzyme activities. Biol. Control. 29:288-295.
- Barría, L. 2005. Producción hidropónica de hortalizas en Magallanes. Trabajo de titulación presentado para obtener el título de: Ingeniero de Ejecución en Química; Mención Industria y Medio Ambiente. Universidad de Magallanes. 154p.
- Barrios, A. 2004. Evaluación del cultivo de lechuga, *Lactuca sativa* L. bajo condiciones hidropónicas en Pachalí, San Juan Sacatepéquez, Guatemala. Tesis presentada a la honorable junta directiva de la Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos, Guatemala. 64p.
- Bhattacharyya, P; Jha, D. 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. World J. Microbiol. Biotechnol. 28: 1327-1350.

- Bejo Zaden. 2019. Variedades de lechuga. En línea. http://www.bejogt.com/lechuga?f%5B0%5D=field_organic%3A0#facet-filter-region
- Beltrano, J; Giménez, D. 2015. Cultivo en hidroponía. 1° ed. Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires, Argentina. 181p.
- Birgi, J. 2015. Producción hidropónica de hortalizas de hojas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA. Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. 26p.
- Brenes, L; Jiménez, M. 2016. Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistemas NFT (Nutrient Film Technique). 1a edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Caicedo, L. 1993. Horticultura. Universidad Nacional. Palmira – Valle, Colombia. 48p.
- Cajo. 2016. Producción hidropónica de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.), bajo el sistema NFT, con tres soluciones nutritivas. Proyecto de Investigación de Ingeniería Agronómica. Universidad Técnica de Ambato. Cevallos. Ecuador. 102p.
- Camargo, Ávila. 2014. Efectos del *Trichoderma* sp. sobre el crecimiento y desarrollo de la arveja (*Pisum sativum* L.). Ciencia y Agricultura. vol. 11(1):91-100.
- Carrasco, Izquierdo. 1996. La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante ("NFT"). Manual Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Universidad de Talca, Chile. 62p.
- Carrasco, S. 2004. Sistema NFT, requerimientos y usos: Tratado de cultivo sin suelo. 1ra ed. Editorial Mundi Prensa. Almería, España. 541-554pp.
- Carrasco, Sandoval. 2016. Manual práctico del cultivo de lechuga. Mundi prensa. Madrid, España. 148p.
- Casaca, A. 2005. Guías tecnológicas de frutas y vegetales: el cultivo de la lechuga. Proyecto de modernización de los servicios de tecnología agrícola, Promosta.

en línea. Disponible en:
<http://www.innovacion.gob.sv/inventa/attachments/article/2792/lechuga.pdf>

- Cassán, F; Vanderleyden, J; Spaepen, S. 2014. Physiological and agronomical aspects of phytohormone production by model plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum*. *Journal of Plant Growth Regulation*. 33(2): 440-459.
- Castellanos, R; Uvalle, B; Aguilar, S. 2000. Manual de Interpretación de análisis de suelos y aguas. Intagri. Gto. México. 226p.
- Castellanos, J. 2009. Manual de producción de tomate en invernadero. Ocma soluciones impresas. 458p.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico tecnología y manejo. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 462p.
- Castro, A; Rivillas, C. 2014. *Trichoderma* spp.: Modos de acción, eficacia y usos en el cultivo de café, Caldas: CENICAFE.
- Cerdas, M; Montero, M. 2004. Guías técnicas del manejo poscosecha de apio y lechuga para el mercado fresco. San José, Costa Rica. MAG. 72p.
- Contreras. H; Macías, L; Cortes, C; López, J. 2009. *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiol*. 149 (3):1579-1592.
- Cruz, A. 2016. Evaluación de tres variedades del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en dos sistemas de hidroponía bajo ambiente semi controlado en el Centro Experimental Chocloca. Trabajo de investigación realizado para obtener el Título de Licenciatura en Ingeniería Agronómica. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Tarija, Bolivia *Ventana Científica* Vol. 7(12): 31-39.
- Cubillos, J; Valero, N; Mejía, L. 2009. *Trichoderma harzianum* como promotor del crecimiento vegetal del maracuyá (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* Degener). *Agronomía Colombiana*. Vol 27(1):81-86.

