



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**PROTOTIPO DE TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
AUTOMATIZADOS EN EL CULTIVO DE LECHUGA EN
ZONAS URBANAS**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA:

JOSÉ EDUARDO DESIDERIO LORENZO

DIRECTOR:

M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

SAN JUAN ACATENO, TEZIUTLÁN, PUEBLA, MÉXICO, MAYO DEL 2021.



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

**PROTOTIPO DE TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
AUTOMATIZADOS EN EL CULTIVO DE LECHUGA EN
ZONAS URBANAS**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA:

JOSÉ EDUARDO DESIDERIO LORENZO

DIRECTOR:

M.C. GUILLERMO JESUITA PÉREZ MARROQUÍN

ASESORES:

DR. SIGFRIDO DAVID MORALES FERNÁNDEZ

M.C. FABIEL VÁZQUEZ CRUZ

DR. RAÚL BERDEJA ARBEU

SAN JUAN ACATENO, TEZIUTLÁN, PUEBLA, MÉXICO, MAYO DEL 2021.

La presente tesis titulada: **Prototipo de tres sistemas de producción automatizados en el cultivo de lechuga en zonas urbanas** fue realizada por José Eduardo Desiderio Lorenzo y ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el grado de:

Licenciado en Ingeniería Agrohidráulica

Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias

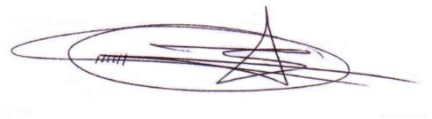
Consejo particular integrado por:

Firma

Director M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín



Asesor Dr. Sigfrido David Morales Fernández



Asesor Dr. Raúl Berdeja Arbeu



Asesor M.C. Fabiel Vázquez Cruz



El presente trabajo forma parte del Cuerpo Académico denominado: **BUAP CA-231- Manejo de Recursos Fitogenéticos** y de la Línea de Investigación: **Manejo y Conservación de Recursos Fitogenéticos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias**. Dicho trabajo, fue financiado con recursos propios.

DEDICATORIA

*Al creador de todas las cosas; que fue quien me dio la vida, permitiéndome culminar esta etapa de mi vida y hacer lo que más me gusta. **Te amo Dios.***

*A **mis padres** con mucho cariño, quienes siempre han estado conmigo apoyándome, Gracias por todo papá y mamá por brindarme su apoyo incondicional, por enseñarme el verdadero sentido de la vida, por haberme inculcado valores como el respeto, la humildad y sobre todo disciplina, además de buscar a diario la superación personal.*

*A **mis hermanos** Javier, Tomas, Cirino, Maricarmen y Gabriel, quienes fueron una fuente de inspiración para lograr este objetivo, además me enseñaron a superar cualquier obstáculo y demostrarme que a pesar de las circunstancias siempre estaremos unidos.*

A mis amigos Tomas, Yohan y Elías quienes fueron una fuente de apoyo y en especial a mi amigo Oscar Iván Alfonso Ruiz por apoyarme en cada etapa de esta investigación.

A todas las personas que he conocido a lo largo de mi vida, por compartir buenos momentos conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento:

A la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias (FCAyP) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Además agradezco a los docentes por transmitirme de sus conocimientos para mi formación profesional.

Al M.C. Guillermo Jesuita Pérez Marroquín, por el interés y apoyo para culminar esta investigación, además por brindarme su amistad y ayudarme a crecer como persona.

Al Dr. Sigfrido David Morales Fernández, al M.C. Fabiel Vázquez Cruz, al Dr. Raúl Berdeja Arbeu por su colaboración y asesoría para la elaboración de esta tesis.

A todas las personas que tuve el gusto de conocer durante mi estancia, de manera muy especial quiero agradecer al Dr. Juan Manuel Barrios Días por transmitirme de sus conocimientos y el buen gusto por los cultivos hidropónicos.

A los docentes Dra. Delia, Dr. Refugio, Dr. Luis Antonio, Ing. Espejel, por transmitirme de sus conocimientos y su calidad humana.

GRACIAS

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
INDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos	2
III. HIPÓTESIS	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Agricultura urbana	4
4.2 Investigaciones de producción en prototipos automatizados de zonas urbanas	4
4.3 Sistemas de producción sin suelo	5
4.3.1 Sistema NFT.....	5
4.3.2 Sistema de raíz flotante	5
4.3.3 Sistema aeropónico	6
4.4 Generalidades del cultivo de lechuga	6
4.4.1 Origen de la lechuga.....	6
4.4.2 Descripción botánica	6
4.5 Requerimientos edafoclimáticos.....	7
4.5.1 Temperatura	7
4.5.2 Humedad relativa y concentración de CO ₂	7
4.5.3 Luz.....	7
4.6 Solución nutritiva.....	7
4.6.1 Potencial de hidrogeno (PH)	8
4.6.2 Conductividad eléctrica (CE).....	8
4.6.3 Oxígeno disuelto	9
4.6.4 Temperatura	9
4.7 Sistemas de iluminación artificial.....	9

4.7.1 La radiación solar y las radiaciones luminosas	9
4.7.2 Relación de la luz y el desarrollo de las plantas.....	9
4.7.3 Calidad de luz.....	10
4.7.4 Espectro electromagnético y luz visible.....	10
4.7.5 Fotosíntesis.....	10
4.7.6 Radiación fotosintéticamente activa (PAR)	10
4.7.9 Duración de luz	10
4.7.10 Fotoperiodo y punto de saturación lumínica	10
4.7.11 Cantidad de luz.....	11
4.7.12 Medición de luz.....	11
4.7.13 Luz diaria integrada (DLI)	12
V. MATERIALES Y MÉTODOS	13
5.1 Localización del área de estudio	13
5.3 Primera etapa	14
5.3.1 Desarrollo del sistema automatizado.....	14
5.3.2 Obtención, Control y procesamiento de los datos:.....	14
5.3.3 Sensores utilizados	14
5.3.4 Sistema de iluminación	16
5.3.5 Diseño y Construcción del módulo de producción	16
5.4 Segunda etapa	18
5.4.1 Material biológico	18
5.4.2 Solución nutritiva	19
5.5 Tercera etapa.....	19
5.5.1 Diseño experimental.....	19
5.5.2 Variables evaluadas.....	20
5.5.3 Análisis estadístico.....	21
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
6.1 Funcionamiento del módulo	22
6.2 Programa creado para el monitoreo y control del modulo.....	23
6.3 Respuesta de los sensores empleados	24
6.3.1 Temperatura y humedad relativa.....	24

6.3.2 Temperatura de la solución nutritiva.....	25
6.3.3 Potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica.....	25
6.4 Absorción nutrimental	27
6.5 Análisis de varianza de las principales características morfológicas en lechuga	29
6.6 Rendimiento y biomasa del cultivo de lechuga	30
6.7 Variables morfológicas	31
VII. CONCLUSIÓN.....	33
VIII. LITERATURA CITADA	34
IX. ANEXOS	40

INDICE DE CUADROS

Contenido	Página
Cuadro 1. Cantidad de fertilizantes empleados para la solución nutritiva para preparar 1000 litros de solución	19
Cuadro 2. Cuadro medio del análisis de varianza para las variables de fenología, biomasa y el rendimiento en el cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) bajo condiciones de laboratorio	29
Cuadro 3. Comparación de medias para las variables de rendimiento y biomasa en el cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) bajo condiciones de laboratorio	30
Cuadro 4. Comparación de medias para las variables morfológicas en el cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) bajo condiciones de laboratorio	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pagina
Figura 1. Localización del área de estudio	13
Figura 2. Longitud de onda obtenida con la combinación de leds en nuestro prototipo de producción.....	16
Figura 3. Diseño del prototipo de producción modelado en Sketchup Versión 20.1	18
Figura 4. Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) 15 días después del trasplante al tratamiento NFT	18
Figura 5. Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) a 60 días después del trasplante	21
Figura 6. Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) a 60 días después del trasplante producida bajo el prototipo a una intensidad de luz de 5000 a 12200lux.....	21
Figura 7. Evaluación del prototipo de producción	22
Figura 8. Panel de control del sistema automatizado para el control y monitoreo del prototipo	23
Figura 9. Datos de temperatura y humedad relativa obtenidos con el sensor DHT11 durante todo el ciclo del cultivo	24
Figura 10. Datos de temperatura de la solución nutritiva obtenidos por el sensor ds18b20 durante el ciclo del cultivo	25
Figura 11. Datos de conductividad eléctrica y potencial hidrogeno obtenidos de la solución nutritiva	26
Figura 12. Distribución de la luz en los diferentes tratamientos del prototipo de producción.	27
Figura 13. Absorción total de macronutrientes del cultivo de lechuga a 60 días después del trasplante	28
Figura 14. Absorción total de micronutrientes del cultivo de lechuga a 60 días después del trasplante	28

RESUMEN

El principal uso del agua es el agrícola, actualmente el crecimiento demográfico está ejerciendo una presión sobre los recursos agua y suelo, además del crecimiento demográfico se estima que en cara al año 2050 el 63% de las personas en el mundo viva en zonas urbanas, ante estas problemáticas se busca encontrar métodos de producción que sean eficientes en el uso de estos recursos naturales, la producción de cultivos sin suelo nos permite un mayor ahorro en los recursos hídricos. El objetivo de la presente investigación fue diseñar y construir un prototipo de producción de cultivos para ser utilizado principalmente en zonas urbanas, en el cual se pudo evaluar tres sistemas de producción (Técnica de la película del nutriente, Raíz flotante y Aeropónico) teniendo como material vegetativo el cultivo de Lechuga tipo italiana (*Lactuca sativa L.*). Para ello, se llevó a cabo un ensayo bajo el diseño de bloques completamente al azar con nueve repeticiones por tratamiento en condiciones de laboratorio empleando como fuente de energía leds de espectro completo, donde se midieron variables como temperatura ambiental, humedad relativa, temperatura de la solución nutritiva, conductividad eléctrica y potencial de hidrogeno. Se evaluó el peso fresco de hojas y raíz, peso seco de hojas y raíz, altura de la planta, numero de hojas, longitud de raíz y contenido de macro y micro elementos, Teniendo como resultado que en el sistema de la técnica de la película del nutriente se obtuvo una diferencia significativa del cultivo en todas las variables evaluadas en comparación de los sistemas de raíz flotante y aeropónico.

Palabras clave: *Lactuca sativa L.*, espectro de luz, NFT, Luxómetro.

ABSTRACT

The main use of water is agricultural, currently population growth is putting pressure on water and soil resources, in addition to population growth it is estimated that by the year 2050 63% of people in the world will live in urban areas, given these problems we seek to find production methods that are efficient in the use of these natural resources, the production of crops without soil allows us greater savings in water resources. The objective of this research was to design and build a crop production prototype to be used mainly in urban areas, in which three production systems (nutrient film technique, floating root and aeroponic) were evaluated using Italian lettuce (*Lactuca sativa* L.) as vegetative material. For this purpose, a completely randomized block design trial with nine replications per treatment was carried out under laboratory conditions using full spectrum leds as energy source, where variables such as environmental temperature, relative humidity, nutrient solution temperature, electrical conductivity and hydrogen potential were measured. The fresh weight of leaves and root, dry weight of leaves and root, plant height, number of leaves, root length and content of macro and micro elements were evaluated. As a result, in the nutrient film technique system, a significant difference was obtained in all the variables evaluated in comparison with the floating root and aeroponic systems.

Key words: *Lactuca sativa* L., light spectrum, NFT, Luxometer.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el 55 % de la población en el mundo viven en ciudades. Según el nuevo informe de la Organización de las Naciones Unidas, se estima que esta proporción aumentará hasta un 13 % de cara al año 2050 (ONU, 2018), por lo que la agricultura necesitará incrementar su producción un 60 % a nivel global, y un 100 % más en países en desarrollo, lo anterior provocará que el grado de presión sobre los recursos agua y suelo aumenten exageradamente (FAO, 2011).

Además del crecimiento demográfico mundial, se tiene que proteger y mejorar el uso de recursos naturales al mismo tiempo que se aumente la efectividad de ellos. En relación a esto, el tema de la pérdida de alimentos ha recibido gran atención como una de las características cruciales de los sistemas alimentarios ineficientes a nivel mundial, reducir la pérdida de alimentos a lo largo de la producción y las cadenas de suministro, incluidas las pérdidas post cosecha (FAO, 2016).

En este contexto se requiere el desarrollo de nuevas tecnologías que busquen satisfacer la demanda de alimentos actual y en un futuro, impulsando a la población de zonas urbanas a producir sus propios alimentos.

Una alternativa para impulsar la agricultura urbana, es la implementación de modelos de producción automatizados, en los cuales el usuario solo tenga que invertir una pequeña parte de su tiempo.

La hidroponía nos permite cultivar alimentos en cualquier lugar, en grandes ciudades se está implementando el uso de luz artificial para sustituir la luz solar.

