

**Universidad Autónoma de Sinaloa**  
Colegio en Ciencias Agropecuarias  
Facultad de Agronomía  
**Maestría en Ciencias Agropecuarias**



**TESIS:**  
**RELACIÓN NITRATO-AMONIO Y LUZ EN EL  
CRECIMIENTO Y CONTENIDO NUTRIMENTAL DE  
LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADA EN SISTEMA  
HIDROPÓNICO**

**Que para obtener el grado de Maestro en Ciencias  
Agropecuarias**

**PRESENTA:**  
**PRAXEDES LARA MURRIETA**

**DIRECTOR DE TESIS:**  
**DR. FELIPE AYALA TAFOYA**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:**  
**DR. AZAREEL ANGULO CASTRO**

**Culiacán, Sinaloa, México, a septiembre de 2022**

ESTA TESIS FUE REALIZADA POR **PRAXEDES LARA MURRIETA**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA, Y HA SIDO APROBADA POR EL MISMO, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR

  
DR. FELIPE AYALA TAFOYA

CO-DIRECTOR

  
DR. AZAREEL ANGULO CASTRO

ASESOR

  
DR. MOISÉS GILBERTO YÁÑEZ JUÁREZ

ASESOR

  
DR. CARLOS ALFONSO LÓPEZ ORONA

CULIACÁN, SINALOA, SEPTIEMBRE DE 2022



## **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**

### **CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa, el día 21 de septiembre del año 2022, el que suscribe Praxedes Lara Murrieta alumno del Programa de Maestría en Ciencias Agropecuarias con número de cuenta 0438184-1, de la Unidad Académica Facultad de Agronomía Culiacán, del Colegio de Ciencias Agropecuarias, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Felipe Ayala Tafoya y Dr. Azareel Angulo Castro y cede los derechos del trabajo titulado "Relación nitrato-amonio y luz en el crecimiento y contenido nutrimental de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivada en sistema hidropónico", a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

Praxedes Lara Murrieta  
Nombre completo y firma



## REPOSITORIO INSTITUCIONAL

UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.



## **DEDICATORIA**

Se lo dedico a mis padres, esposa, mis hijos, hermana, mis asesores, maestros y a la Universidad Autónoma de Sinaloa que de alguna u otra manera me ayudaron para finalizar mis estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante estos dos años el cual fue de gran ayuda para la realización de este proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa por darme la oportunidad de utilizar sus instalaciones, también por el apoyo que me brindo para poder finalizar mi estudio profesional

A la Facultad de Agronomía y Facultad de Veterinaria y Zootecnia por permitirme efectuar mis estudios de posgrado en sus aulas, utilizar sus instalaciones (laboratorios, biblioteca, centro de cómputo, salas audiovisuales, etc.) y recibir la experiencia y conocimientos de sus maestros.

Al Dr. Felipe Ayala Tafuya y Dr. Azareel Angulo Castro por el apoyo, confianza y la dedicación para la realización de este proyecto. Así como a todos mis asesores.

A mis compañeros de posgrado y amigos que de cierta manera me apoyaron en la culminación de este escalón profesional.

Para todos de manera muy estimada, muchas gracias.

# CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Generalidades del cultivo de lechuga.....	4
2.1.1 Historia y origen.....	4
2.1.2 Importancia.....	4
2.1.2.1 Social.....	5
2.1.2.2 Económica.....	5
2.1.2.3 Alimenticia.....	6
2.1.3 Clasificación taxonómica.....	6
2.1.4 Variedades de lechuga.....	7
2.1.4.1 <i>Lactuca sativa</i> L. variedad <i>capitata</i> (L.) Janchen.....	7
2.1.4.2 <i>Lactuca sativa</i> L. variedad <i>crispa</i> L.....	7
2.1.4.3 <i>Lactuca sativa</i> L. variedad <i>angustiana</i> All.....	8
2.1.4.4 <i>Lactuca sativa</i> L. variedad <i>acephala</i> Dill.....	8
2.1.4.5 <i>Lactuca sativa</i> L. variedad <i>longifolia</i> (L) Janchen.....	9
2.1.5 Descripción botánica.....	9
2.2 Hidroponía.....	10
2.2.1 Importancia de la hidroponía.....	10
2.2.1.1 Ventajas.....	11
2.2.1.2 Desventajas.....	12
2.3 Sistemas hidropónicos.....	12
2.3.1 Sistema de mecha.....	12