- Cutler, H; Himmelsbach, D; Yagen, B; Arrendale, R; Jacyno, J; Cole, P., Cox, R. 1991. Koninginin B: a biologically active congener of koninginin A from *Trichoderma koningii*. J. Agric. Food Chem. 39: 977-980.
- Del Pino, M. 2019. Curso de horticultura y Floricultura. Guía didáctica; cultivo y producción de lechuga. Universidad Nacional de La Plata. 22p.
- Díaz; Ferrera; Almaraz; Alcántar. 2001. Inoculación de bacterias promotoras de crecimiento en lechuga. Revista TERRA 19(4): 227–235. Disponible en: <https://chapingo.mx/terra/contenido/19/4/art327-335.pdf>
- Diyansah, B; Aini, L; Hadiastono, T. 2014. The effect of PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* on leaf mustard plant (*Brassica juncea* L.) infected by TuMV (Turnip Mosaic Virus). Journal of Tropical Plant Protection. 1(1):30-38.
- Donoso, E; Lobos, G. 2008. Efecto de *Trichoderma harzianum* y compost sobre el crecimiento de plántulas de *Pinus radiata* en vivero. BOSQUE. 29(1):52-57.
- Favela, E; Preciado, P; Benavides, A. 2006. Soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México. 147p.
- FAO. 2002. Los fertilizantes y su uso. IFA, París. 84 p. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-x4781s.pdf>
- Galeano, M; Méndez, F; Urbaneja, A. 2002. Efecto de *Trichoderma harzianum* Rifai (Cepa T-22) sobre cultivos hortícolas, Kopp.ert Biological Systems, vol. 286: (65):1-11.
- Gagliano, E; Castresana, J; Díaz, B. 2016. Efectos de aplicación de mezcla de *Trichoderma harzianum* y *viridae*, *Bacillus subtilis* en lechuga sobre el rendimiento comercial. INTA. Entre Ríos, Argentina.
- Garzón, S. 2006. Evaluación del rendimiento de tres variedades de lechuga bajo el sistema NFT (*Nutrient Film Technique*) de hidroponía con dos soluciones de nutrientes. Tesis. Lic. Zamorano. Honduras.

- Ghisalberti, E; Rowland, C. 1993. Antifungal metabolites from *Trichoderma harzianum*. J. Nat. Prod. 56:1799-1804.
- Glick, B; Changping, L; Sibdas, G; Dumbroff, E. 1997. Early development of canola seedlings in the presence of the plant growth promoting rhizobacteria *Pseudomonas putida* GR12-2. Soil Biology and Biochemistry. 29:1233-1239.
- Godes, A. 2007. Perspectivas de los inoculantes fúngicos en Argentina.
- González, R. 2008. Hidroponía en NFT. Obtenido de Boletín del Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos. Disponible en: [http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP2\(10\).pdf](http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BoletinAP2(10).pdf)
- Granval, N.; Gaviola, J. s.f. Cultivo de Lechuga. Manual de Producción de Semillas Hortícolas. 23p.
- Guerrero, Revelo, Benavides, Chaves, Moncayo. 2014. Evaluación de sustratos en el cultivo de lechuga bajo un sistema hidropónico en el municipio de Pasto. Revista de Ciencias Agrícolas. Vol. 31(1): 3-16.
- Gutiérrez. 2011. Comportamiento de tres cultivares de lechuga (*Lactuca sativa* L.), evaluados al aire libre, en Valdivia. Memoria presentada como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 76p.
- Guzmán, D. 2004. Hidroponía en casa: una actividad familiar. Ministerio de Agricultura y Ganadería - MAG. San José, Costa Rica. 25p.
- Halsouet, P; Miñambres, M. 2005. La Lechuga: Manual para su cultivo en agricultura ecológica. Ficha técnica. Monográficos Ekonekazaritza, Navara, España. 16p.
- Harman, G; Howell, C; Viterbo, A; Chet, I; Lorito, M. 2004. *Trichoderma* species opportunistic, avirulent plant symbionts. Nat. Rev. Microbiol. 2:43-56.
- Hernández. 2017. Diseño, construcción y evaluación de un sistema acuapónico automatizado de tipo tradicional y doble recirculación en el cultivo de Tilapia

- Roja (*Oreochromis mossambicus*) y Lechuga Crespa (*Lactuca sativa*). Tesis Lic. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá DC, Colombia. 127p.
- Howell, C. 2002. Mechanisms employed by Trichoderma species in the biological control of plant diseases: The history and evolution of current concept. Plant disease. 4-10pp.
- Howell, R. 2003. Mechanisms employed by Trichoderma species in the biological control of plant diseases: The history and evolution of current concepts.
- Hydro Environment. 2015. La luz en tus plantas. en línea. Disponible en: http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=221
- Hung, R; Lee, S; Bennett, J. 2015. Fungal volatile organic compounds and their role in ecosystems. Appl. Microbiol. Biotechnol. 99: 3395-3405.
- Instituto Nacional de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM). 1985. Mapa del cantón de San Carlos en la provincia de Alajuela, Costa Rica. Atlas cantonal. San José, Costa Rica.
- Inca. 2013. Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero electrónico. Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú. 112p.
- Jones, JB. 2005. Hydroponics: a practical guide for the soilless grower. Ed 2. Editorial CRC Press. Boca Raton, Florida. 423p.
- Jones, J. 2012. Plant Nutrition and soil Fertility Manual. Taylor and Francis Group. Boca Raton, Florida, U.S. 282p.
- Juárez, H; De Jesús; Baca, C; Aceves, N; Sánchez, G; Tirado, T; Sahagún, C; Colinas, M. 2006. Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. Revista Interciencia 31(4): 246-253.
- Keith, R. 2003. How to hydroponics. ed4. The Futuregarden Press. Farmingdale, New York. 100p.