Actualmente se han tenido grandes avances con la tecnología LED (Diodo Emisor de Luz) en la aplicación de la agricultura urbana, ya que emiten luz brillante y de larga duración con un bajo consumo energético (Yeh y Chung, 2009).

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de tres sistemas de producción automatizado en el cultivo de lechuga en zonas urbanas.

2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el funcionamiento del sistema automatizado para el control y monitoreo del prototipo.
2. Analizar las diferencias estadísticas de tres sistemas de producción.
3. Evaluar variables morfológicas, materia seca, rendimiento del cultivo y absorción de macronutrientes y micronutrientes, en los tres sistemas de producción.

III. HIPÓTESIS

El sistema automatizado para zonas urbanas permite obtener una adecuada producción de lechuga con estándares de calidad acordes al mercado.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Agricultura urbana

En la actualidad es de gran importancia retomar los conceptos y actividades agrícolas en zonas urbanas debido al alto grado de crecimiento poblacional que existen en el país y a nivel mundial, Brechelt (2004) menciona a la agricultura urbana como una técnica creada para ciudades; es una forma alternativa de producción y distribución de alimentos que aprovecha los recursos locales disponibles para generar productos de autoconsumo.

En México existen agencias conocidas encargadas de atender problemas del abastecimiento de alimentos agrícolas tal como menciona la FAO (2018), con un incremento continuo de la población en el mundo (casi 821 millones de personas padecieron hambre en 2018).

También existe una problemática de producción en el campo es reportado por la FAO en el (2010) donde indica que ya no hay más tierra cultivable disponible y que de los 1,5 billones de hectáreas en cultivo –sin contar tierras marginales–, cada año se pierden por diferentes causas de 5 a 7 millones de hectáreas.

4.2 Investigaciones de producción en prototipos automatizados de zonas urbanas

El instituto de tecnología de Massachusetts desarrollo la iniciativa de agricultura de interior en la cual crean pequeños espacios para producir alimentos en ciudades, sus avances han sido muy grandes han permitido desarrollar un software de producción donde el productor solo indica las necesidades del cultivo y el propio sistema crea las que requiere la planta (Harper, 2015).

En 2004 la compañía AeroFarms inicio la construcción y operación de granjas de producción de alimentos en zonas urbanas con el fin de garantizar la producción local y ofrecer hortalizas frescas. Ellos emplean luces LED para crear una receta de luz específica para cada planta, dando a las plantas exactamente el espectro, la intensidad y la frecuencia que necesitan para la fotosíntesis de la manera más eficiente en energía posible. Esta iluminación diseñada nos permite controlar el tamaño, la forma, la textura, el color, el sabor y la nutrición con una precisión nítida y una mayor productividad (Rosenberg, 2005).

Por otro lado, la empresa Block farms crea espacios de producción utilizando contenedores especializados, capaces de implementarse en prácticamente cualquier lugar, esto incluye la capacidad de llevar la agricultura a las grandes ciudades, y también a zonas que naturalmente no están destinadas para este propósito como zonas áridas, gracias a la capacidad de climatización controlada de los contenedores que implementan (Alabi, 2007).

Los contenedores incorporan los componentes necesarios para el control de todo el proceso de cultivo de productos, tales como iluminación led, controles automáticos de parámetros adaptados al tipo de cultivo que se requieran, como la temperatura, humedad, CO₂, fertilización y hasta riego (Alabi, 2007).

4.3 Sistemas de producción sin suelo

Por cultivo sin suelo, se entiende cualquier sistema que no emplea el suelo para su desarrollo, Desde un punto de vista práctico, los cultivos hidropónicos pueden clasificarse en: cultivos hidropónicos (Cultivo en agua más nutrientes o sobre materiales inertes) y cultivos en sustrato (cultivo sobre materiales químicamente activos, con capacidad de intercambio catiónico) (Abad *et al.*, 2005).

4.3.1 Sistema NFT

El sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique), es una de las técnicas más utilizadas en la hidroponía, la cual se basa en la circulación continua o intermitente de una fina lámina de solución nutritiva a través de las raíces del cultivo, sin que éstas por tanto se encuentren inmersas en sustrato alguno, sino que simplemente quedan sostenidas por un canal de cultivo (Castañeda, 1997).

4.3.2 Sistema de raíz flotante

El Sistema de Raíz Flotante, es un método de producción hidropónica que consiste en desarrollar cultivos en agua con una solución nutritiva, sobre una placa de unigel u otro material similar; excluyendo el uso de cualquier tipo de sustrato. Los cultivos desarrollados en un sistema de raíz flotante se caracterizan por el significativo ahorro en el uso de agua, entre 60-70% (Pizarro *et al.*, 2019).

4.3.3 Sistema aeropónico

La Aeroponía es una técnica de cultivo moderno, por medio de la cual una planta se desarrolla en un entorno aéreo, las sustancias nutritivas para su adecuado crecimiento se obtienen de un sistema de aspersión continua de nutrientes, aplicados directamente a la raíz de la planta, sin hacer uso del suelo y sin estar sumergida en ningún tipo de sustrato (Rosas, 2012).

4.4 Generalidades del cultivo de lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa L.*), en sus diferentes formas y colores, es una de las hortalizas más comunes y consumidas en todo el mundo, aunque su principal producción se concentra en zonas más templadas y subtropicales. En la actualidad se cultiva al aire libre e invernaderos, en suelo o en forma hidropónica; esta última evita las limitaciones que provocan las condiciones climáticas, luminosas y de suelo (Kesseli, 1991).

4.4.1 Origen de la lechuga

Antes de la domesticación por los humanos, la lechuga crecía de manera silvestre. Aún no está claro qué especies participaron en la evolución que condujo a la lechuga moderna. Pero hay certera evidencia de que *Lactuca serriola* es uno de los ancestros directos, dado que los cromosomas entre *L. sativa* y *L. serriola* son muy similares morfológicamente y no tienen problemas en cruzarse libremente (Kesseli, 1991).

4.4.2 Descripción botánica

La lechuga es una planta anual autógena, que posee una raíz pivotante, relativamente gruesa en la corona que se adelgaza gradualmente en profundidad, la cual puede alcanzar más de 60 cm de profundidad. La mayor densidad de raíces laterales está cerca de la superficie; por lo tanto, la absorción de nutrientes y agua ocurre mayormente en los niveles superiores del suelo (Jackson, 1995).

Las hojas sésiles están distribuidas en forma de espiral, en una roseta densa alrededor de un tallo corto. El desarrollo de la roseta puede continuar durante el periodo vegetativo de la planta como es en el caso de las lechugas de hoja, o formar una cabeza redondeada como en las escarolas y butterhead, o una cabeza elongada como en el caso de Costinas o Romanas (Jackson, 1995).

4.5 Requerimientos edafoclimáticos

4.5.1 Temperatura

La lechuga es una hortaliza que se cultiva especialmente en regiones templadas y subtropicales. Las condiciones óptimas de temperatura a campo abierto son 17 a 22 °C durante el día y 3 a 12 °C durante la noche (Thompson *et al.*, 1998), como temperatura máxima de crecimiento se puede considerar los 30 °C y como mínima de hasta -1 °C (Jaques y Hernández, 2005).

Bajo condiciones controladas el cultivo de lechuga requiere a partir de los 25 días después del trasplante una temperatura de 22 a 26 °C y posteriormente de 20 a 24 °C hasta la cosecha (Choi *et al.*, 2000).

4.5.2 Humedad relativa y concentración de CO₂

Para el caso de la humedad relativa del ambiental (HR) y concentración de CO₂ los valores recomendados para la producción de cultivo bajo condiciones de interior oscilan desde el 30 % hasta 80 % y de 400ppm hasta 2000 ppm respectivamente (Park *et al.*, 2012)

4.5.3 Luz

Su requerimiento mínimo de intensidad de luz en condiciones de campo abierto es de 107.67 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y un fotoperiodo de 14 a 15 horas luz, bajo condiciones de producción con luz artificial, se requiere una intensidad de luz entre los 200 a 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y un fotoperiodo de 18 y 16 horas respectivamente para obtener una luz integral diaria (LID) mínima de 12 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ y óptima de 17 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ (Yoon y Choi, 2011).

4.6 Solución nutritiva

Una solución nutritiva (SN) consta de agua adicionada de todos los nutrientes esenciales en forma iónica para las plantas y, eventualmente, de algunos compuestos orgánicos tales como los quelatos de fierro y de algún otro micronutriente que puede estar presente (Steiner, 1968).

La solución nutritiva es el medio por el cual las plantas en sistemas hidropónicos obtienen los nutrientes, pero planta no absorbe los nutrientes en la misma cantidad durante su ciclo, ya que lo hace dependiendo la etapa fenológica y las condiciones climáticas en las que se

encuentre, por lo que el equilibrio iónico de la solución nutritiva se adapta al ritmo de absorción de la planta (Adams, 1994).

4.6.1 Potencial de hidrogeno (PH)

El pH o potencial de Hidrógeno se refiere a la concentración de iones de Hidrogeno (H^+), los cuales determinan el grado de acidez o alcalinidad de una solución.

El pH apropiado de la solución nutritiva para el desarrollo de los cultivos se encuentra entre los valores 5.5 y 6.5; sin embargo, el pH de la solución nutritiva no es estático, ya que depende del CO_2 en el ambiente, de que la solución se encuentre en un contenedor cubierto o descubierto, del ritmo de absorción nutrimental y de la fuente nitrogenada utilizada (De Rijck y Schrevens, 1998).

Steiner (1968), menciona que en una verdadera solución nutritiva se tienen todos los iones en forma libre y activa y que el pH es importante para determinar la disponibilidad de algunos iones; así, por ejemplo, en un pH alto no es posible tener un contenido alto de iones Ca y PO_4 , debido a la posible precipitación de ambos en forma de compuestos poco solubles del tipo del $CaHPO_4$.

El pH es importante para favorecer la presencia de la forma química H_2PO_4 que es la forma del fósforo más fácilmente absorbida por las plantas (Marschner, 1995).

4.6.2 Conductividad eléctrica (CE)

Una de las variables a considerar para el cuidado de los cultivos es la conductividad eléctrica de la solución nutricional. Cuanto más elevada sea la concentración de sales disueltas, mayor será la conductividad eléctrica, por lo que, si ésta se eleva excesivamente, la planta puede sufrir déficit hídrico, semejante al que se produce en condiciones de sequía (Texier, 2013).

La conductividad eléctrica refleja la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica, y está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas y con la cantidad Total de Sólidos Disueltos (TDS), es decir principalmente sales minerales (Texier, 2013).

4.6.3 Oxígeno disuelto

Un déficit de oxígeno en la solución recirculante reduce la permeabilidad de las raíces y limita la absorción de agua y nutrientes, con efectos negativos en el rendimiento de los cultivos crecidos en sistemas sin suelo (Vestergaard, 1984).

Zheng *et al.* (2007) indican que un ambiente radical bien oxigenado es esencial para la salud del sistema radical y la prevención de enfermedades radicales.

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

4.6.4 Temperatura

La disponibilidad de oxígeno está muy relacionada con la temperatura, la estrecha correlación entre ella es inversa, de forma que en una disolución nutritiva disminuye el oxígeno disuelto conforme aumenta de temperatura, mientras que el efecto contrario ocurre con la capacidad de difusión del mismo, por lo que en parte estos fenómenos se compensan sin llegar a equilibrarse (Morard y Silvestre, 1996).

4.7 Sistemas de iluminación artificial

4.7.1 La radiación solar y las radiaciones luminosas

El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en nuestro planeta, libera una gran cantidad de energía que sale hasta la superficie visible del Sol (fotosfera), y escapa en forma de rayos solares al espacio exterior. Más concretamente, hasta la Tierra llega una cantidad de energía solar equivalente a $1,7 \times 10^{14}$ KW, o lo que es lo mismo 10.000 veces el consumo energético mundial (CER, 2014).

4.7.2 Relación de la luz y el desarrollo de las plantas

Las plantas requieren luz a través de toda su vida, desde la germinación hasta la floración y la producción. Así la luz es una onda electromagnética que viaja a través del espacio como paquetes de energía discreta, llamada fotones. Esta puede ser medida de distintas formas, cada fotón tiene una longitud de onda específica y un nivel de energía (Roldán, 2012).

4.7.3 Calidad de luz

Se refiere a la distribución espectral de la radiación, donde la porción de emisión está en azul, verde, rojo, y otra región visible e invisible de longitud de onda. Para la fotosíntesis, las plantas responden mejor a luz roja y azul. La distribución espectral de la luz también afecta la forma, desarrollo y floración (foto morfogénesis) (Singh *et al.*, 2014).

4.7.4 Espectro electromagnético y luz visible

La región del espectro electromagnético que es captada por el ojo humano tiene longitudes de onda de los 400 nm hasta los 740 nm, estas longitudes controlan diversos aspectos como el crecimiento y el desarrollo (Martin *et al.*, 2010).