2.3.2	Sistema de flujo y reflujó.....	13
2.3.3	Sistema de goteo.....	14
2.3.4	Sistema de película de nutrientes (NFT).....	14
2.3.5	Sistema de raíz flotante o agua profunda.....	15
<b>2.4</b>	<b>Etapas del cultivo hidropónico de lechuga.....</b>	<b>16</b>
2.4.1	Siembra y trasplante.....	16
2.4.2	Contenedores.....	17
2.4.3	Primera etapa en sistema hidropónico.....	18
2.4.4	Segunda etapa en sistema hidropónico.....	18
<b>2.5</b>	<b>Calidad del agua en sistema hidropónico.....</b>	<b>18</b>
2.5.1	El pH del agua.....	18
2.5.2	Conductividad eléctrica.....	19
2.5.3	Oxigenación.....	20
<b>2.6</b>	<b>Fertilizantes usados en hidroponía.....</b>	<b>20</b>
2.6.1	Nitrato de potasio .....	20
2.6.2	Nitrato de calcio.....	20
2.6.3	Sulfato de magnesio.....	21
2.6.4	Fosfato monopotásico.....	21
2.6.5	Sulfato de potasio.....	21
<b>2.7</b>	<b>Nutrición nítrica.....</b>	<b>21</b>
<b>2.8</b>	<b>Nutrición amoniacal.....</b>	<b>22</b>
<b>2.9</b>	<b>Nutrición nítrico:amoniacal.....</b>	<b>23</b>
<b>2.10</b>	<b>Requerimientos climáticos de la lechuga.....</b>	<b>23</b>
2.10.1	Temperatura.....	23
2.10.2	Humedad.....	23
2.10.3	Luminosidad y fotoperíodo.....	24
<b>2.11</b>	<b>Aspectos relevantes de la luminosidad en lechugas.....</b>	<b>24</b>
<b>III.</b>	<b>HIPOTESIS.....</b>	<b>27</b>



<b>IV.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	28
<b>4.1</b>	<b>Objetivo general</b> .....	28
<b>4.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	28
<b>V.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	29
<b>5.1</b>	<b>Ubicación del área de estudio</b> .....	29
<b>5.2</b>	<b>Establecimiento del cultivo</b> .....	29
5.2.1	Material genético .....	29
5.2.2	Condiciones del experimento y trasplante.....	29
5.2.3	Manejo hidropónico en el sistema raíz flotante utilizado.....	30
5.2.4	Preparación de las soluciones nutritivas.....	31
5.2.5	Riegos.....	31
<b>5.3</b>	<b>Diseño experimental</b> .....	31
<b>5.4</b>	<b>Variables de respuesta</b> .....	33
5.4.1	Crecimiento de planta.....	33
5.4.2	Contenidos nutrimentales en hojas de lechuga.....	33
<b>5.5</b>	<b>Análisis estadístico</b> .....	34
<b>VI.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	35
<b>6.1</b>	<b>Volumen radical y peso seco de raíz</b> .....	35
<b>6.2</b>	<b>Peso fresco y seco de hojas y peso seco total de lechugas..</b>	36
<b>6.3</b>	<b>Concentración de fósforo, potasio, calcio y magnesio en hojas de lechuga hidropónica</b> .....	37
<b>6.4</b>	<b>Concentración de nitrato y amonio en hojas de lechuga hidropónica</b> .....	39
<b>6.5</b>	<b>Correlación entre variables</b> .....	41
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	43
<b>VIII.</b>	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	44

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1 Fertilizantes y dosis, utilizadas en el experimento.....	31
Cuadro 2 Diseño de los tratamientos.....	32
Cuadro 3 Composición química de las soluciones nutritivas e intensidades de luz que se utilizaron en cada tratamiento del experimento.....	33
Cuadro 4 Contenido de fósforo, potasio, calcio y magnesio en hojas de lechuga hidropónica por efecto de la relación nitrato/amonio, PPFD y su interacción, en un sistema de producción hidropónico e iluminación de leds blancos.....	38
Cuadro 5 Contenido de nitrato y amonio en las hojas de lechuga por efecto de la relación nitrato/amonio, PPFD y su interacción en sistema de producción hidropónico e iluminación de leds blancos.....	39
Cuadro 6 Análisis de correlación para variables nitrato, amonio, fósforo, potasio, calcio en lechuga hidropónica Coss. Culiacán, Sinaloa. 2021.....	41
Cuadro 7 Análisis de correlación para variables magnesio, volumen radical, peso fresco hoja, peso seco hoja y peso seco raíz en lechuga hidropónica Coss. Culiacán, Sinaloa. 2021.....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Esquema del sistema hidropónico de mecha.....	12
Figura 2	Esquema del sistema hidropónico de flujo y reflujó.....	13
Figura 3	Esquema del sistema hidropónico de goteo.....	14
Figura 4	Esquema del sistema hidropónico NFT.....	15
Figura 5	Esquema de sistema hidropónico de raíz flotante.....	16
Figura 6	Emergencia de plántulas en semilleros (izquierda), tres días después de la siembra (dds). Planta de lechuga con cuatro hojas verdaderas, a los 20 días dds (derecha).....	17
Figura 7	Cámaras de crecimiento de las lechugas.....	29
Figura 8	Sistema hidropónico de raíz flotante implementado en el experimento.....	30
Figura 9	Efecto de la interacción entre la relación nitrato/amonio (100/0, 75/25 y 50/50) y la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (200 y 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) sobre el volumen radical (A) y peso seco de raíz (B) de planta de lechuga. Medias $\pm$ error estándar con letras idénticas en cada gráfica son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$ ).....	36
Figura 10	Efecto de la interacción entre la relación nitrato/amonio (100/0, 75/25 y 50/50) y la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (200 y 400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) sobre el peso fresco (A) y peso seco de hojas (B) y Peso seco total por planta de lechuga (C). Medias $\pm$ error estándar con letras idénticas en cada gráfica son estadísticamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$ )..	37