- Kloepper, J; Zablotowicz, R; Tipping, E; Lifshitz, R. 1991. Plant growth promotion mediated by bacterial rhizosphere colonizer. Dordrecht, The Netherlands. 315-326pp.
- La Nueva Enciclopedia Británica, UK. 2013. Hydroponics (en línea). London, UK. Consultado el: 4 ene. 2019. Disponible en <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/279000/hydroponics>.
- Lacarra, Á; García, C. 2011. Hidropónicos para la producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.) en invernadero. Trabajo de Experiencia Recepcional. Universidad Veracruzana. Veracruz, México. 49p.
- Lara, H. 2000. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. Revista Terra 17(3): 221-229.
- Lee, S; Yap, M; Behringer, G; Hung, R; Bennett, J. 2016. Volatile organic compounds emitted by Trichoderma species mediate plant growth. Fungal Biol. Biotech. 3:1-14.
- López, P; Cano, A; Rodríguez, G; Torres, N; Rodríguez, S; Rodríguez, R. 2011. Efecto de diferentes concentraciones de potasio y nitrógeno en la productividad de tomate en cultivo hidropónico. Creatividad y Desarrollo Tecnológico 5(2): 98-104.
- Lucero, J. A. 2012. Estudio de tres niveles de compost en el cultivo de la lechuga variedad repollo (*Lactuca sativa* L), en suelos andisoles. Tesis Lic. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.
- Manjarrez. 2015. Uso de microorganismos benéficos para el control de enfermedades del suelo. Revista digital AGRICULTURERS. en línea. Disponible en: <http://agriculturers.com/uso-de-microorganismos-beneficos-para-el-control-de-enfermedades-del-suelo/>
- Marín, F. 2010. Cuantificación y valoración de estructuras y procesos de producción agrícola bajo ambientes protegidos en Costa Rica. ProNAP-FITTACORI. 34p.

- Mathivanan, N; Prabavathy, V; Vijayanandraj, V. 2008. The effect of fungal secondary metabolites on bacterial and fungal pathogens. In: Karlovsky, P. (Ed.), Secondary Metabolites in Soil Ecology. Springer-Verlag, Berlin. 129-140.
- Maynard, D; Houchmuth, G. 1997. Knott's Handbook for vegetable growers. 4° Ed. Estados Unidos de América. 635p.
- Méndez. 2009. Efecto de la aplicación de *Trichoderma harzianum* y *Paecilomyces lilacinus* en el rendimiento de lechuga orgánica. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano, Honduras. AGRIS. 10: 163-170.
- Montesdeoca, N. 2009. Caracterización física, química y funcional de la lechuga rizada (*Lactuca sativa* Variedad Crispa), para la creación de una norma Técnica Ecuatoriana, por parte del Instituto Ecuatoriano de Normalización 2008. Tesis Lic. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga.
- Moreno, N; Moreno, L; Uribe, D. 2007. Biofertilizantes para la agricultura en Colombia. Biofertilizantes en Iberoamérica: una visión técnica, científica y empresarial. Denad Internacional. 38-45pp.
- Morgan. 2012. Trichoderma en los sistemas hidropónicos. Vivero Villa Mónica. Revista Urban Gardens. en línea. Disponible en: <https://viverovillamonica.blogspot.com/2012/04/trichoderma.html>
- Muñoz. 2017. Herramienta permite mejorar los resultados de la hidroponía. Revista digital El Mercurio. en línea. Disponible en: <http://www.elmercurio.com/campo/noticias/noticias/2015/12/17/una-herramienta-para-potenciar-los-resultados-de-la-hidroponia.aspx>
- OIMA. 2018. Catálogo de Productos Agrícolas: Productos de mayor comercialización en los países de los tratados de libre comercio CAFTA-RD y Panamá-EEUU. en línea. http://catalogo-oima.org/index.php?option=com_content&view=article&id=229:lechuga2&catid=32&Itemid=283&lang=es#Editar

- Onofre-Lemus, Hernández, Girard, Caballero. 2009. ACC (1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate) deaminase activity, a widespread trait in Burkholderia species, and its growth-promoting effect on tomato plants. *Applied and Environmental Microbiology* 75(20): 6581-6590
- Pereira, J; Cavalcante, A; Baldani, J; Dobereiner, J. 1988. Sorghum and rice inoculation with *Azospirillum* sp. y *Herbaspirillum seropedicae* in field. *Plant Soil* 110: 269-274.
- Peña, H; Reyes, I. 2007. Aislamiento y evaluación de bacterias fijadoras de Nitrógeno y disolventes de fosfatos en la promoción del crecimiento de la lechuga (*Lactuca sativa* L.). Caracas, Venezuela. *Interciencia*. Vol 32(8): 560-565
- Pimpini, F; Filippini, M; Gennari, A. 2000. La calidad de los productos hortofrutícolas en la filiera del consumo en fresco. Inédito. 100p.
- Piromyou, P; Buranabanyat, B; Tantasawat, P; Tittabutr, P; Boonkerd, N; Teaumroong, N. 2011. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) inoculation on microbial community structure in rhizosphere of forage corn cultivated in Thailand. *European Journal of Soil Biology*. 47: 44-54.
- Putra, P; Yuliando, H. 2015. Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: A Review. *Agriculture and Agricultural Science: Procedia* 3: 283-288.
- Quesada, R. 2007. Los Bosques de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 16 p.
- Quesada B, P. 2011. Uso de compost y arena volcánica como sustratos en un sistema hidropónico abierto para el cultivo protegido de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Tesis Lic. Ing. Agr. Costa Rica, TEC. 96p.
- Ramírez, C; Nienhuis, J. 2012. Cultivo protegido de hortalizas en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 25(2): 10-20.