4.7.5 Fotosíntesis

Las plantas utilizan el espectro de luz similar al que capta el ojo humano, pero a diferencia de los humanos, éstas captan principalmente la luz roja y la luz azul (Plenet *et al.*, 2000).

La molécula que es capaz de absorber la luz solar y utilizar su energía para transformar el agua y el dióxido de carbono en oxígeno y moléculas orgánicas complejas es la clorofila. A Este proceso se le denomina fotosíntesis (Plenet *et al.*, 2000).

4.7.6 Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

Las plantas poseen fotosensibilidad en la que solo una parte de la luz visible interviene en la fotosíntesis esta asimilación de luz o zona PAR es en el rango de 400 – 700 nm, y solo el 45-50% de la energía recibida es aprovechada (Castilla, 2005). La radiación PAR es la energía que participa en la producción de biomasa (Plenet *et al.*, 2000).

4.7.9 Duración de luz

También conocido como fotoperiodo, principalmente afecta la floración. El tiempo de floración en las plantas, puede ser controlado regulando el fotoperiodo, es decir, el tiempo de luz que reciben las plantas (Curtis *et al.*, 2008).

4.7.10 Fotoperiodo y punto de saturación lumínica

El fotoperiodo es describe como tiempo de exposición de los cultivos a la luz solar, este se determina por la ubicación geográfica y la estación del año. El fotoperiodo influye en procesos importantes de los cultivos. Aunque el fotoperiodo se ve limitado por lo que se conoce como

punto de saturación lumínica en el cual la planta no podrá tener más fotosíntesis y llegará un momento que se mantendrá en un nivel estable y no podrá sobrepasar cierto límite, aunque apliquemos más horas de luz, no habrá un incremento en la producción (Jackson, 2009).

Hay que decir que el este punto de saturación lumínica no solo entra en juego el factor luz, sino que hay otras variables como la cantidad de CO₂, parámetros ambientales (temperatura-humedad), intensidad luz, color de la luz y estado hídrico de la planta que influyen en la determinación de este punto (Jackson, 2009).

Según Maroto (2005) las plantas se clasifican en respuesta al fotoperiodo, en tres grandes grupos:

- Plantas de días cortos.
- Plantas de días largos.
- Plantas neutras.

4.7.11 Cantidad de luz

Es el número de partículas llamadas fotones y principal parámetro que afecta la fotosíntesis, una reacción fotoquímica dentro de los cloroplastos de las células de las plantas en el que la energía lumínica se utiliza para convertir el CO₂ atmosférico en carbohidratos, de aquí se desprenden dos variables, la intensidad de luz y la luz total diaria, comúnmente conocida como (Daily light integral) (Singh *et al.*, 2014).

4.7.12 Medición de luz

Las unidades más comunes para medir la luz son pie-candela (Estados Unidos) y lux (Europa). Es importante para los productores conocer las limitaciones de estas unidades. Ambas proveen una intensidad de luz instantánea en el momento en que se está tomando la medición, así esta única medición no representaría con precisión la cantidad de luz que las plantas reciben durante el día ya que los niveles naturales de luz cambian continuamente de la hora del día y la estación del año (Torres y López 2015).

4.7.13 Luz diaria integrada (DLI)

Luz diaria integrada (DLI) es la cantidad de PAR recibida cada día como función de la intensidad de luz (luz instantánea: $\mu\text{mol.m}^2.\text{segundo}$) y duración por día. Esta unidad es expresada en moles de luz por metro cuadrado por día ($\text{mol.m}^2.\text{dia}$), El concepto de DLI es similar a un pluviómetro. De la misma manera que el pluviómetro recolecta el total de lluvia en un lugar específico durante un periodo de tiempo, así también DLI mide el total de PAR recibido en un día (Torres y López, 2012).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización del área de estudio

La investigación se realizó en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ciencias Agrícolas y pecuarias (FCAyP), localizada en la región nororiental del Estado de Puebla, en la junta auxiliar de San Juan Acateno, perteneciente al Municipio de Teziutlán, Puebla (Figura 1). El laboratorio se encuentra ubicado a $19^{\circ}52'32''$ latitud norte y $97^{\circ}21'36''$ longitud Oeste, a una altitud de 1675 msnm (INEGI, 2015).

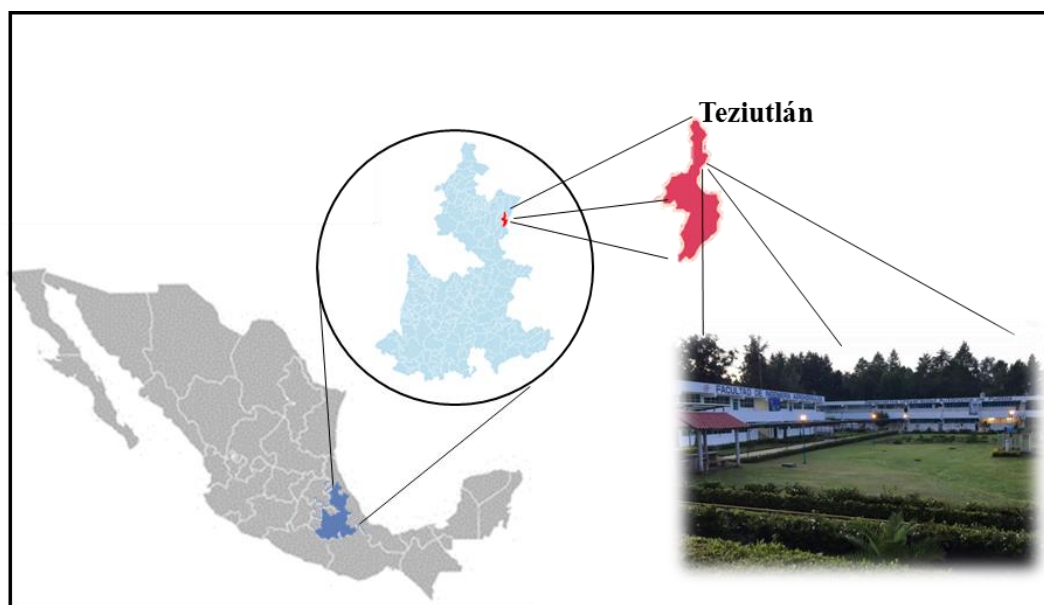


Figura 1. Localización del área de estudio

5.2 Etapas de la investigación

El desarrollo de esta investigación se realizó en 3 etapas. La primera de ellas consistió en la construcción del módulo de producción, en esta etapa se desarrolló e implementó un sistema de monitoreo de variables climáticas por medio de sensores y un sistema de control automático de encendido/apagado de lámparas LED y de la bomba hidráulica, así como el diseño y construcción de 3 sistemas de producción los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera, en la parte superior se estableció el sistema NFT (Nutrient film technique) por sus siglas en inglés, en la parte central el sistema de raíz flotante y en la parte inferior el sistema aeropónico.

La segunda etapa consistió en establecer y evaluar el cultivo de lechuga bajo los tres tratamientos, y la tercera etapa consistió en la evaluación de los datos obtenidos durante el crecimiento y desarrollo de la lechuga, así algunos estudios que se le hicieron posteriores a la cosecha.

5.3 Primera etapa

5.3.1 Desarrollo del sistema automatizado

El sistema que se desarrolló tiene como objetivo el cuidado adecuado del cultivo que depende de diferentes variables y condiciones del entorno en el cual se desarrollan las plantas. En base a esto el éxito depende de lograr mantener los niveles óptimos de cada una de estas condiciones el mayor tiempo posible durante su crecimiento y desarrollo. Estos incluyen la luz recibida por la planta, control de humedad, temperatura ambiental, CE, pH, nutrientes y temperatura del agua.

5.3.2 Obtención, Control y procesamiento de los datos:

Para el control de los sensores se utilizaron dos microcontroladores ATmega2560 quienes fueron los encargados de recibir los datos de los sensores y a su vez mandarlos a una placa madre, esta placa proceso los datos en un software llamado LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), y nos entregó los datos en forma gráfica y analógica, además el software se encargó de hacer los procesos para el control del módulo de forma automatizada y remota.

5.3.3 Sensores utilizados

Los sensores utilizados para la obtención y el monitoreo del módulo fueron programados en dos microcontroladores independientes, el primero se encargó del registro de las lecturas ambientales como temperatura, humedad relativa, y lecturas de la solución nutritiva tales como cantidad, temperatura, potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica. El segundo microcontrolador se encargó de controlar 8 relevadores mediante los cuales se ejecutaba el encendido y apagado del sistema de iluminación y del sistema de riego.

5.3.3.1 Sensor de temperatura y humedad relativa

Utilizado para monitorear la temperatura y humedad dentro del laboratorio se emplearon 2 sensores modelo DHT11. Los rangos de medida que maneja este sensor son; de 20-90% para la humedad relativa, con una precisión de $\pm 0.5\%$ y $\pm 1^\circ \text{C}$ para la temperatura. El tiempo de respuesta para la programación fue de 1500 milisegundos.

5.3.3.2 Sensor de temperatura

El sensor utilizado para monitorear la temperatura de la solución nutritiva fue el modelo ds18b20, los rangos de medición de este sensor son de -50 a 125°C , con una precisión de ± 0.5 grados.

5.3.3.3 Sensor ultrasónico

Este sensor fue utilizado para medir la cantidad de agua disponible en el módulo, este sensor tiene un margen de error de 3 milímetros, para la programación de este sensor se requirió de sacar el volumen del contenedor.

5.3.3.4 Sensor de potencial de hidrogeno

El sensor utilizado para medir el Potencial de hidrogeno de la solución nutritiva fue el modelo PH-4502C que funciona con ayuda de un electrodo E201-BNC por medio de un conector BNC. El voltaje de alimentación es de 5V lo cual lo hace compatible con microcontroladores. El rango de detección es de 0- 14, con una variable de respuesta de 2500 milisegundos. Para la calibración de este sensor fue necesaria una solución buffer de 4.00 y 7.00.

5.3.3.5 Sensor de conductividad eléctrica

El sensor empleado para determinar la conductividad eléctrica fue el sensor TDS meter el cual nos entregó valores en $\mu\text{S cm}^{-1}$ con un rango de error de $\pm 0.5\%$, para la calibración de este sensor fue necesaria una solución buffer a una concentración de $12880 \mu\text{S cm}^{-1}$.

5.3.4 Sistema de iluminación

Para el sistema de iluminación se utilizaron por cada tratamiento dos leds de espectro completo de 50 watts de la marca YXO, sostenidos en disipadores de 15*15 cm y un ventilador de 12 voltios y dos lámparas de led de tubos de luz fría de 6500 Kelvin, Las longitudes de onda deseadas para el desarrollo de nuestro cultivo fueron de 450 a 750 nanómetros (Figura 2). Además, se buscó proporcionar al cultivo una cantidad de 10,000 Luxes a nivel de la base, en base a esto se pretendió disminuir problemas de etiolación del cultivo. Para medir la distribución de la energía lumínica a lo largo de cada nivel se empleó un luxómetro portátil.

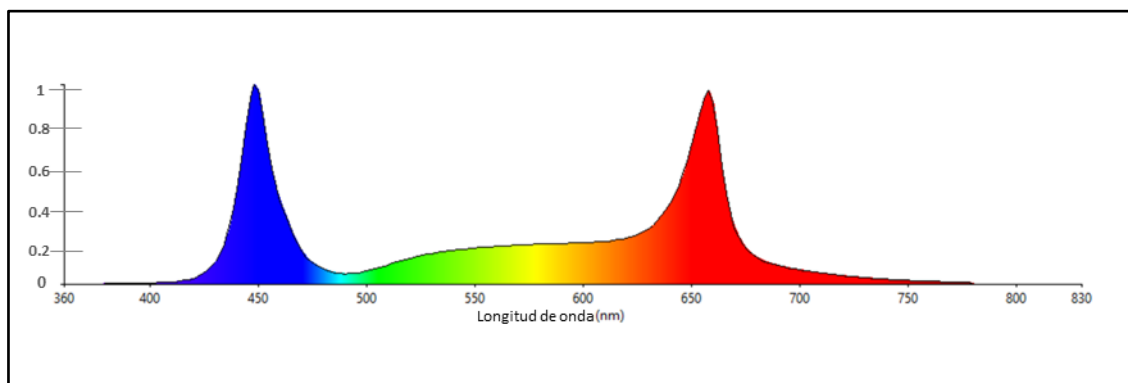


Figura 2. Longitud de onda obtenida con la combinación de leds en nuestro prototipo de producción

5.3.5 Diseño y Construcción del módulo de producción

El módulo de producción (Figura 3) se diseñó utilizando el software SketchUp versión 2020 de Trimble, para el diseño se utilizó el modelo propuesto por Dickson (1999) en el cual se reemplaza el cultivo tradicional por una estructura vertical de varios pisos, El diseño del prototipo cuenta con un total de 3 niveles con separación de 0.60 m y superficie de 0.72 m².