## RESUMEN

Las lechugas, son el cultivo de hoja que más se consume a nivel mundial. La concentración alta de nitratos en la hoja puede ocasionar efectos en el ser humano si se excede el consumo diario, lo que puede ser carcinógeno. El uso de diferentes intensidades de iluminación artificial luz (LED) y la adición de amonio en la solución nutritiva pueden convertirse en factores importantes para reducir la concentración de nitratos en lechuga hidropónica. El objetivo del presente estudio fue conocer el efecto que producen tres relaciones nitrato/amonio (100/0,75/25, Y 50/50) en la solución nutritiva y dos intensidades de luz (200 y 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) en el crecimiento y contenido nutrimental de lechuga hidropónica. Las variables evaluadas fueron volumen radical, peso fresco y seco de lechugas, peso seco de raíz y peso seco total y la composición mineral de hojas de lechuga hidropónica. El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 3x2 con seis repeticiones y para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ( $P\leq 0.05$ ). El volumen radical y el peso seco de raíz disminuyó al incrementar el amonio en la solución nutritiva, pero el peso fresco de hojas, el peso seco de hojas y el peso seco total de la lechuga hidropónica no fueron afectados. Incrementar el PPF (densidad de flujo de fotones fotosintéticos) de 200 a 400  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  en las cámaras de crecimiento aumentó el volumen de raíz, el peso fresco de hojas, el peso seco de hojas, el peso seco de raíz y el peso seco total de lechugas. La utilización de amonio en la solución nutritiva afectó negativamente la concentración de potasio y calcio en las hojas de lechuga, mientras que los contenidos de calcio y magnesio fueron afectados de manera negativa por el incremento de PPDF de 200 a 400  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  en las cámaras de crecimiento. La utilización de amonio en la solución nutritiva redujo significativamente la concentración de nitratos y aumentó la concentración de amonio en las hojas de lechuga, especialmente al combinarse con el PPF de 400  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

**Palabras clave:** lechuga, hidroponía, nitrógeno, luz, crecimiento, nutrimento.

## ABSTRACT

Lettuces are the most consumed leaf crop worldwide. The high concentration of nitrates in the leaf can cause effects in humans if the daily consumption is exceeded, which can be carcinogenic. The use of different intensities of artificial lighting (LED) and the addition of ammonium in the nutrient solution can become important factors to reduce the concentration of nitrates in hydroponic lettuce. The objective of the present study was to know the effect produced by three nitrate/ammonium ratios (100/0, 75/25, and 50/50) in the nutrient solution and two light intensities (200 and 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) on the growth and nutritional content of hydroponic lettuce. The variables evaluated were root volume, fresh and dry weight of lettuce, root dry weight and total dry weight, and the mineral composition of hydroponic lettuce leaves. The experimental design was completely randomized with a 3x2 factorial arrangement with six repetitions and the Tukey test was obtained for the comparison of means ( $P \leq 0.05$ ). Root volume and root dry weight will end with increasing ammonium in the nutrient solution, but leaf fresh weight, leaf dry weight, and total dry weight of hydroponic lettuce were not affected. Increase PPF (photosynthetic photon flux density) from 200 to 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in growth chambers increase root volume, leaf fresh weight, leaf dry weight, root dry weight and the total dry weight of lettuce. The use of ammonium in the nutrient solution negatively affected the concentration of potassium and calcium in the lettuce leaves, while the calcium and magnesium contents were negatively affected by the increase in PPF from 200 to 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  in the growth chambers. The use of ammonia in the nutrient solution significantly reduced the concentration of nitrates and increased the concentration of ammonia in the lettuce leaves, especially when combined with the PPF of 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