- Ramos, M. 2010. Evaluación de Tres Variedades de Lechuga (*Lactuca sativa* L.), en el Sistema Hidropónico NFT bajo Invernadero en la Granja Santa Inés. Universidad Técnica de Machala. Ecuador.
- Resh, H. 1997. Cultivos Hidropónicos, nuevas técnicas de producción. Barcelona, España: Mundi – Prensa. 509p.
- Resh, H. 2001. Cultivos hidropónicos: Nuevas técnicas de producción. Mundi Prensa. Barcelona, España. 63p.
- Resh, H.M. 2013. Hobby hydroponics. 2 ed. Florida, USA, CRC Press. 136p.
- Rivera, N. 2015. Evaluación de tres variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas con la técnica hidropónica de flujo laminar de nutrientes (NFT) en el Centro Experimental de Coca Cota, La Paz. Tesis Lic. La Paz, Bolivia. Universidad Mayor de San Andrés. 105p.
- Rodríguez, A; Hoyos, M; Chang. 2002. Manual práctico de hidroponía. Tercera edición. Centro de Investigación de Hidroponía Universidad Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Rodríguez, H; Muñoz, S; Alcorta, E. 2006. El tomate rojo: sistema hidropónico. Editorial Trillas. México D.F. 81p.
- Rojas, J; Paniagua, F. 2015. Comportamiento agronómico de *Capsicum annuum* L; *Lycopersicon esculentum* M. y *Cucumis melo* L. bajo cultivo protegido hidropónico utilizando la solución universal de Steiner. Tesis Lic. San Carlos, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 98p.
- Rosas, S; Vanzini, G; Carlier, E; Pasluosta, C; Pastor, N; Rovera, M. 2009. Root colonization and growth promotion of wheat and maize by *Pseudomonas aurantiaca* SR1. Soil Biology & Biochemistry. 41:1802-1806.
- Ruíz, F; Ornelas, J; Guadalupe, I; Olivas, G; Acosta, C; Sepúlveda, D; Pérez, D; Rios, C; Salas, M; Fernández, S. 2018. Efecto de *Trichoderma* spp. y hongos fitopatógenos sobre el crecimiento vegetal y calidad del fruto de jitomate.

Revista Mexicana de Fitopatología. Vol. 36 (3). Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092018000300444

- Ryu, C; Farag, M; Hu, C; Reddy, S; Wie, H; Pare, P; Kloepper, J. 2003. Bacterial volatiles promote growth of Arabidopsis. Proc. Natl. Acad. Sci. 100: 4927-4932.
- Saavedra. 2017. Manual de producción de lechuga. Boletín INIA / N° 09. Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. San Tiago, Chile. 150p.
- Sánchez, F; González, L; Moreno, E; Reyes, J; Pineda, E. 2014. Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. Revista Fitotecnia Mexicana 37(3): 261-269.
- Santos, B; Ríos, D. 2016. Cálculo de soluciones nutritivas: en suelo y sin suelo. Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo Insular de Tenerife. España. 115p.
- Sgroy, Cassán, Masciarelli, Del Papa, Lagares, Luna. 2009. Isolation and characterization of endophytic plant growth-promoting (PGPB) or stress homeostasis-regulating (PSHB) bacteria associated to the halophyte *Prosopis strombulifera*. Applied Microbiology and Biotechnology 85:371-381.
- Siddiqui, I; Shaukat, S. 2003. Suppression of root-knot disease by *Pseudomonas fluorescens* CHA0 in tomato: importance of bacterial secondary metabolite, 2,4-diacetylphloroglucinol. Soil biology & biochemistry. 35:1615-1623.
- Someya, N; Tsuchiya, K; Sugisawa, S.; Noguchi, M; Yoshida, T. 2008. Growth promotion of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by a rhizobacterium *Pseudomonas fluorescens* strain LRB3W1 under iron-limiting condition. Environmental Control in Biology. 46(2):139-146.