Cada nivel está conformado por un sistema de producción diferente, en el nivel superior se encuentra el sistema NFT compuesto por 3 tubos de policloruro de vinilo (PVC) de 152 mm de diámetro color blanco (esto con la finalidad de obtener una reflexión difusa y de esta manera proporcionar mejores condiciones de luz para las plantas) con longitud de 1.20 m y separación de centro a centro de 0.20 m, la solución nutritiva en este tratamiento es inyectada por medio de una electroválvula que la distribuye por medio de conectores con gomas, codos, tee's y

manguera de polietileno color negro de 16 mm de diámetro y recircula hacia el costado izquierdo donde regresa a través de un tubo recolector de 1 pulgada al tanque de almacenamiento.

Se les hicieron ocho perforaciones a los tubos a cada 20 centímetros de separación de centro a centro, utilizando una broca sacabocados de 52 mm.

En el nivel central se estableció el sistema de raíz flotante, fabricado en fibra de vidrio de 60 de ancho por 120 cm de largo y 12 cm de altura, se le aplicó una capa de primer anticorrosivo color negro con la finalidad de evitar el desarrollo de algas y finalmente se recubrió con una placa de unigel de 1.5 cm de ancho con 24 cavidades, la solución nutritiva en este tratamiento es inyectada por medio de una electroválvula colocada en el costado derecho y recircula hacia el costado izquierdo donde regresa a través de una brida de ½ pulgada al tanque de almacenamiento.

En el nivel inferior se estableció el sistema aeropónico en este sistema al igual que el de raíz flotante se utilizó un tanque de fibra de vidrio de 60 de ancho por 120 cm de largo y 60 cm de altura, se recubrió con una placa de unigel de 1.5 cm de ancho con 24 cavidades, en este tanque también se almacena la solución nutritiva.

La solución nutritiva en este tratamiento es inyectada por medio de una electroválvula y 4 nebulizadores de 4 salidas modelo coolnet de la marca Netafim, en este tratamiento la solución cae directamente al tanque de almacenamiento.



Figura 3. Diseño del prototipo de producción modelado en Sketchup Versión 20.1

5.4 Segunda etapa

5.4.1 Material biológico

Se emplearon semillas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) variedad Parris Island (lechuga orejona), las cuales fueron sembradas en charolas de espuma agrícola, con bloques de 2.5 * 2.5 cm, las charolas se mantuvieron con niveles altos de humedad para evitar estrés hídrico y se almacenaron en un lugar con una luminosidad de entre 1200 luxes, esto con la finalidad de acelerar la germinación.



Figura 4. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) 15 días después del trasplante al tratamiento NFT

5.4.2 Solución nutritiva

La solución nutritiva empleada para la nutrición del cultivo (Cuadro 1) fue la propuesta por Steiner (1984) modificada por Cabezas (2011), para su elaboración se utilizaron fertilizantes comerciales y se midieron los parámetros de potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica previo a su elaboración.

Cuadro 1. Cantidad de fertilizantes empleados para la solución nutritiva para preparar 1000 litros de solución

Elemento	Concentración (ppm)	Fuente	Nombre comercial
N	210	****	****
P	50	NH ₄ H ₂ PO ₄	Fosfato monoamónico
K	240	KNO ₃	Nitrato de potasio
Ca	200	Ca (NO ₃) ₂	Nitrato de calcio
Mg	45	Mg (NO ₃) ₂	Nitrato de magnesio
S	70	MgSO ₄	Sulfato de magnesio
Fe	2	****	Ultrasol micro mix
Mn	0.8	****	Ultrasol micro mix
B	0.5	****	Ultrasol micro mix
Cu	0.15	****	Ultrasol micro mix
Zn	0.15	****	Ultrasol micro mix
Mo	0.1	****	Ultrasol micro mix

Los parámetros que se midieron para que el cultivo de lechuga pueda asimilar la solución son:

- Conductividad eléctrica: de 1.5 a 2.5 $\mu\text{S cm}^{-1}$
- Sólidos disueltos (TDS): entre 650 y 1500 PPM
- pH: entre 5.5 y 6.5
- Temperatura: entre 15 y 24 °C

5.5 Tercera etapa

5.5.1 Diseño experimental

El diseño utilizado fue bloques completos al azar, se evaluaron tres tratamientos y nueve repeticiones. La unidad experimental consistió en una planta de lechuga.

5.5.2 Variables evaluadas

5.5.2.1 Variables de ambientales

Se midieron variables de la temperatura ambiental ($^{\circ}$ C) y la humedad relativa (%) con el sensor DHT11, además el sistema guardó variables de la solución nutritiva como temperatura, conductividad eléctrica y potencial de hidrogeno, los datos fueron almacenados en la memoria de la computadora cada 15 minutos desde el día 1 hasta el día 60 que se realizó el corte del cultivo (Anexo 1).

5.5.2.2 Distribución de la luz

Se realizo un mapeo de la distribución de la luz, para realizar el mapa se hizo la medición de la luminosidad utilizando un luxómetro portátil de la marca UNI-T el cual nos arrojó los resultados en luxes, las mediciones se hicieron en cada orificio donde se establecieron las plantas, posteriormente se empleó el programa Surfer versión 20.1 para la creación del mapa de la distribución.

5.5.2.3 Variables de absorción de macronutrientes y micronutrientes

La absorción nutrimental se determinó realizando un análisis de tejido foliar en el laboratorio Fertilab (Anexo 2,3 y 4), Para realizar el análisis mencionado se enviaron 200 gramos de hojas frescas de cada tratamiento, se seleccionaron aleatoriamente las hojas de edad media, posteriormente se empaquetaron en bolsas de papel de 20 * 40 centímetros y se les coloco una etiqueta con la información del tratamiento. Las metodologías que emplea el laboratorio para determinar la absorción nutrimental son Dumas para Nitrógeno (N), Nitración con ácido salicílico con espectrofotometría para determinar Nitratos (N-NO_3) y digestión multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03 para P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe y Mn.

5.5.2.4 Variables morfológicas

Se midieron las variables morfológicas de la planta el día que se realizó la cosecha (Anexo 5), las variables medidas fueron peso fresco de la parte foliar y la raíz empleando una báscula granataria digital, numero de hojas, altura de la planta, diámetro del tallo, longitud del tallo y longitud de raíz. Las muestras de cada planta fueron secadas en estufa a 110°C durante 72 horas, posteriormente fueron pesadas para determinar peso seco de la parte aérea y de raíz.



Figura 5. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) a 60 días después del trasplante



Figura 6. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) a 60 días después del trasplante producida bajo el prototipo a una intensidad de luz de 5000 a 12200lux.

5.5.3 Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico se empleó el programa estadístico SAS (Statistical Analysis Software), para realizar análisis de varianza y pruebas de comparación de medias por el método de Tukey ($P \leq 0.05$).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Funcionamiento del módulo

Los resultados obtenidos de las pruebas que se le hicieron al prototipo (Figura 4) fueron las esperadas para llevar a cabo nuestra investigación, durante dichas pruebas se evaluó el correcto funcionamiento de las lámparas led de acuerdo al fotoperiodo deseado, Además se realizaron ensayos para conocer si el sistema de riego era eficaz en cada tratamiento.

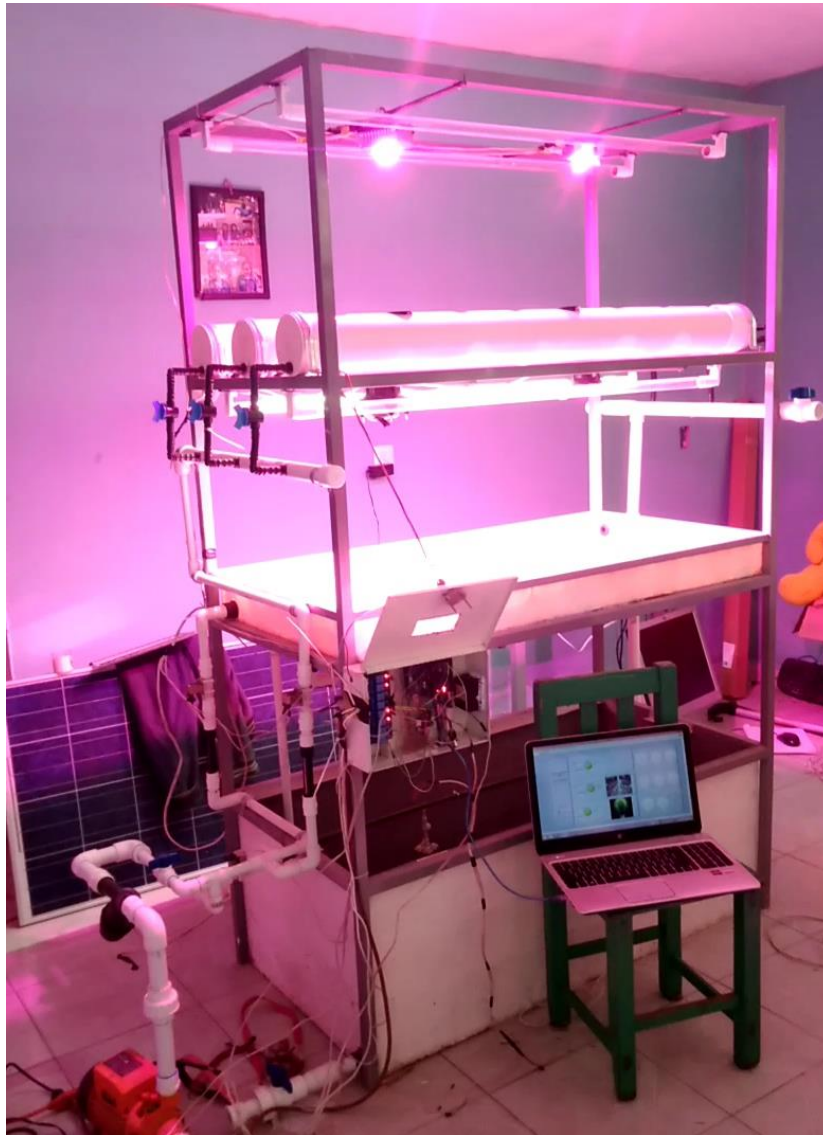


Figura 7. Evaluación del prototipo de producción

6.2 Programa creado para el monitoreo y control del módulo

El programa nos permite monitorear y controlar el módulo de forma automatizada, su funcionamiento consistió en que el usuario pueda programar las frecuencias de riego y el fotoperiodo deseado en el cultivo de lechuga dependiendo de la etapa fenológica, Además el programa almacena los datos recolectados por los sensores desde el día de siembra hasta el día de cosecha del cultivo. En la Figura 5, se observa el panel de control del programa, este panel es práctico para que el usuario lo logre entender.

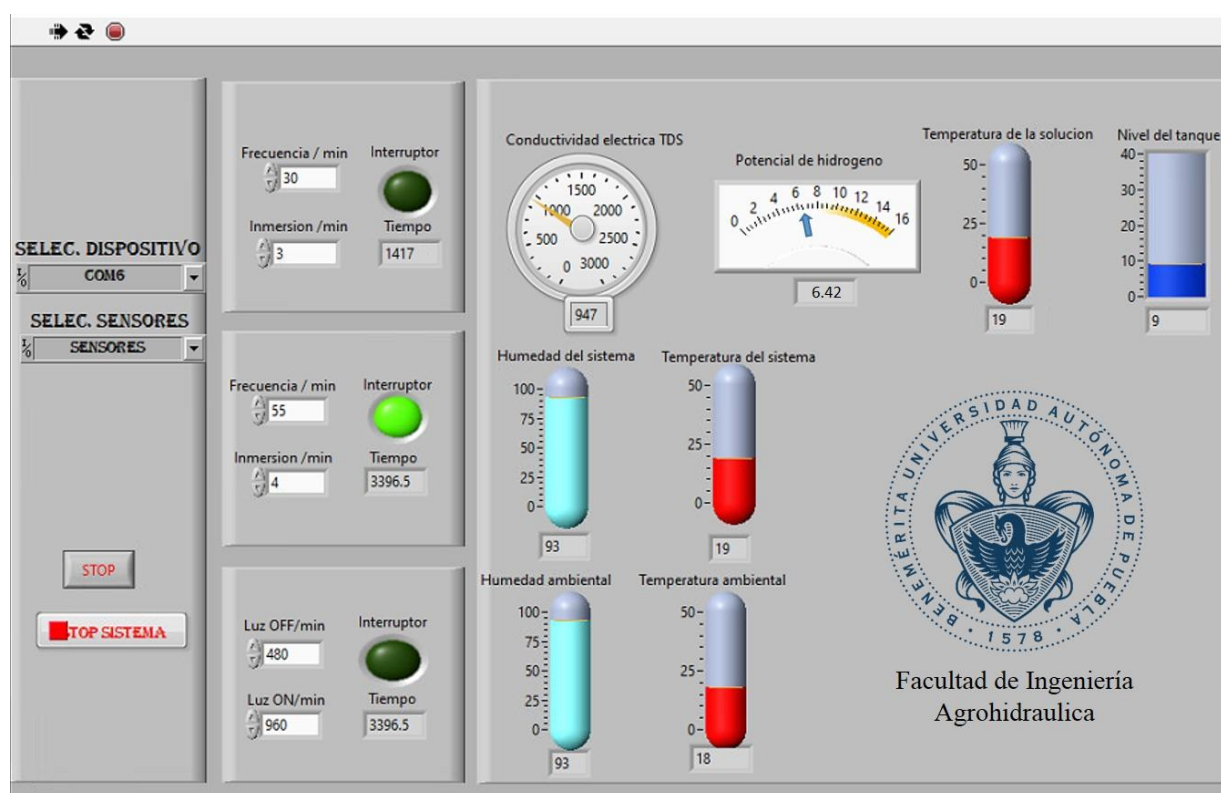


Figura 8. Panel de control del sistema automatizado para el control y monitoreo del prototipo

6.3 Respuesta de los sensores empleados

6.3.1 Temperatura y humedad relativa

Los resultados obtenidos con el sensor de temperatura y humedad ambiental DHT11 se muestran en la Figura 9, donde se pudo observar que las condiciones de temperatura dentro del laboratorio se mantuvieron en el rango de 18 a 23°C, con un promedio aproximado de 20.5°C y las condiciones de humedad relativa se mantuvieron entre 88 y 95%. Los valores de temperatura están dentro del rango reportado por Choi *et al.*, (2000) donde señala que hasta los 25 días después de trasplante, la temperatura óptima para el crecimiento de lechuga bajo condiciones de laboratorio es de 18 a 26 °C y posteriormente de 20 a 24 °C hasta la cosecha.