**Keywords:** lettuce, hydroponics, nitrogen, light, growth, nutrient.

## I. INTRODUCCIÓN

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es un cultivo de gran importancia económica a nivel nacional e internacional por su gran demanda en el mercado, se consume en fresco en ensaladas, como guarnición en alimentos, es baja en calorías y se recomienda en dietas (Baslam *et al.*, 2013). Por otro lado, el sistema de cultivo sin suelo es una alternativa para obtener hortalizas de alta calidad higiénica, con mayor rendimiento y valor que el cultivo en suelo (Quintana *et al.*, 2017). En cuanto a la producción de lechuga hidropónica en un sistema de raíces flotantes sin el uso de sustratos, las plantas se desarrollan directamente en la solución nutritiva (Moreno-Pérez *et al.*, 2015), con lo que se logra una mayor eficiencia en el suministro de agua, nutrición mineral, evita las limitaciones climáticas y de luz (Moreno-Pérez *et al.*, 2015; Saavedra, 2017), menor presencia de enfermedades y plagas (Raviv y Lieth, 2008). Con respecto a la nutrición de cultivos, el nitrógeno es uno de los elementos que influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Chowdhury y Das, 2015). El nitrógeno absorbido representa entre 1.5 a 5% del peso seco total y es el único nutrimento que puede ser absorbido en forma aniónica ( $\text{NO}_3^-$ ), catiónica ( $\text{NH}_4^+$ ), y como aminoácidos (Näsholm *et al.*, 2009). El 50% forma parte de compuestos de elevado peso molecular como proteínas y ácidos nucleicos, mientras que el otro 50% se presenta como compuestos inorgánicos, nitratos y amonio (Azcon-Bieto y Talon, 2000). Asimismo, es conocido que las plantas de lechuga crecen mejor cuando tienen acceso a una combinación de ambas formas nitrogenadas, según Lara-Izaguirre *et al.* (2019). Sin embargo, en cultivos sin suelo se restringe el uso de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) ya que, en altas concentraciones puede ser tóxico para las plantas (Cramer y Lewis, 1993). Pero, el solo uso de nitratos en la solución nutritiva como fuente de nitrógeno, puede causar acumulación de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el tejido vegetal de lechugas que son consumidas en fresco por las personas, debido a que se reduce a nitrito y compuestos de N-nitroso, los cuales son cancerígenos (Barroso, 2011); cerca del 80% de los  $\text{NO}_3^-$  son incorporados en la dieta típica por verduras de hojas (ASTRE, 2015). Cuando la absorción de nitrato excede a la

asimilación, los iones nitratos se pueden acumular en las vacuolas de las células (Blom-Zandstra y Lampe, 1985).

Por otra parte, la gran mayoría de las plantas son capaces de responder de diferentes formas a la calidad de la luz (Nguy-Robertson *et al.*, 2015). El crecimiento de la planta puede ser afectado por la calidad de luz, su intensidad y su duración (Casierra-Posada *et al.*, 2015). Las plantas tienen un sofisticado mecanismo de selección para capturar la energía de la luz, que es necesaria para la fotosíntesis (Jiao *et al.*, 2007). La cantidad y calidad de la luz es el factor determinante para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Fukuda *et al.*, 2008). Algunos estudios en el cultivo de lechuga demuestran que al incrementarse la intensidad de luz se promueve el crecimiento, acumulación de peso debido a una mayor actividad fotosintética y absorción mineral (Hunter y Burritt, 2004; Chen *et al.*, 2014); la magnitud de este efecto dependerá en parte de la especie vegetal y su variedad, además de aspectos como la calidad de luz incidente y el fotoperiodo (Chen *et al.*, 2014).

La luz y el fotoperiodo juegan un papel en el control del contenido de nitratos, que es un aspecto clave relacionado con la calidad de las verduras de hoja (Cavaiuolo y Ferrante, 2014). Se ha planteado que la luz continua reduce el contenido de nitratos en la lechuga (Samuoliené *et al.*, 2011), es decir, la luz estimula la actividad de la enzima nitrato reductasa, que facilita la asimilación y el metabolismo de nitratos (Samuoliené *et al.*, 2009). La productividad y la calidad de la lechuga pueden verse afectada positivamente al modular la calidad e intensidad de la luz, así como otras prácticas culturales (Loconsole *et al.*, 2019). El concepto de calidad involucra una serie de factores relacionados con aspectos físicos, químicos, nutricionales y biológicos que los productores deben de considerar para seguir una estrategia que les permita competir con sus productos en el mercado (Chiesa, 2010).

El uso de diferentes intensidades de iluminación artificial mediante el diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés) y la adición de amonio en la solución nutritiva pueden convertirse en factores importantes para reducir la concentración de nitratos en lechuga hidropónica.