- Soto, F. 2005. Producción de lechuga en técnica de la lámina de nutrientes modificada (NFT). INA. San José, Costa Rica. 38p.
- Steiner, AA. 1961. A Universal Method for Preparing Nutrient Solutions of a Certain Desired Composition. *Plant and Soil* XV(2): 134-154.
- Steiner, AA. 1968. Soilless culture. En Proc. 6th Colloq. Int. Potash Inst. Florence, Italy. 324-341pp.
- Steiner, AA. 1984. The Universal Nutrient Solution. Wageningen, Holanda. 633-650pp.
- Sutton, Peng. 1993. Biocontrol of *Botrytis cinerea* in strawberry leaves. *Phytopathol.* 83: 615-621 pp.
- Taiz, L; Zeiger, E. 2006. *Plant physiology*. ed3. Universidad Jaime I, Castellón de la plana, Valencia, España. 623p.
- Theodoracopoulos, Lardizabal, Arias. 2009. Manual de producción de lechuga. Entrenamiento y Desarrollo de Agricultores (EDA). MCA-Honduras / EDA. La Lima, Cortes, Honduras. 36p.
- Torres, O. 2014. Establecimiento de un sistema hidropónico para el cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un ambiente protegido en Líbano de Tilarán, Guanacaste. Tesis Lic. Instituto Tecnológico de Costa Rica. San Carlos, Costa Rica. 70p.
- Valencia, H; Sánchez, J; Valero, N. 2005. Producción de ácido indolacético por microorganismos solubilizadores de fosfato presentes en la rizósfera de *Espeletia grandiflora* y *Calamagrostis effusa* del Páramo el Granizo. Unibiblos, Bogotá, Colombia. 177-193pp.
- Valencia, H; Sánchez, J; Vera, D; Valero, N; Cepeda, M. 2007. Microorganismos solubilizadores de fosfatos y bacterias fijadoras de nitrógeno en páramos y región cálida tropical. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 169-183pp.

- Valero, N. 2007. Determinación del valor fertilizante de microorganismos solubilizadores de fosfato en cultivos de arroz. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- Vallejo, A; Estrada, E. 2004. Producción de hortalizas de clima cálido. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. 347p.
- Valverde, J. 2013. Establecimiento de curvas de absorción para dos tipos de lechuga bajo el sistema hidropónico de NFT modificado. Tesis Lic. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 63p.
- Vásquez, M; César, S; Azcón, R; Barea, J. 2000. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and other microbial inoculants (*Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*) and their effects on microbial population and enzyme activities in the rhizosphere of maize plants. *Applied Soil Ecology*. 15:261-272.
- Vásquez. 2015. Evaluación agronómica de cinco variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en tres ciclos de siembra consecutivos, en San Miguel de la Tigra, San Carlos, Alajuela, C.R. Tesis Lic. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 78p.
- Vega, A. 2013. Efecto del Ácido salicílico y estrés hídrico en la calidad de lechugas (*Lactuca sativa* L.) producidas en invernadero. Tesis Lic. Universidad Autónoma de Querétaro. 59p.
- Vega, Canchignia, González, Seeger. 2016. Biosíntesis de ácido indol-3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. *Cultivos Tropicales*. Vol. 37. La Habana, Cuba.. en línea. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000500005
- VelSid. 2009. Materia prima y productos, lechuga Salanova. *Gastronomía y Cia.*. Disponible en: <http://www.gastronomiaycia.com/2009/07/16/lechuga-salanova/>

- Vera, D; Pérez, H; Valencia, H. 2002. Aislamiento de hongos solubilizadores de fosfatos de la rizósfera del arazá (*Eugenia stipitata*, Myrtaceae).
- Vinale, F; Sivasithamparam, K; Ghisalberti, E; Marra, R; Woo, S; Lorito, M. 2008. Trichoderma-plant pathogens interactions. *Soil Biol. Biochem.* 40: 1-10.
- Vinodkumar, S; Indumathi, T; Nakkeeran, S. 2017. *Trichoderma asperellum* (NVT A2) as a potential antagonist for the management of stem rot in carnation under protected cultivation. *Biol. Control* 113: 58-64.
- Wanglom, Ito, Sunpapao. 2019. Volatile organic compounds emitted from endophytic fungus *Trichoderma asperellum* T1 mediate antifungal activity, defense response and promote plant growth in lettuce (*Lactuca sativa*). *Fungal Ecology*. Vol. 43.
- Wei Lin, Zhang. 2006. Effects of peptide in the fermentation liquid of *Trichoderma harzianum* on nodule microstructure and function of cowpea. *Acta Laser Biology Sinica*. 84-89.
- Wittwer, S; Castilla, N. 1995. Protected cultivation of horticultural crops worldwide. *HortTechnology* 5(1): 6-23.
- Yossen, V; Vargas, S; Díaz, M; Olmos, C. Material compostado y *Trichoderma harzianum* como supresores de *Rhizoctonia solani* promotores del crecimiento de la lechuga. 2003. Manejo integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica). 68 (19-25).
- Zambrano. 2014. Estudio comparativo de tres genotipos de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en tres sistemas de producción hidropónica. Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Guayaquil. Ecuador. 79p.
- Zárate, M. 2014. Manual de hidroponía. 1° edición. Universidad Nacional Autónoma de México. Coyoacán, Distrito Federal, México. 42p.