Mientras que los valores de humedad relativa no se encontraron dentro del rango establecido por Park *et al.*, (2012), quienes señalan que las condiciones óptimas de humedad relativa en condiciones de laboratorio son de 60-80%, además señalan que altos niveles de humedad relativa fomentan problemas de enfermedades, con los valores de humedad relativa obtenidos dentro del laboratorio no se registró incidencia de enfermedades.

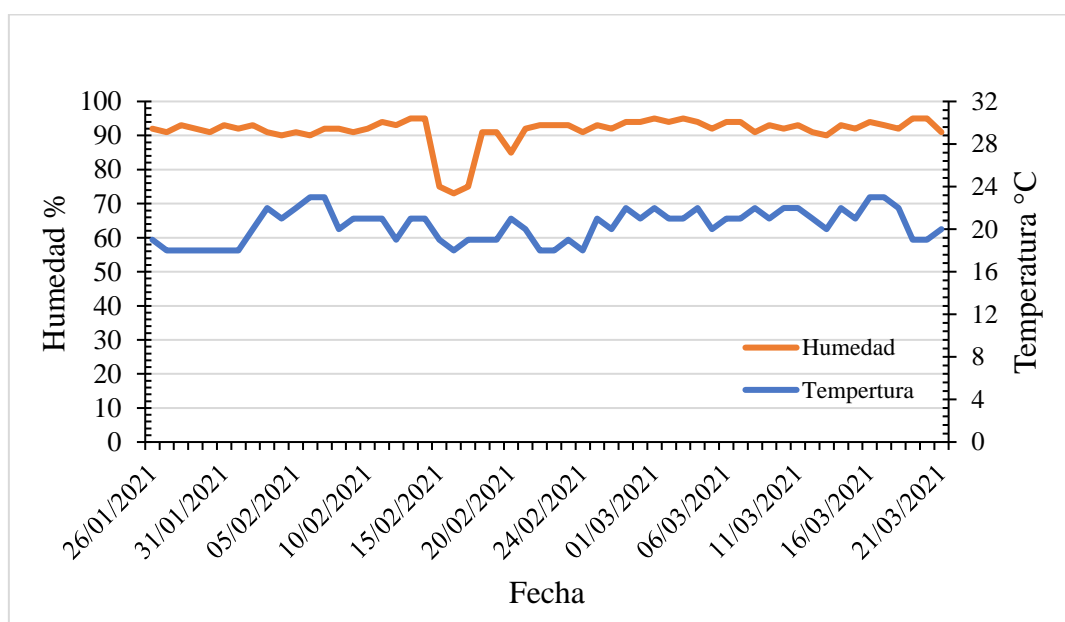


Figura 9. Datos de temperatura y humedad relativa obtenidos con el sensor DHT11 durante todo el ciclo del cultivo

6.3.2 Temperatura de la solución nutritiva

Los resultados obtenidos con el sensor de temperatura ds18b20 se muestran en la Figura 10, donde se pudo observar que las condiciones de temperatura de la solución nutritiva se mantuvieron en el rango de 14 a 19.5°C, con un promedio aproximado de 16.5°C, Estos valores concuerdan con lo propuesto por Magalhães y Huber (1999) quienes recomiendan que la temperatura de la solución nutritiva no supere los 20°C, ya que la temperatura afecta principalmente al contenido de oxígeno disuelto en la solución nutritiva (Vestergaard, 1984).

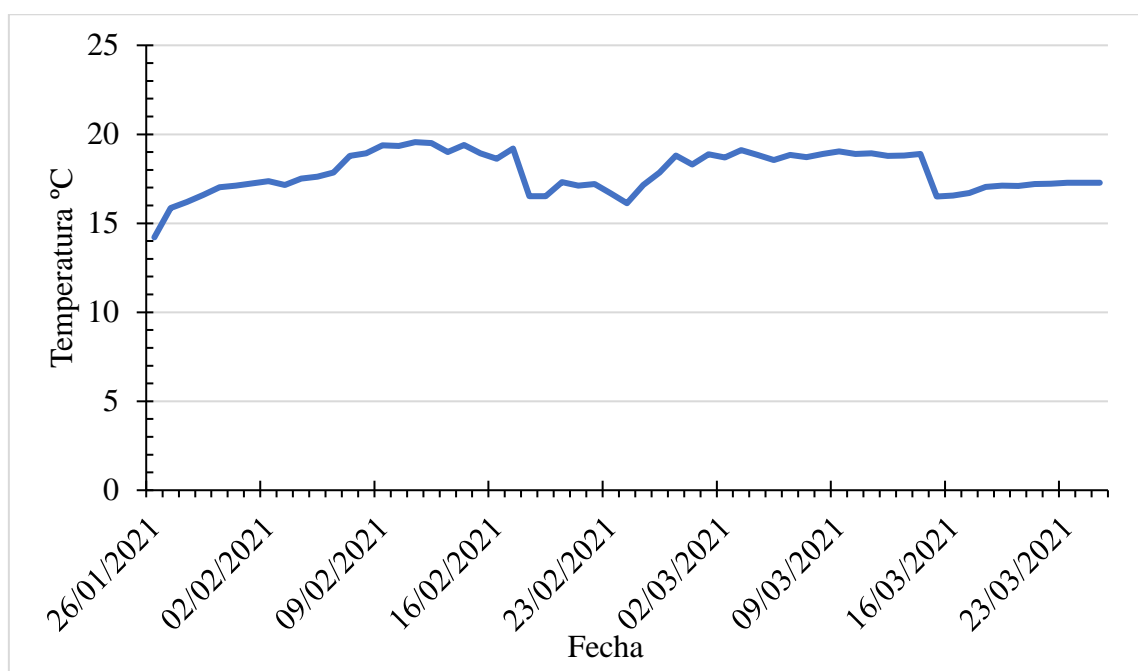


Figura 10. Datos de temperatura de la solución nutritiva obtenidos por el sensor ds18b20 durante el ciclo del cultivo

6.3.3 Potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica

Los resultados obtenidos con el sensor de potencial de hidrogeno PH-4502C y el sensor de conductividad eléctrica se muestran en la Figura 11, donde se pudo observar que las condiciones de pH de la solución nutritiva se mantuvieron en el rango de 6.3 a 8.1, dándose los valores más altos cuando se realizó lavado de raíz, la tendencia del pH fue a aumentar su alcalinidad por lo que se tuvo que aplicar ácido sulfúrico 1N como recomienda Rodríguez *et al.*, (2006), estos valores concuerdan con lo reportado por Shimizu *et al.*, (2011) quien mencionan que para la producción de lechuga se recomienda mantener un pH entre un rango de 5.5 a 6.5.

Las condiciones de conductividad eléctrica se mantuvieron entre 0.11 a 2.1, dándose el resultado más bajo cuando se realizó lavado de raíz. Estos valores concuerdan con lo propuesto por Prieto (2008) quien menciona que durante los primeros 8 días después del trasplante la solución se debe suministrar al 25%, posteriormente incrementar la concentración del 100%.

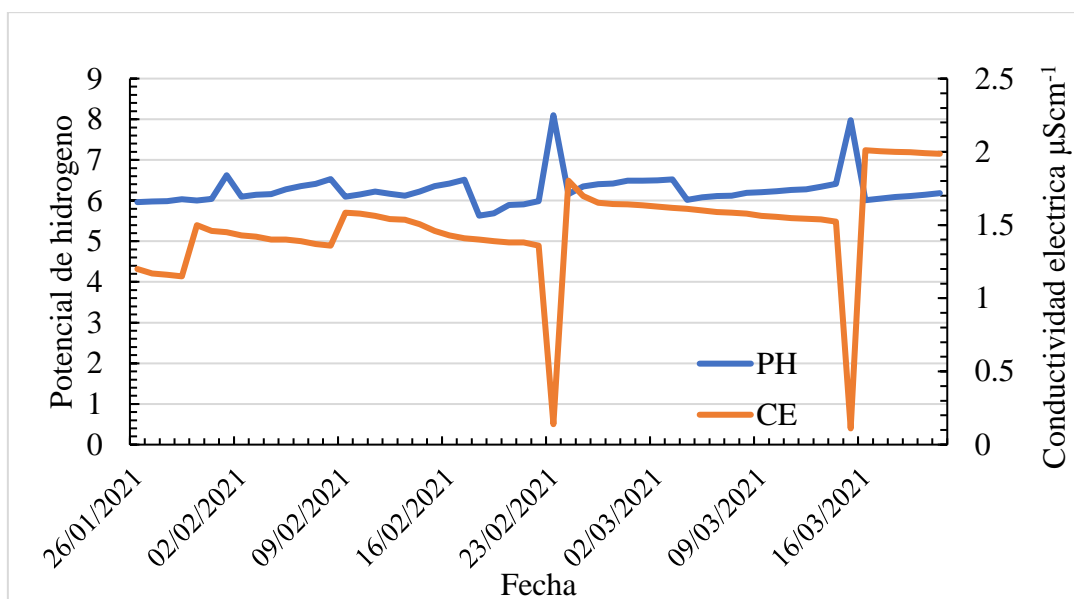


Figura 11. Datos de conductividad eléctrica y potencial hidrogeno obtenidos de la solución nutritiva

6.4 Distribución de la luz

La distribución de la luz obtenida en nuestro sistema para los tres tratamientos fue entre un rango de 12200 y 5000 luxes, el rango mayor se presentó principalmente en las zonas donde se colocó el led y el rango mejor en las orillas del módulo, Alpi y Tognoni (1999) indican que el rango de luminosidad para la producción del cultivo de lechuga debe comprender entre 10000 a 30000 luxes bajo condiciones de invernadero.

Los resultados obtenidos en nuestra investigación concuerdan con los obtenidos por Bantis *et al.*, (2016) quien realizó una investigación aplicando luminosidades de entre 5000 y 10000 luxes, teniendo como resultado que el cultivo de lechuga se adapta mejor a luminosidades de 8000 luxes bajo sistemas de producción con luz artificial.