Por lo anterior el objetivo de esta investigación fue valorar el crecimiento y contenido de nitratos en hojas de lechuga hidropónica, con diferentes relaciones nitrato/amonio en la solución nutritiva, bajo diferentes intensidades de luz.



## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Generalidades del cultivo de lechuga

#### 2.1.1 Historia y origen

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es originaria de la cuenca mediterránea. Existen tres especies del género (*L. serriola*, *L. saligna* y *L. virosa*) que son genéticamente muy cercanas a *L. sativa*, se han reconocido relaciones especiales entre especies, especialmente con *L. serriola*, lo que lleva a algunos a sugerir que la lechuga que se cultiva hoy en día descende de esta especie. Las primeras pistas definitivas sobre la existencia de la lechuga datan de alrededor del 4500 a.C. en los tallados de las tumbas egipcias, que están representadas por letras similares a lo que hoy se conoce como el tipo de espárrago. También fue conocido y utilizado por los antiguos persas, griegos y romanos, quienes incluso desarrollaron la técnica de la decoloración. Desde el Mediterráneo, su cultivo se extendió rápidamente por Europa y fue traída a América por los primeros conquistadores, donde se convirtió en una de las hortalizas más populares y económicamente importantes, especialmente en Estados Unidos, donde es la principal hortaliza. Por ahora, debería considerarse una especie de distribución universal. *Lactuca sativa* fue descrita en 1753 por el naturalista sueco Carlos Linneus, texto publicado en la revista *Species Plantarum*. *Lactuca* es un nombre común derivado del latín (que significa "leche"), que se refiere a la savia líquida o lechosa que segrega este tallo cuando se corta, y la *sativa* es un símbolo que hace referencia a su naturaleza como especie cultivada (Olmos, 2021).

#### 2.1.2 Importancia

La lechuga es considerada la hortaliza de hoja por excelencia, dada su alta calidad culinaria como ensalada fresca. Con diferentes formas y colores, es una de las hortalizas más consumidas en el mundo, aunque su principal producción se

concentra en zonas más templadas y subtropicales (Theodoracopoulos *et al.*, 2009). En México, las más cultivadas son la romana y la orejona, aunque también las variedades baby leaf y escarola. Es uno de los principales cultivos en México. En estos tiempos se cultiva al aire libre y en invernaderos, en tierra o hidropónicamente; este último evita las limitaciones causadas por el clima, la luz y las condiciones del suelo. La planta tiene hojas grandes que están enteras o partidas. Esta verdura es muy saludable y por eso es muy utilizada para preparar ensaladas, cremas, sopas y otras comidas. Tiene una textura refrescante y agradable, además es rica en agua y muy digerible para el organismo (Saavedra *et al.*, 2017).

#### 2.1.2.1 Social

Tanto en la producción de hortalizas como en la venta de los productos cosechados la generación de empleos es muy importante, derivados de la mano de obra, maquinaria e insumos. En el cultivo de lechuga se requieren 33 jornales por hectárea, aunque estas cifras pueden variar de región a región (Martínez *et al.*, 2015). En términos generales la actividad hortícola ocupa el 17.5% de la fuerza laboral del país que representa alrededor de 1,200,000 empleos y su valor a precios rurales superó los 2.5 billones de pesos. La generación de empleos indirectos, por la actividad hortícola, es muy importante en muchas áreas del país donde existen industrias que propician fuentes de trabajo e ingresos a gentes dependientes de la horticultura (Briceño, 2021).

#### 2.1.2.2 Económica

La importancia del cultivo de la lechuga ha ido incrementándose en los últimos años, debido tanto a la diversificación de tipos varietales como al incremento de la cuarta gama donde México es el noveno productor de lechuga en el mundo. La lechuga es uno de los principales cultivos en México, en 2020 tuvo una superficie sembrada de 22,284.40 ha y cosechada de 22,269.90 ha, con valor económico de 2,463,002.06 millones de pesos mexicanos (SIAP, 2020). La lechuga se establece en sistema de

temporal o riego (SIAP, 2020). El cultivo de lechuga se establece en 22 estados de la República Mexicana, siendo Guanajuato, Zacatecas y Puebla los principales productores de esta planta herbácea.