8. ANEXOS

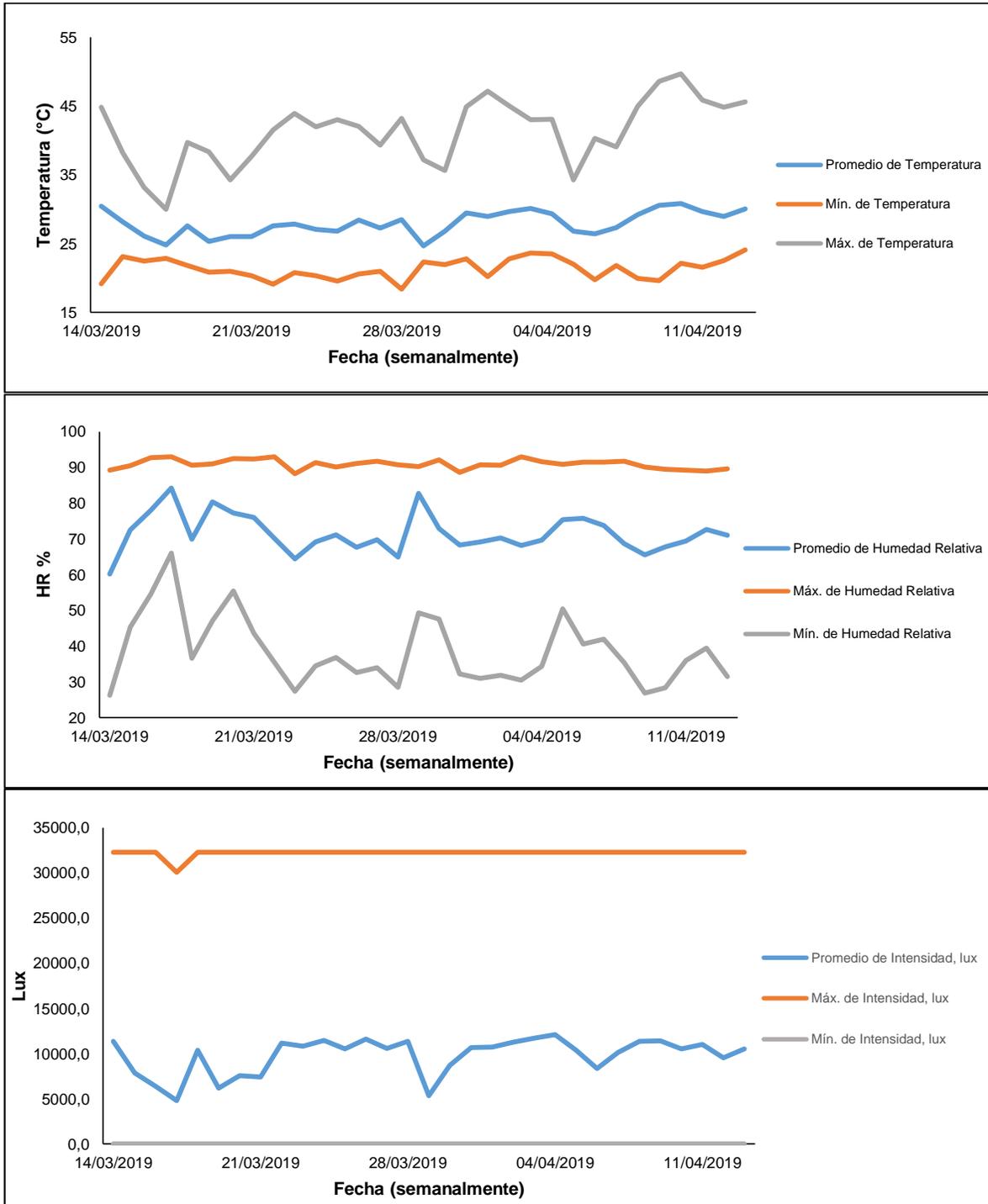
Anexo 1. Materiales empleados para elaborar una estructura piramidal de soporte de un sistema NFT modificado.

Cantidad	Materiales	Tamaño
6	Piezas de madera 2x2"	2 m
9	Piezas de madera de ½"	0,7 m
6	Piezas de madera 2x2"	0,40 m
6	Tornillos Tirafondo	3"
20	Tornillos Tirafondo	1,5"
4	Trapecios de Plywood	0,5m ²