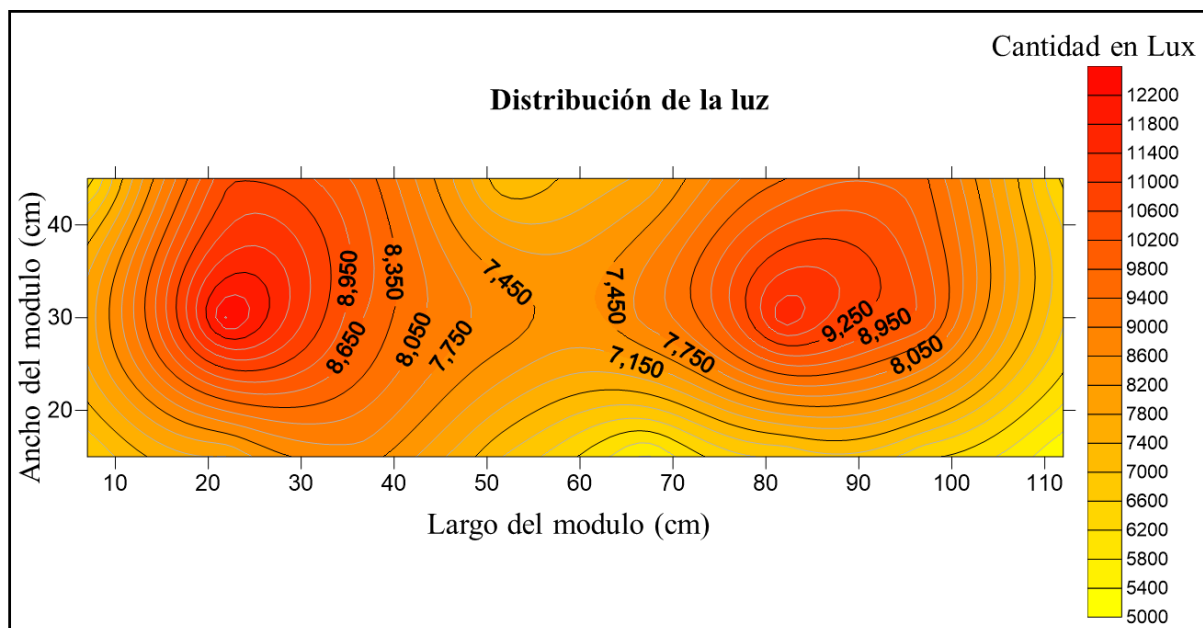


Figura 12. Distribución de la luz en los diferentes tratamientos del prototipo de producción

6.4 Absorción nutrimental

Los tratamientos mostraron diferencias en la absorción total de nutrientes (Figura 13 - 14), destacando el t1 con los mayores valores de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn en comparación a los observados en el t2 y t3, esto debido a un mayor crecimiento en la parte aérea del cultivo (Johkan *et al.*, 2012).

Nuestros resultados del análisis foliar están dentro del rango reportado por Rodríguez y Rodríguez (2015) quienes indican que la concentración nutrimental óptima en hojas para el cultivo de lechuga es de 4.7 a 5.5 % para N, 0.5 a 1.0 % para P, 7.5 a 9.0 % para K, 1.0 a 3.0 % para Ca, 0.2 a 0.8 % para Mg, 100 a 180 ppm para Fe, 40 a 80 ppm para Zn, 155 a 250 ppm para Mn, 5 a 25 ppm para Cu y 40 a 100 ppm para B (Rodríguez y Rodríguez, 2015), siendo el t3 el que no cumple los requerimientos para K y Fe.

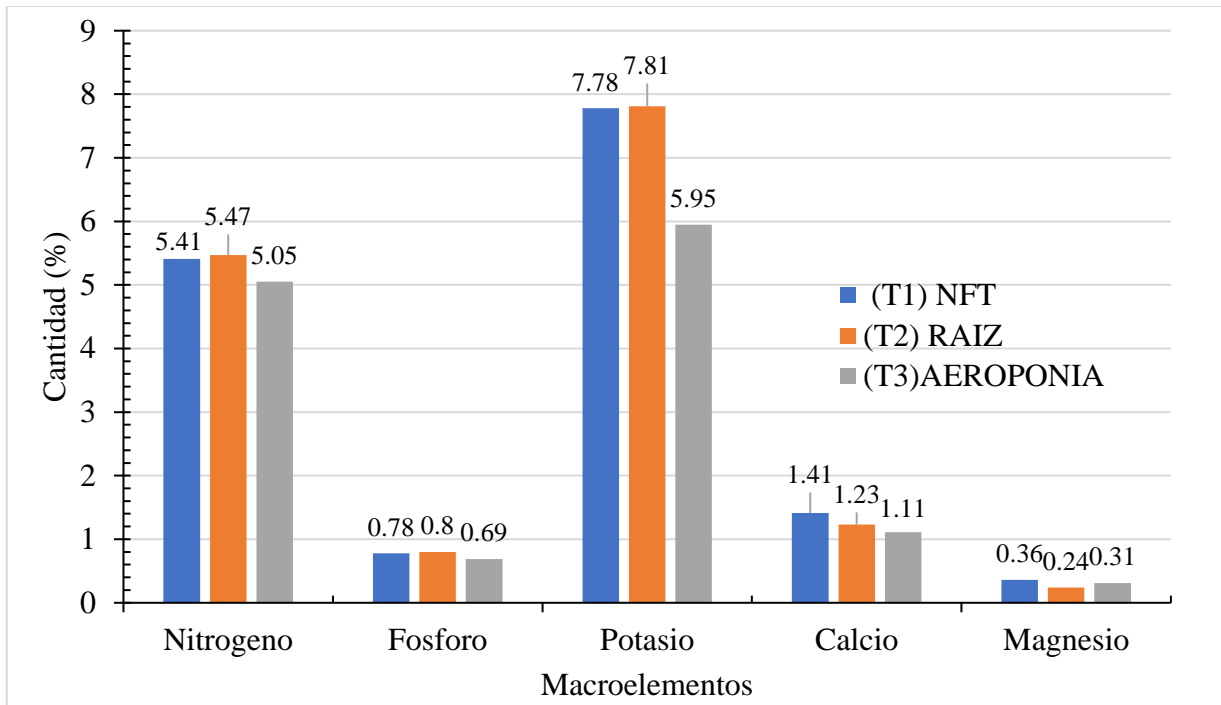


Figura 13. Absorción total de macronutrientes del cultivo de lechuga a 60 días después del trasplante

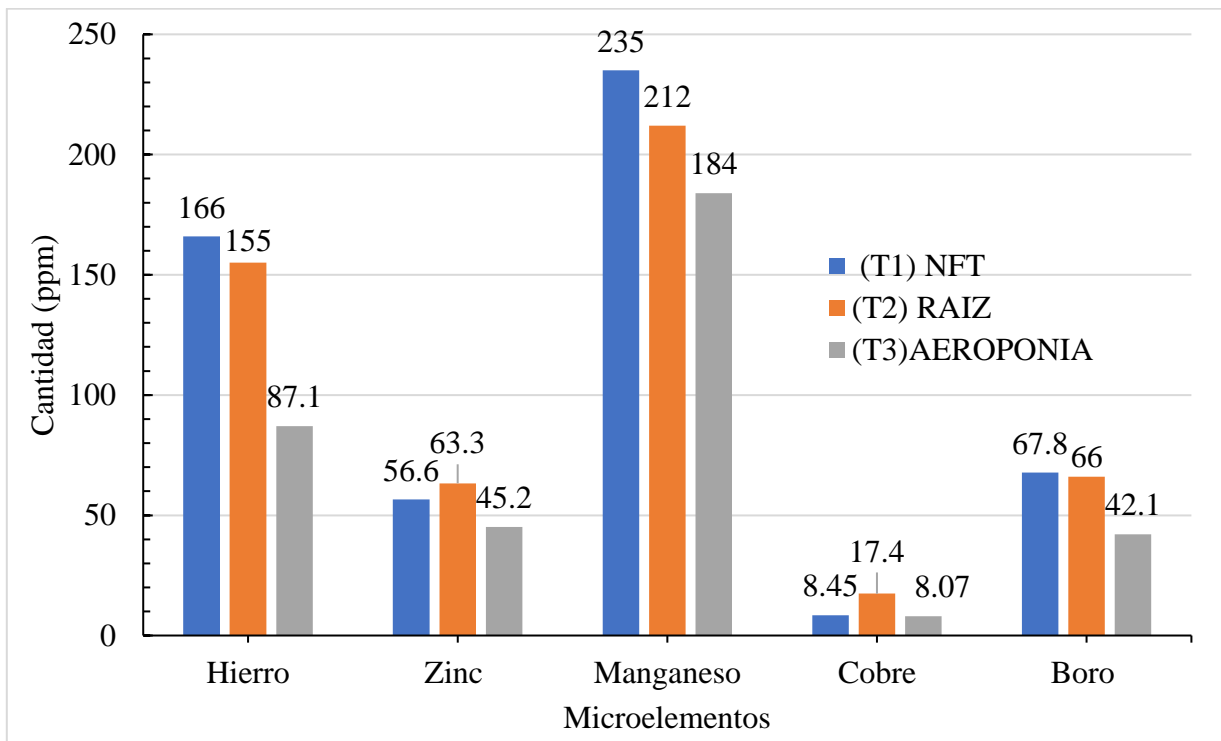


Figura 14. Absorción total de micronutrientes del cultivo de lechuga a 60 días después del trasplante

6.5 Análisis de varianza de las principales características morfológicas en lechuga

En el análisis realizado de las características morfológicas, la biomasa y el rendimiento del cultivo, se obtuvieron diferencias significativas entre genotipos en todas las variables estudiadas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cuadro medio del análisis de varianza para las variables de fenología, biomasa y el rendimiento en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) bajo condiciones de laboratorio

Variables	Fuentes de variación		CV (%)
	Genotipo	Error	
PFP (g)	32542.5 **	1584.2	23.59
PFR (g)	304.64 **	42.68	36.27
PFT (g)	37074.9 **	1679.98	22.04
PSP (g)	114.27 **	5.19	22.05
PSR (g)	12.18 **	1.71	36.54
PST (g)	179.8 **	8.42	20.84
NH	406.29 **	12.25	16.6
AP (cm)	73.43 **	5.34	9.27
DT (cm)	0.57 **	0.05	19.35
LT (cm)	2.86 **	0.34	25.41
LR (cm)	1244.68 **	65.86	18.81

ns, *, **: No significativo y significativo a una $P \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente. CV: Coeficiente variación. PFP: Peso fresco de la planta; PFR: Peso fresco de la raíz; PFT: Peso fresco total; PSP: Peso seco de planta; PSR: Peso seco de la raíz; PST: Peso seco total; NH: Numero de hojas; AP: Altura de la planta; DT: Diámetro del tallo; LT: Longitud del tallo; LR: Longitud de raíz.

Lo que indica que, en cada carácter estudiado, al menos un genotipo mostro una respuesta significativa diferente a los demás, esto se puede atribuir a que en cada genotipo existe un comportamiento diferencial del cultivo (Howard, 1997).

6.6 Rendimiento y biomasa del cultivo de lechuga

El comportamiento del rendimiento fue diferencial entre tratamientos (Cuadro 3), El peso fresco total (PFT) se obtuvo sumando el peso fresco de la planta (PFP) más el peso fresco de raíz (PFR), donde se pudo observar que para la variable de peso fresco total fue mayor en el T1 con un promedio de 208.73 g por planta, tratamiento que es estadísticamente igual al T2 con un promedio de 200.73 g por planta de acuerdo a la prueba de Tukey $P \leq 0.05$, estos valores concuerdan con Mota *et al.*, (2003) quien menciona que a los 60 días después del trasplante el peso fresco comercial de la lechuga es de 180 – 460 gramos. En base al tratamiento 3 Neumann (1997) indica que la tasa del rendimiento se ve afectada por el suministro subóptimo de nutrientes podría afectar la tasa de crecimiento de las hojas por la inhibición de la tasa de producción y expansión de nuevas hojas.

Cuadro 3. Comparación de medias para las variables de rendimiento y biomasa en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) bajo condiciones de laboratorio

Tratamiento	PFP	PFR	PFT	PSP	PSR	PST
NFT	208.73 a ^z	16.18 b	224.91 a	12.49 a	3.22 b	15.73 a
Raíz flotante	200.73 a	24.86 a	225.59 a	12.53 a	4.96 a	17.5 a
Aeroponía	94.48 b	12.92 b	107.4 b	5.96 b	2.57 b	8.55 b
DMSH	50.162	8.22	51.65	2.87	1.65	3.65

^zvalores con la misma letra dentro de las columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

NFT: Nutrient Film Technique; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. PFP: Peso fresco de la planta; PFR: Peso fresco de la raíz; PFT: Peso fresco total; PSP: Peso seco de planta; PSR: Peso seco de la raíz; PST: Peso seco total.

La biomasa al igual que el rendimiento tuvo un comportamiento diferencial entre los diferentes genotipos, los tratamientos 1 y 2 no tuvieron diferencias significativas según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), estos resultados muestran la habilidad que tuvo el cultivo para acumular biomasa en los distintos tratamientos, como mencionan Rajwade *et al.*, (2017) que esto puede ser atribuido al grado de adaptabilidad que muestran los cultivos en las diferentes condiciones de cada sistema de producción.

El tratamiento 3 fue el que genero menos biomasa al final del periodo de evaluación, Manrique y Bartholomew (1991), mencionan que la acumulación de biomasa depende de la cinética de

crecimiento y de la tasa de distribución, que están gobernadas por el área foliar y asimilación de nutrimentos.

6.7 Variables morfológicas

El número de hojas dentro de los tres tratamientos fue diferente, el tratamiento 2 fue el que mostro un mayor contenido de hojas, seguido por el tratamiento 1 quien, estos valores concuerdan con Repke *et al.*, (2009) quien menciona que el número de hojas promedio para el cultivo de lechuga tipo italiana van de 20 hasta 31 hojas por planta. En la altura de la planta y el diámetro del tallo para los tratamientos 1 y 2 no se observaron diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), estos valores fueron superiores a los obtenidos en su investigación de Cazorla (2010), quien obtuvo valores de altura de planta y diámetro del tallo de 24.54 y 1.2 respectivamente bajo este sistema de producción.