### 2.1.2.3 Alimenticia

La lechuga es un alimento muy bajo en calorías debido a su alto contenido en agua y bajo contenido en carbohidratos, proteínas y grasas. En cuanto a su contenido vitamínico, se puede mencionar -con aportes ínfimos- la presencia de vitamina C, folatos y provitamina A ( $\beta$ -caroteno). La tiamina y la vitamina E se encontraron en menor proporción. La absorción del mineral tampoco es especialmente importante, aunque sí contiene pequeñas cantidades de fósforo, potasio, hierro y calcio. Cabe señalar, sin embargo, que las hojas de color verde oscuro, que generalmente son las menos tiernas, son precisamente las hojas ricas en vitaminas y minerales. Contiene flavonoides, principalmente quercetina, que tienen actividad antioxidante, antitrombótica y anticancerígena; seguido de kaempferol y cantidades más bajas de miricetina, luteolina y apigenina. La lechuga también proporciona pequeñas cantidades de  $\beta$ -sitosterol, estigmasterol y campesterol, fitoesteros involucrados en funciones biológicas importantes como la reducción de los niveles de colesterol sérico, la protección contra ciertos tipos de cáncer y más. Algunos autores han atribuido las propiedades calmantes y sedantes de este alimento, posiblemente a la presencia de determinadas sustancias (lactucina, lactucopicrina, etc.). Estas sustancias, que se consideran responsables del sabor amargo de los alimentos que las contienen, son químicamente similares a las que forman los opiáceos, aunque carecen por completo de efectos adictivos y tóxicos (Moreira *et al.*, 2013).

### 2.1.3 Clasificación taxonómica

La lechuga es una planta anual de la familia más grande del reino vegetal, la Asteraceae, anteriormente conocida como Compositeae. Saavedra *et al.* (2017) refiere la siguiente clasificación:

Reino: Plantae  
Clase: Magnoliopsida  
Orden: Asterales  
Familia: Asteraceae  
Subfamilia: Cichorioideae  
Tribu: Lactuceae  
Género: *Lactuca*  
Especie: *sativa* L.

#### 2.1.4 Variedades de lechuga

Según Saavedra *et al.* (2017) se diferencian cinco variedades botánicas de lechuga (*Lactuca sativa* L.).

##### 2.1.4.1 *Lactuca sativa* L. variedad *capitata* (L.) Janchen

Las variedades forman cogollos apretados, la forma de sus hojas suele ser ancha y corresponde a las denominadas lechugas amarra, mantecosas o españolas. Tienen hojas lisas, relativamente delgadas, estriadas, anchas, curvas y de textura suave o mantecosa; las hojas más internas forman un capullo de color amarillo pálido que envuelve a las más nuevas. En general, se pueden distinguir dos subtipos: de verano, destinadas al cultivo exterior, maduras y de mayor tamaño; e invierno, se puede cultivar al aire libre o en invernadero, de tamaño más pequeño y menos concurrido. Estas variedades son más pequeñas y precoces, con un ciclo de 55 a 70 días, por lo que son las más utilizadas para la producción en invernadero.

##### 2.1.4.2 *Lactuca sativa* L. variedad *crispa* L.

Este tipo corresponde a las lechugas que forman cabeza, como las Great Lakes o Batavias. En este grupo destacan dos subtipos: el llamado Iceberg, que tiene una forma de cabeza compacta, y el Batavia, que tiene una cabeza menos densa, más

pequeña y de forma irregular. En cualquiera de los casos, durante el desarrollo la planta pasará del estado de roseta hasta que las primeras hojas se alargan, pero cada aumento en el número de hojas aumenta el grosor de la planta hasta que se vuelve más ancha y larga a medida que madura. Cuando hay de 10 a 12 hojas, las hojas se enrollan, envolviendo las hojas internas, dando como resultado la formación de una cabeza esférica

#### 2.1.4.3 *Lactuca sativa* L. variedad *augustuana* All.

Son conocidas como espárragos o lechugas de tallo que se cultivan únicamente en China. En esta variedad se utilizan principalmente los tallos carnosos, así como las hojas, que pueden ser de color verde o rojizo. Tiene un porte más alto que otras variedades debido al desarrollo de entrenudos más largos en el tallo, con hojas libremente dispuestas que no forman cogollos ni penachos. Sus hojas son estrechas (4 a 6 cm), lanceoladas y largas.

#### 2.1.4.4 *Lactuca sativa* L. variedad *acephala* Dill.

Esta subespecie de lechuga se caracteriza por tener hojas sueltas y dispersas, correspondientes a las conocidas como Lollo Rosa, Lollo Bionda, Hoja de Roble, etc. Se trata de una lechuga cortada o suelta porque, como su nombre indica, no tiene forma de cogollo, sino que sus hojas están sueltas y sin envolver. Aunque se venden enteras, su principal virtud se aprecia en el huerto de casa, ya que sus hojas se pueden recolectar individualmente. Son muy populares para la hidroponía, aunque también se cultivan en tierra. Estas plantas forman un asterisco muy plano, las hojas pueden variar en contenido de antocianinas, produciendo colores o combinaciones de colores muy interesantes, y los bordes de las hojas tienen una forma muy variada.