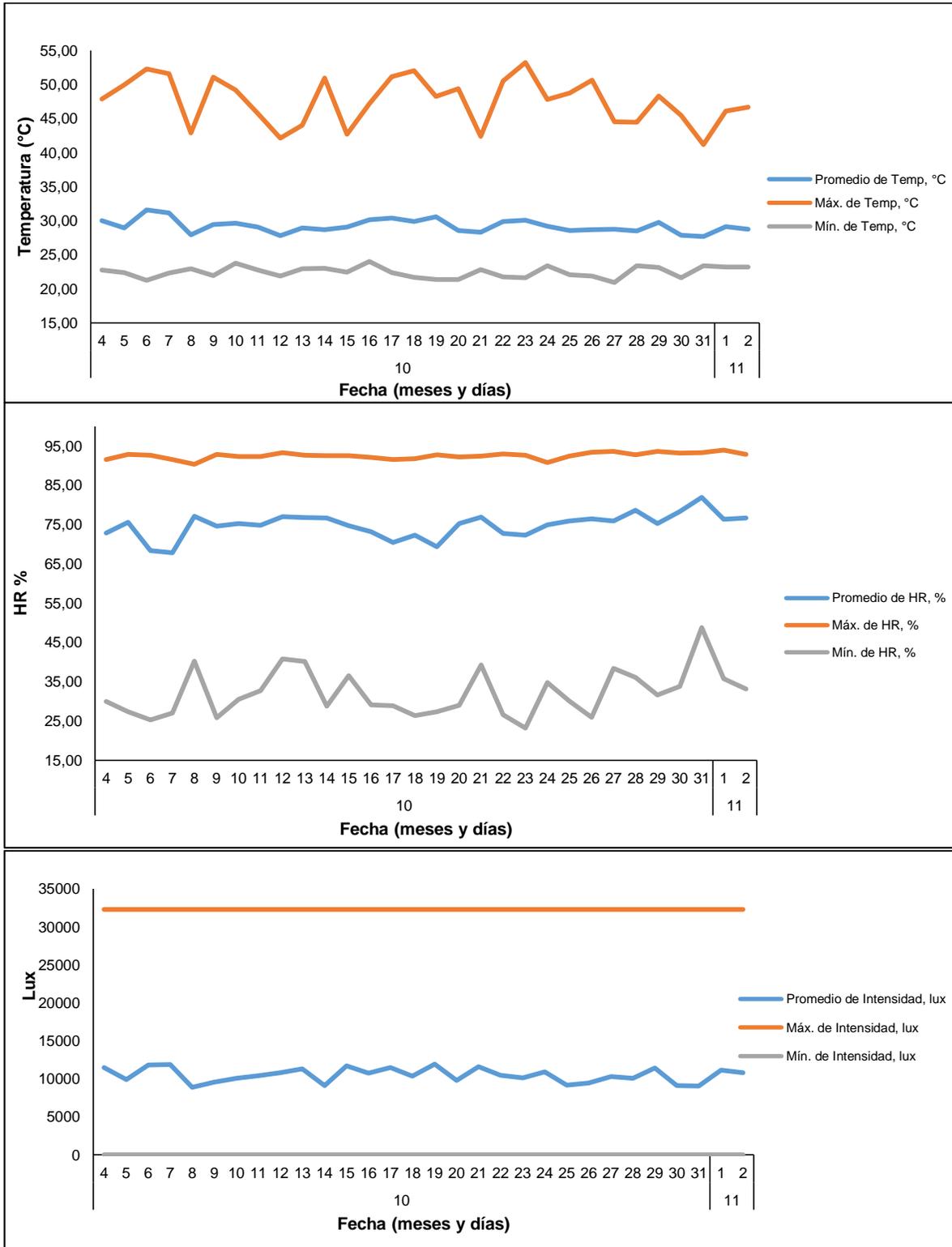
Anexo 2. Programación del timer, periodos de arranque y duración de cada ciclo de circulación.

Programa	Hora de arranque	Duración
1	06:00 a.m.	15 min
2	07:15 a.m.	15 min
3	08:30 a.m.	15 min
4	09:45 a.m.	15 min
5	11:00 a.m.	15 min
6	12:15 p.m.	15 min
7	01:30 p.m.	15 min
8	02:45 p.m.	15 min
9	04:00 p.m.	15 min
10	05:15 p.m.	15 min
11	06:30 p.m.	15 min
12	08:00 p.m.	15 min
13	09:30 p.m.	15 min
14	11:00 p.m.	15 min
15	12:30 a.m.	15 min
16	02:00 a.m.	15 min
17	03:30 a.m.	15 min
18	05:00 a.m.	15 min