Cuadro 4. Comparación de medias para las variables morfológicas en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) bajo condiciones de laboratorio

Tratamiento	NH	AP	DT	LT	LR
NFT	21.25 b ^z	27.25 a	1.47 a	2.22 ab	31.25 c
Raíz flotante	29.12 a	27.01 a	1.35 a	2.95 b	42.05 b
Aeroponía	13.87 c	21.88 b	0.96 b	2.95 a	56.12 a
DMSH	4.41	2.96	0.3	0.74	10.22

^zvalores con la misma letra dentro de las columnas, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

NFT: Nutrient Film Technique; DMSH: diferencia mínima significativa honesta. NH: Numero de hojas; AP: Altura de la planta; DT: Diámetro del tallo; LT: Longitud del tallo; LR: Longitud de raíz.

El comportamiento de la longitud del tallo de los tres tratamientos fue similar a lo reportado por Kander (2002) quien obtuvo valores de 2 – 3.5 cm en un modelo de producción con luz artificial, estos resultados se atribuyen a que el contenedor en los tres tratamientos fue del mismo tamaño. La longitud de raíz fue diferencial para los 3 tratamientos donde se pudo observar que el crecimiento de la raíz en el T3 fue 55% - 75% mayor que el T1 y T2 respectivamente, Montero y Cerdas (2004) señala que en los sistemas de producción aeropónicos la longitud de la raíz es mayor que en los métodos usados en el T1 y T2, esto a que existe mayor espacio en la cabina donde nebuliza la solución nutritiva. En esta investigación las variables morfológicas NH, AP y LT del T3 su comportamiento fue diferencial a los demás tratamientos, esto puede ser atribuido a lo mencionado por Brenes (2010) donde señala que la edad para realizar el trasplante de la

lechuga a sistemas de producción es a los 20 días después de ser germinada y en nuestro sistema lo hicimos a los 6 días.

VII. CONCLUSIÓN

El prototipo desarrollado funciono según lo esperado y en base a esto se afirma que el sistema automatizado y el prototipo tienen la capacidad de ser implementados a gran escala de manera industrial o bien en súper mercados.

Dentro de los sistemas evaluados el sistema NFT (Nutrient Film Technique), fue en el que mejor se adaptó el cultivo de lechuga, logrando resultados a 60 días después del trasplante, con rendimientos de 5.2 Kg m^{-2} .

El prototipo posee ventajas desde un punto de vista ambiental ya que aprovecha de mejor manera el recurso hídrico, elimina el uso de plaguicidas, reduce la cantidad de fertilizante y no degrada el suelo.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abad, M., Noguera, P. y Carrión, C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Fertirrigación en cultivos hortícolas, frutales y ornamentales En: Cadahia, C. (Ed.) Madrid: Ed. Mundi-Prensa. 681p.
- Adams, P. 1994. Nutrition of greenhouse vegetables in NFT and hidroponic systems. Acta Hort. 361: 245-257.
- Alabi, R. 2007. Improving the Technical Efficiency of Nigeria cocoa Farmers through institutional farm credit. Afr Agric Res 4: 22-23.
- Alpi A. y Tognoni F. 1999. Cultivos en invernadero. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 347 p.
- Bantis, F., T. Ouzounis R. and K. Radoglou. 2016. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. Scientia Horticulturae. 198 (3): 277-283.
- Brechelt, A. 2004. El manejo ecológico de plagas y sus enfermedades, Fundación Agricultura Medio Ambiente (FAMA) Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina (RAP-AL) Santiago de Chile. 285p.
- Brenes, L. 2010. Análisis Multicriterio de sistemas de producción de lechuga. Costa Rica: Curso Tópicos Avanzados de Gerencia y Gestión Ambiental. Maestría en Gerencia y Gestión Ambiental. Centro Interamericano de Posgrados. 367p.
- Castañeda, F. 1997. Manual Técnico de Hidroponía Popular. Cultivos sin tierra. 104 p.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico, tecnología y manejo. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 37 (62): 83-136.
- Cazorla, A. 2010. Estudio bioagronómico de catorce cultivares de lechuga tipo mantecosa (*Lactuca sativa L.*) en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. Tesis Ingeniero Agrónomo. Escuela de Ingeniería Agronómica. Riobamba, Ecuador. 90 p.
- CER. 2014. Energía solar. Centro de Energías Renovables. Ministerio de Energía. Santiago, Chile. 28p

- Choi, K. Y., Paek, K. Y., and Lee, Y. B. 2000. Effect of air temperature on tip burn incidence of butterhead and leaf lettuce in a plant factory. In *Transplant Production in the 21st Century*. Springer Netherlands. pp. 166-171.
- Curtis, H., Barnes, S., Schnek, A., and Massarini, A. 2008. *Curtis. Biología*. Buenos Aires: Ed. Médica Panamericana. 1160ed.
- De Rijck, G. y E. Schrevens. 1998a. Cationic specification in nutrient solution as a function of pH. *J. Plant Nutr.* 21 (5): 861-870.
- FAO. 2006. *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.
- Dickson, D. 1999. Skyfarming. *The New York magazine*, 6 p.
- FAO. 2010. *El segundo informe sobre el estado de los recursos filogenéticos para la alimentación y la agricultura en el mundo*. Roma, 318 p.
- FAO. 2011. *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, y Mundi-Prensa, Madrid, 338 p.
- FAO. 2016. *Desarrollo de cadenas de valor sensibles al género. Marco de referencia*. Roma. Disponible en: www.fao.org/3/a-i6462e.pdf
- FAO. 2018. *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo*. Roma. 218 p.
- Harper, C. and Siller M. 2015. OpenAG: a globally distributed network of food computing. *Pervasive Comput.* 14(4):24–27.
- Howard, M. 1997, *Cultivos Hidropónicos, Nuevas técnicas de Producción*. Departamento de Ciencia de las Plantas. Universidad de la Columbia Británica, Vancouver, 2001, Editorial Mundi Prensa.
- INEGI. 2015. *Carta topografica*. Instituto nacional de estadística y geografía. Inegi.
- Jackson, L. E. 1995. Root architecture in cultivated and wild lettuce (*Lactuca spp.*). *Plant, Cell and Environ.* Vol. 18 (Nº 8). pp. 885-897.

- Jackson, M. B., 1980. Aeration in the nutrient film technique of glasshouse crop production and the importance of oxygen, ethylene and carbon dioxide. *Acta Hort.* Vol. 98: 61 - 75.
- Jackson, S.D. 2009. Plant responses to photoperiod. *New phytologist* 181: 517-531.
- Jaques, H. C., and Hernández, J. L. 2005. Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*, 3: 11-16.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hahida, S. N., and Yoshihara, T. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75: 128-133.
- Kander, A.A., 2002. Quality parameters of fresh-cut fruit and vegetable products. En: Lamikanra O. (ed), *Fresh-Cut Fruits and Vegetables: Science. Technology and Market* CRC press. Florida. pp 12 -19.
- Kesseli, R., Ochoa, O. and Michelmore, R. (1991). Variation at AFLP loci in *Lactuca* spp. and origin of cultivated lettuce (*L. sativa*). *Genome* 34 (N° 3):430-436.
- Magalhães J., D. Huber M. 1999. Maize Growth and Ammonium Assimilation Enzyme Activity in Response to Nitrogen Forms and pH Control. *J. Plant Nutr.* 12:985-996.
- Manrique, L. A., Bartholomew, D. P. 1991. Growth and yield performance of potato grown at three elevations in Hawaii: II. Dry matter production and efficiency of partitioning. *Crop Sci.* 31.
- Maroto, J. 2005. *Elementos de horticultura general*. Mundi-Prensa.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Segunda ed. Academic Press. San Diego, CA, EEUU. 889 pp.
- Martín, P., Navas, L., Hernandez, S., Correa, A., Martín, J., Martín, E., y Duran, J. 2010. *Diodos emisores de luz para la irradiación de plantas*. Colombia. 130p
- Montero, M. y Cerdas, M. 2004. *Guías técnicas del manejo poscosecha de apio y lechuga para el mercado fresco*. San José, Costa Rica. MAG. 72p.
- Morard E, Silvestre J 1996. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: a review. *Plant Soil* 184: 243- 254.

- Mota, J.; Yuri, J.; de Freitas, S.; Rodriguez, J.; de Resende, G. y de Souza, R. 2003. Avaliação de cultivares de alface Americana durante o verão em Santanada Vargem, MG. Horticultura Brasileira, Brasília, 21: 234-237.
- Neumann, P. 1997. Salinity resistance and plant growth revisited. Plant Cell Environ. 20: 1193-1198.
- ONU. 2018. Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Nueva York, 2018. [edición electrónica].
- Park, G. Y., Park, E. J., Hwang, J. S., and Jeong, R. V. 2012. Light source and CO₂ concentration affect growth and anthocyanin content of lettuce under controlled environment. Journal Horticulture, Environment and Biotechnology, 53: 460-466.
- Pizarro, V., Jana, C., Ibacache, G., 2019. Módulos Hidropónicos Sistema Raíz Flotante (SRF): producción de lechugas y berros bajo invernadero. INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS, INIA Intihuasi, Colina San Joaquín s/n, La Serena.12: 234-256.
- Plenet, D., A Mollier y S. Pellerin. 2000. Grow analysis of maiza field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomas accomulation and yield components.plant soil. 224: 259-272.
- Prieto, D. 2008. Riego con aguas salinas y aguas de drenaje, control e impacto de salinidad. Jornadas sobre “Ambiente y riego: modernización y ambientalidad”, La antigua, Guatemala. Red de riegos. CYTED y AECL.
- Rajwade, V. B.; Banafar, R. and Pathak, A.C., 2001. Growth analysis of potato in relation to biodynamic package and organic manures with chemical fertilizers. J. Indian Potato Assoc.156 p.
- Repke, A.; Velozo, M.; Domingues, M. y Rodriguez J. 2009. Efeitos da aplicação de reguladores vegetais na cultura da alface (*Lactuca sativa*) crespa var. Verônica e americana var. Lucy Brow.
- Rodríguez, H. y Rodríguez Absi, J. 2015. Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación. México: Trillas S.A. de C.V.

- Rodríguez, H., Rodríguez, J. C., Vidales, J. A. y Luna, A. I. 2016. Cultivo hidropónico de Liliun (Azucena): para flor de corte y en maceta. México: Trillas S.A. de C.V.
- Roldán, J. 2012. Estudios de viabilidad de instalaciones solares. Determinación del potencial solar. España: Paraninfo.
- Rosas, A. 2012. Agricultura Limpia. Bogotá D.C, Colombia: Mafpac Impresores. Simplemente Hydro. Copyright 2008 recuperado de http://www.simplyhydro.com/aero_hydro.htm.
- Rosenberg, D. 2005. Diseño de led encendiendo soluciones para nuevas aplicaciones. Aerofarms. pp.12-14.
- Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., and Ohdoi, K. 2011. Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. IFAC Proceedings Volumes, 44(1): 605-609.
- Singh, D., 2014. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting. Recuperado de [z<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf](http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3016.pdf).
- Steiner, A., 1968. Soilless culture. En Proc. 6th Colloq. Int. Potash Inst. Florence, Italy. pp. 324-341.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. Proc. 6th Int. Cong. on Soilless Culture. ISOSC. Lunteren, Holanda. pp. 633-649.
- Texier, W., 2013. Hidroponia para todos. Todo sobre la horticultura en casa. Editorial Mama editions. Paris, Francia. 304p.
- Thompson, H. C., Langhans, R. W., Both, A. J., and Albright, L. D. 1998. Shoot and root temperature effects on lettuce growth in a floating hydroponic system. Journal of the American Society for Horticultural Science, 123, 361-364.
- Torres P., G. López. 2012. Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos. Departamento de Horticultura y Arquitectura de Áreas Verdes, Purdue University.238: 1-2.
- Vestergaard, B. 1984. Oxygen supply to the roots in different hydroponic systems. 6th International Congress on Soilless Culture. The Netherlands.

- Yeh, N., J. Chung P., 2009. High-brightness LEDs –energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew Sust Energ Rev.* 13:2175–2180.
- Yoon, C. G., and Choi, H. K. (2011). A study on the various light source radiation conditions and use of LED illumination for plant factory. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 25: 14-22.
- Zheng, Y., Wang, L. and Dixon, M. 2007. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Hort*, 113: 162-165.