#### 2.1.4.5 *Lactuca. sativa L. variedad longifolia* (Lam.) Janchen

Las lechugas se utilizan por sus hojas y no forman verdaderos cogollos. Se trata de las denominadas lechugas romanas o Cos, conocida por la isla de Kos en el Mediterráneo oriental cerca de Turquía. La planta desarrolla hojas grandes, erectas, oblongas, ovadas, de 20 a 30 cm de largo y 6 a 10 cm de ancho, con nervaduras prominentes, superficie ligeramente ondulada y márgenes irregularmente dentados. Los tallos son más largos que otras variedades y aún están protegidos por hojas, que forman una cabeza cónica o cilíndrica debido a su disposición vertical y pueden alcanzar pesos considerables, hasta 2 kg.

#### 2.1.5. Descripción botánica

Saavedra *et al.* (2017) describe la lechuga como una planta anual que se autopoliniza, que posee una raíz pivotante relativamente gruesa en el ápice y que se adelgaza gradualmente con la profundidad, que puede alcanzar una profundidad de más de 60 cm. La mayor densidad de raíces laterales está cerca de la superficie. Las hojas sésiles están dispuestas en espiral en un asterisco denso alrededor de los pecíolos cortos. El crecimiento de la roseta puede continuar durante todo el período vegetativo de la planta, como en el caso de la caída de hojas, o formar una punta redondeada o una punta alargada, como en Costinas o Romanas. Existe una variación considerable en color, forma, tipo de superficie, margen y textura entre los diferentes tipos y formas de lechuga. Los niveles de verde hoja pueden variar de oscuro a claro, pero la calidad del verde puede variar con tonos de amarillo. Además, la presencia de antocianinas puede ser en toda la hoja o en zonas que produzcan diferentes tonalidades. Después del período vegetativo maduro, el tallo se alarga, puede alcanzar hasta 1 m de altura y comienza el período reproductivo. Un tallo simple que termina en una inflorescencia, que es una panícula densa que consta de muchas cabezas de flores, cada una de las cuales consta de un número de flores, que varía de 12 a 20. Estas flores son todas radiadas, completas, perfectas y fértiles, rodeadas por 3 o 4 hileras de brácteas. Cada flor consta de un

pétalo amarillo en forma de rayo de cinco dientes. La parte inferior está soldada como un tubo y rodea. Cada flor tiene un carpelo doble, que consta de un tipo alargado y un estigma dividido. Hay cinco estambres, las anteras fusionadas para formar tubos. Las flores se abren solo una vez por la mañana, pueden abrirse durante una hora si la mañana es cálida o varias horas si está fresca y nublada. A medida que la flor se abre, el patrón se alarga a medida que las anteras se separan del interior y los filamentos y el estigma arrastran el polen suelto. El ovario, ubicado debajo de la corola, después de ser fecundado, forma un embrión rodeado de tejido nucelar, endospermo y una cáscara lisa, formando un fruto llamado aquenio, que es peludo en la parte superior. Los aquenios maduran alrededor de dos semanas después de la fertilización y su color puede variar de negro a gris, blanco, marrón o amarillo. Las semillas recién cosechadas a menudo tienen un breve período de latencia y la mayoría de los cultivares tienen diversos grados de tolerancia al calor.

## **2.2 Hidroponía**

La palabra hidroponía tiene su derivación de la combinación de dos palabras griegas hydros (agua) y ponos (trabajo, labor). La hidroponía significa cultivar plantas sin suelo, con las fuentes de elementos nutritivos ya sea como solución nutritiva o agua enriquecida con nutrientes; se puede usar o no un soporte para las raíces (arena o grava). En realidad, se refiere a una técnica en la que las raíces de las plantas están suspendidas en agua (Jones, 2014).

### **2.2.1 Importancia de la hidroponía**

Una de las ventajas que tiene la hidroponía sobre el cultivo en tierra es que permite una mayor concentración de plantas por metro cuadrado. Esto es muy notorio cuando se cultivan plantas, por ejemplo: fresas y lechugas, así como también al cultivar forraje hidropónico (Beltrano y Gimenez, 2015). Con la producción sin suelo se consiguen hortalizas de excelente calidad y sanidad, además de garantizar un uso más eficiente del agua y los fertilizantes. Los rendimientos por unidad de

superficie cultivada son altos debido a las densidades más densas y los altos rendimientos por planta. La hidroponía es actualmente el método de producción hortícola más intensivo; por lo general es de alta tecnología, asociada con altos costos de instalación.

#### 2.2.1.1 Ventajas

La hidroponía ofrece ventajas en comparación con cultivos tradicionales en suelo (Jones, 2014).