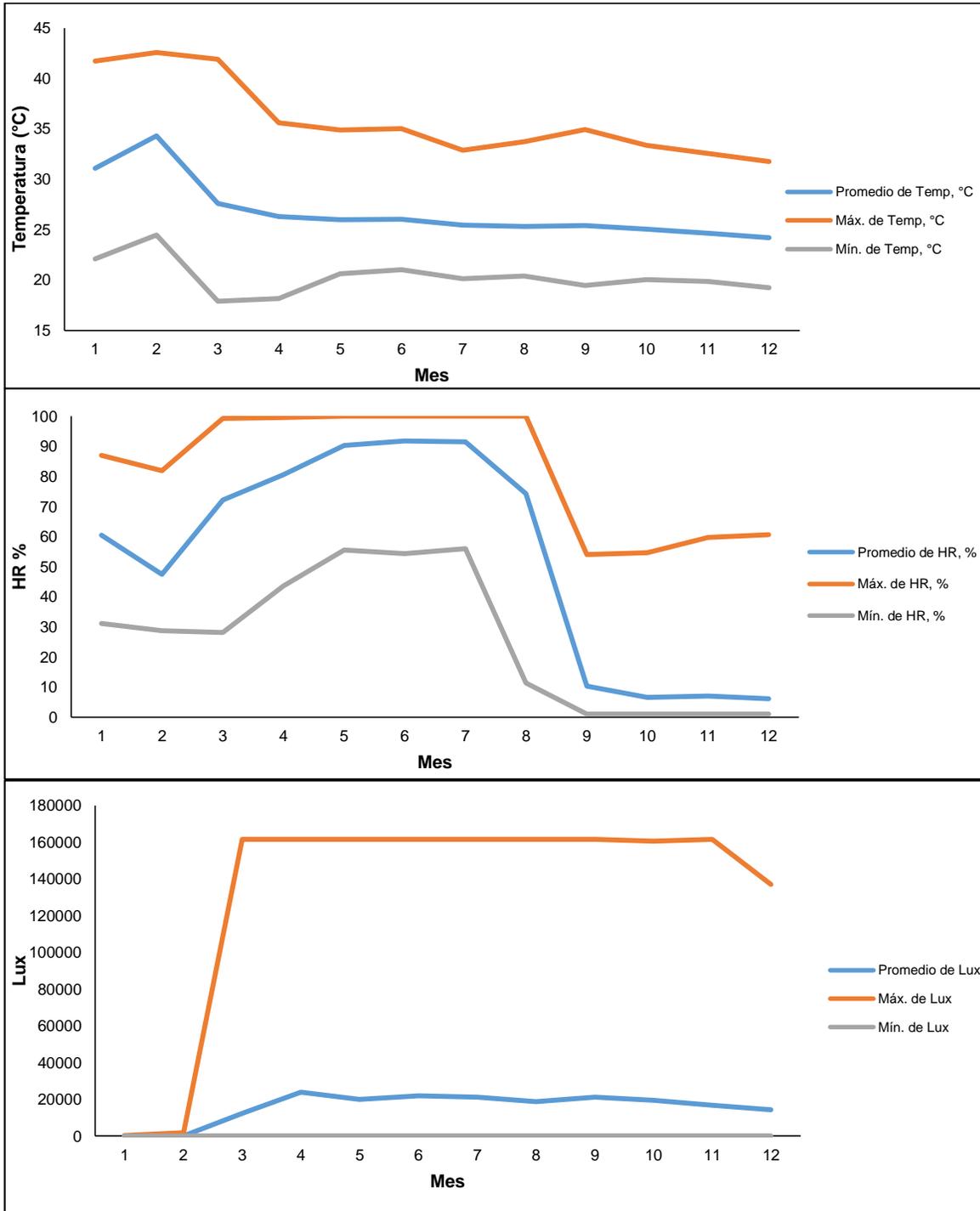
Anexo 3. Condiciones ambientales en el interior del invernadero en el Experimento 1 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.



Anexo 4. Condiciones ambientales en el interior del invernadero en el Experimento 3 del ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.



Anexo 5. Condiciones ambientales externas en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.



Anexo 6. Grados de libertad para las fuentes de variación en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Experimento	Fuente de variación	Grados de libertad
1	Tratamiento (Cultivar)	5
	Error experimental	138
	Total	143
2	Bloque	5
	Solución nutritiva	2
	Error de Solución nutritiva	10
	Cultivar	1
	Tratamiento (Solución nutritiva*Cultivar)	2
	Error experimental	15
	Total	35
3	Bloque	5
	Microorganismo benéfico	2
	Erro de Microorganismo benéfico	10
	Cultivar	1
	Tratamiento (Microorganismo benéfico*Cultivar)	2
	Error experimental	15
Total	35	

Anexo 7. Dosis, forma de aplicación y detalles generales de los productos químicos utilizados en el ensayo de hidroponía NFT modificado bajo ambiente protegido en Santa Clara, San Carlos. 2019-2020.

Producto	Definición	Dosis	Forma de aplicación	Frecuencia de aplicación
COSMO-IN d	Coadyuvante, no-iónico, surfactante, humectante dispersante, acelerador de penetración, emulsificante, controlador de espuma e indicador para pH alcalinos	1mL/80L solución nutritiva	Se vertió la dosis directo en el tanque con la solución nutritiva	Se aplicó una única vez en todos los tratamientos
KILOL LDF 100 11SL	Bactericida – Fungicida Botánico a base de extracto de semillas de cítricos.	2cc/L agua	Se preparó la dosis para la aplicación foliar por medio de una bomba manual de mochila	Se aplicó una única vez en todos los tratamientos
VANODINE* FAM	Desinfectante de Yodo con Base Ácida. Enérgico bactericida, viricida y fungicida utilizado tanto en la desinfección de instalaciones como antiséptico en animales.	1mL/1L agua	Se vertió la dosis directo en el tanque con agua	Se aplicó al final de los Experimentos 2 y 3 en todo el sistema NFT