IX. ANEXOS

Anexo 1. Resultados obtenidos por los sensores durante 60 días del ciclo del cultivo

Días después del trasplante	Fecha	Temperatura	Humedad (°C)	Temp Sol (°C)	pH	Ce
1	25/01/2021	19	92	14	5.96	1.20
2	26/01/2021	18	91	18	5.98	1.17
3	27/01/2021	18	93	16	5.99	1.16
4	28/01/2021	17	92	16.5	6.03	1.15
5	29/01/2021	18	91	17	6.00	1.50
6	30/01/2021	18	93	16	6.04	1.46
7	31/01/2021	17	92	17.25	6.62	1.45
8	01/02/2021	20	93	16.37	6.10	1.43
9	02/02/2021	22	91	16.15	6.14	1.42
10	03/02/2021	21	90	17.52	6.16	1.40
11	04/02/2021	22	91	17.62	6.28	1.40
12	05/02/2021	23	90	16.15	6.36	1.39
13	06/02/2021	23	92	18.78	6.41	1.37
14	07/02/2021	20	92	18.94	6.53	1.36
15	08/02/2021	21	91	19.38	6.10	1.58
16	09/02/2021	21	92	19.35	6.15	1.58
17	10/02/2021	21	94	19.56	6.22	1.56
18	11/02/2021	19	93	19.5	6.17	1.54
19	12/02/2021	21	95	19	6.12	1.54
20	13/02/2021	21	95	19.4	6.22	1.51
21	14/02/2021	19	75	18.94	6.36	1.46
22	15/02/2021	18	73	18.63	6.42	1.43
23	16/02/2021	19	75	19.21	6.51	1.41
24	17/02/2021	19	91	16.52	5.63	1.40
25	18/02/2021	19	91	16.52	5.69	1.39
26	19/02/2021	21	85	17.32	5.89	1.38
27	20/02/2021	20	92	18.12	5.91	1.38
28	21/02/2021	16	93	17.21	5.99	1.36
29	22/02/2021	16	93	15	8.10	0.14
30	23/02/2021	19	93	16.69	6.16	1.80
31	24/02/2021	18	91	16.12	6.35	1.70
32	25/02/2021	21	93	17.16	6.40	1.65
33	26/02/2021	20	92	17.85	6.42	1.64
34	27/02/2021	22	94	18.81	6.49	1.64
35	28/02/2021	21	94	18.31	6.49	1.63
36	01/03/2021	22	95	18.87	6.50	1.63

37	02/03/2021	21	94	18.69	6.52	1.62
38	03/03/2021	21	95	19.12	6.02	1.61
39	04/03/2021	22	94	18.85	6.08	1.60
40	05/03/2021	20	92	18.56	6.11	1.59
41	06/03/2021	21	94	18.84	6.12	1.58
42	07/03/2021	21	94	18.72	6.19	1.58
43	08/03/2021	22	91	18.9	6.21	1.56
44	09/03/2021	21	93	19.04	6.23	1.56
45	10/03/2021	22	92	18.89	6.26	1.55
46	11/03/2021	22	93	18.94	6.28	1.54
47	12/03/2021	21	91	18.78	6.34	1.54
48	13/03/2021	20	90	18.81	6.41	1.52
49	14/03/2021	22	93	18.89	7.98	0.11
50	15/03/2021	21	92	16.51	6.01	2.01
51	16/03/2021	23	94	16.56	6.05	2.00
52	17/03/2021	23	93	16.71	6.09	2.00
53	18/03/2021	22	92	17.04	6.11	2.00
54	19/03/2021	19	95	17.12	6.14	1.99
55	20/03/2021	19	95	17.09	6.18	1.99
56	21/03/2021	20	91	17.21	5.63	1.97
57	22/03/2021	22	92	17.22	6.64	1.94
58	23/03/2021	21	91	17.2	5.68	1.92
59	24/03/2021	23	92	27.28	5.70	1.9
60	25/03/2021	22	92	27.26	5.72	1.88

Anexo 2. Resultados del análisis de tejido foliar para el tratamiento 1 (NFT)



FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010
 Teléfono (461) 6145238
 www.fertilab.com.mx



PAP-Accredited
 NAPT
 2021
 Certificados ante ISO 9001:2015

ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL FOLIO: PL-44318

Cliente:	Jose Eduardo Desiderio Lorenzo	Cultivo:	Lechuga Invernadero
Localización:	San Juan Acateno, Teziutlan, Puebla	Edad (DDS):	56
Coordenadas:	1952.539, 9721.642	Organo de Muestreo:	Hoja
Predio / ID:	N/A / Tratamiento Nft	Etaa Fenológica:	ND
Emisión:	2021/03/31	Referencia:	ND

Macronutrientes

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Nitrógeno (N)	Dumas	5.41	%
Nitratos (N-NO ₃)	Nitración con ácido Salicílico/espectrofotometría	NA	ppm
Fósforo (P)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.78	%
Potasio (K)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	7.78	%
Calcio (Ca)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	1.41	%
Magnesio (Mg)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.36	%
Azúfre (S)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.30	%
Sodio (Na)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.13	%
Cloro (Cl)	Titulación con Nitrito de Plata/Argentometría	NA	%

Micronutrientes

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Hierro (Fe)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	166	ppm
Zinc (Zn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	56.6	ppm
Manganeso (Mn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	235	ppm
Cobre (Cu)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	8.45	ppm
Boro (B)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	67.8	ppm
Níquel (Ni)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.11	ppm
Molibdeno (Mo)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.46	ppm

Características Físicas

Determinación	Peso Fresco	Peso Seco	Humedad	Arsénico (As)
Resultado	179	NA	NA	NA
Unidad	g	g	%	ppm

PND = Pendiente por verificación NA = No analizado ND = Sin datos



Gerente del Área Analítica
 Ing. Agustín García Olivares

Los rangos de suficiencia nutricional utilizados en el presente reporte provienen de valores publicados en la literatura y debe utilizarse solo como referencia para evaluar el estado nutricional del cultivo, ya que no incluyen todas las variedades e híbridos que existen actualmente. Este documento se encuentra protegido y registrado ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial; queda prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización de FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.

Anexo 3. Resultados del análisis de tejido foliar para el tratamiento 2 (Raíz flotante)



FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010
 Teléfono (461) 6145238
 www.fertilab.com.mx



PAP-Accredited
 NAPT
 2021
 Certificados ante ISO 9001:2015

ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL FOLIO: PL-44319

Cliente:	Jose Eduardo Desiderio Lorenzo	Cultivo:	Lechuga Invernadero
Localización:	San Juan Acateno, Teziutlan, Puebla	Edad (DDS):	56
Coordenadas:	1952.539, 9721.642	Organo de Muestreo:	Hoja
Predio / ID:	ND / Raíz Flotante	Etapas Fenológicas:	ND
Emisión:	2021/03/31	Referencia:	ND

Macronutrientes

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Nitrógeno (N)	Dumas	5.47	%
Nitratos (N-NO ₃)	Nitración con ácido Salicílico/espectrofotometría	NA	ppm
Fósforo (P)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.80	%
Potasio (K)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	7.81	%
Calcio (Ca)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	1.23	%
Magnesio (Mg)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.24	%
Azufre (S)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.29	%
Sodio (Na)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.08	%
Cloro (Cl)	Titulación con Nitrato de Plata/Argentometría	NA	%

Micronutrientes

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Hierro (Fe)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	155	ppm
Zinc (Zn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	63.3	ppm
Manganeso (Mn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	212	ppm
Cobre (Cu)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	17.4	ppm
Boro (B)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	66.0	ppm
Níquel (Ni)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.16	ppm
Molibdeno (Mo)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.36	ppm

Características Físicas

Determinación	Peso Fresco	Peso Seco	Humedad	Arsénico (As)
Resultado	187	NA	NA	NA
Unidad	g	g	%	ppm

PND = Pendiente por verificación NA = No analizado ND = Sin datos



Gerente del Área Analítica
 Ing. Agustín García Olivares

Los rangos de suficiencia nutricional utilizados en el presente reporte provienen de valores publicados en la literatura y debe utilizarse solo como referencia para evaluar el estado nutricional del cultivo, ya que no incluyen todas las variedades e híbridos que existen actualmente. Este documento se encuentra protegido y registrado ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial; queda prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización de FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.

Anexo 4. Resultados del análisis de tejido foliar para el tratamiento 3 (Raíz flotante)



FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.
 Poniente 6 No. 200, Ciudad Industrial, Celaya, Gto. C.P. 38010
 Teléfono (461) 6145238
 www.fertilab.com.mx



PAP-Accredited
 NAPT
 2021
 Certificados ante ISO 9001:2015

ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL FOLIO: PL-44320

Cliente:	Jose Eduardo Desiderio Lorenzo	Cultivo:	Lechuga Invernadero
Localización:	San Juan Acateno, Teziutlan, Puebla	Edad (DDS):	56 DIAS
Coordenadas:	1952.539, 9721.642	Organo de Muestreo:	Hoja
Predio / ID:	N/A / Tratamiento Aeroponia	Etaa Fenológica:	ND
Emisión:	2021/03/31	Referencia:	ND

Macronutrientos

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Nitrógeno (N)	Dumas	5.05	%
Nitratos (N-NO ₃)	Nitración con ácido Salicílico/espectrofotometría	NA	ppm
Fósforo (P)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.69	%
Potasio (K)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	5.95	%
Calcio (Ca)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	1.11	%
Magnesio (Mg)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.31	%
Azúfre (S)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.29	%
Sodio (Na)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.12	%
Cloro (Cl)	Titulación con Nitrato de Plata/Argentometría	NA	%

Micronutrientos

Elemento	Metodología	Resultado	Unidad
Hierro (Fe)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	87.1	ppm
Zinc (Zn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	45.2	ppm
Manganeso (Mn)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	184	ppm
Cobre (Cu)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	8.07	ppm
Boro (B)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	42.1	ppm
Níquel (Ni)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.24	ppm
Molibdeno (Mo)	Digestión ácida multielemental en microondas preparado de acuerdo al método AOAC 2006.03	0.13	ppm

Características Físicas

Determinación	Peso Fresco	Peso Seco	Humedad	Arsénico (As)
Resultado	190	NA	NA	NA
Unidad	g	g	%	ppm

PND = Pendiente por verificación NA = No analizado ND = Sin datos



Gerente del Área Analítica
 Ing. Agustín García Olivares

Los rangos de suficiencia nutricional utilizados en el presente reporte provienen de valores publicados en la literatura y debe utilizarse solo como referencia para evaluar el estado nutricional del cultivo, ya que no incluyen todas las variedades e híbridos que existen actualmente. Este documento se encuentra protegido y registrado ante el Instituto Mexicano de Propiedad Industrial; queda prohibida su reproducción total o parcial sin la autorización de FERTILIDAD DE SUELOS S. DE RL.

Anexo 5. Resultados de las variables morfológicas para los tres tratamientos

Tratamiento	PFP	PFR	PFT	PSP	PSR	PST	NH	AP	RT	LT	LR
1	235	12.1	247.1	13.73	2.4	16.15	24	29.5	1.5	3.5	24
1	159.9	15.62	175.52	9.75	3.1	12.88	19	26.5	1	1.5	23
1	174.7	18.13	192.83	10.71	3.6	14.34	19	28	1.3	3	42
1	208.1	10.5	218.6	12.14	2.1	14.24	26	28.5	1.8	2	25
1	229.7	13.89	243.59	13.53	2.8	16.31	21	24	1.6	1.8	34
1	255.4	18.2	273.6	15.20	3.6	18.84	22	26	1.4	1.7	29
1	167	18.4	185.4	10.30	3.7	13.98	15	27	1.3	2.2	28
1	240	22.6	262.6	14.59	4.5	19.11	24	28.5	1.9	2.1	45
2	147.2	10.7	157.9	8.77	2.1	10.91	26	24	1.4	2.1	45
2	163	18.1	181.1	10.06	3.6	13.68	23	23.5	1.2	1	50.5
2	198	22.2	220.2	12.23	4.4	16.67	28	27	1.6	1.1	46
2	293	31.3	324.3	18.02	6.3	24.28	36	32	1.6	2	55.2
2	265	18.6	283.6	15.76	3.7	19.48	28	29	1.4	2.1	49
2	227.6	31	258.6	14.37	6.2	20.57	34	29	1.2	2	29.7
2	153	36	189	10.50	7.2	17.70	26	24.6	1.1	1.8	27
2	159	31	190	10.56	6.2	16.76	24	27	1.3	2	34
3	103.8	4.7	108.5	6.03	0.9	6.97	13	24	1	3	56
3	129	17.7	146.7	8.15	3.5	11.69	14	25	1.2	3.5	60
3	86.5	13.2	99.7	5.54	2.6	8.18	12	22	0.5	2.8	61
3	104	12.1	116.1	6.45	2.4	8.87	15	23	0.8	2.5	61
3	83.2	14.9	98.1	5.45	3.0	8.43	13	20	1.1	2.8	52
3	77.4	23.6	101	5.61	4.7	10.33	12	22.1	0.8	4	54
3	82.9	6.9	89.8	4.99	1.4	6.37	17	18	1.2	2	56
3	89	10.3	99.3	5.52	2.1	7.58	15	21	1.1	3	49