- Los cultivos se pueden sembrar donde no existe un suelo adecuado o donde el suelo está contaminado con patógenos causantes de enfermedades.
- La mano de obra para labrar, cultivar, fumigar, regar y otras prácticas tradicionales se eliminan en gran medida.
- Los rendimientos máximos son posibles, lo que hace que el sistema sea altamente productivo.
- Es factible en áreas de alta densidad poblacional (megalópolis).
- El uso eficiente del agua y los nutrientes es una característica del sistema. Esto puede conducir a una reducción de la contaminación de la tierra y los cuerpos de agua.
- Las enfermedades de las plantas transmitidas por el suelo se erradican más fácilmente en ambientes cerrados.
- Un control más completo del entorno es generalmente una característica del sistema (es decir, entorno de raíces, alimentación oportuna de nutrientes o riego).
- Se puede usar agua que contenga sales altamente solubles si se hace con extremo cuidado.
- El horticultor aficionado puede adaptar un sistema hidropónico a jardines tipo casa y patio, incluso en edificios de gran altura. El sistema hidropónico puede ser limpio, liviano y mecanizado.



### 2.2.1.2 Desventajas

- Requiere conocimientos técnicos para su empleo, combinados con la comprensión de los principios de fisiología vegetal y química inorgánica.
- A nivel comercial, el costo inicial es relativamente alto.
- Se requiere atención al detalle.
- Es necesario conocer y manejar las especies cultivadas en el sistema.
- Posibles problemas de comercialización.
- Requiere suministro continuo de agua.

## 2.3 Sistemas hidropónicos

De acuerdo con Macwan (2020), un sistema hidropónico se personaliza y modifica de acuerdo con el reciclaje, la reutilización de solución nutritiva y medios de soporte y los clasifica en:

### 2.3.1 Sistema de mecha

Este es el sistema hidropónico más simple que no requiere electricidad, bomba y aireadores (Figura 1).



Figura 1. Esquema del sistema hidropónico de mecha.

Las plantas se colocan en medio absorbente como fibra de coco, vermiculita o perlita con una mecha de nylon que va desde las raíces de las plantas hasta un depósito de solución nutritiva. El agua o solución nutritiva suministrada a las plantas es a través de la acción capilar. Esta técnica funciona bien para plantas pequeñas, hierbas y especias y no funciona de manera efectiva en plantas que necesitan mucha agua.

### 2.3.2 Sistema de flujo y reflujo

Este es el primer sistema hidropónico comercial que funciona según el principio de inundación y drenaje (Figura 2). La solución nutritiva o agua del depósito sube a través de una bomba de agua hasta el reservorio y permanece allí por cierto periodo de tiempo para proporcionar nutrientes y humedad a las plantas. Además, es posible cultivar diferentes tipos de cultivos, pero el problema de la pudrición de la raíz, las algas y el moho es muy común. Se requiere un sistema modificado con unidad de filtración y se puede automatizar usando una computadora.

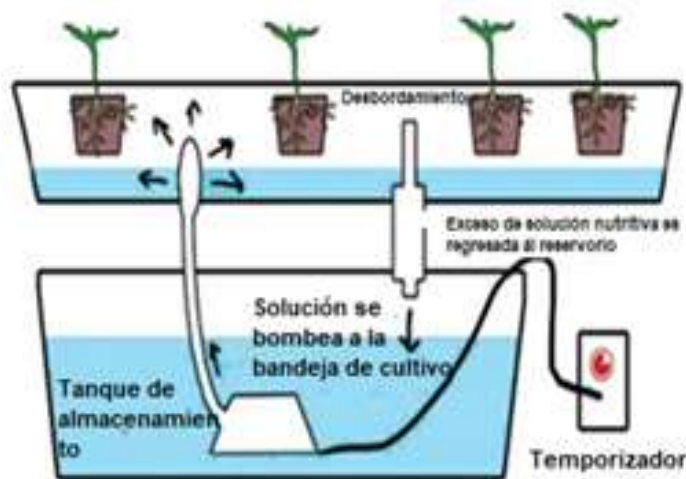


Figura 2. Esquema del sistema hidropónico de flujo y reflujo.

### 2.3.3 Sistema de goteo

El sistema por goteo (Figura 3) es ampliamente utilizado por cultivadores en hogares y de manera comercial. El agua o solución nutritiva del reservorio se proporciona hacia las raíces de las plantas individuales en proporción apropiada con la ayuda de una bomba. Las plantas suelen ser colocadas en un medio de cultivo moderadamente absorbente para que la solución nutritiva gotee lentamente. Varios cultivos se pueden sembrar sistemáticamente teniendo más conservación del agua.

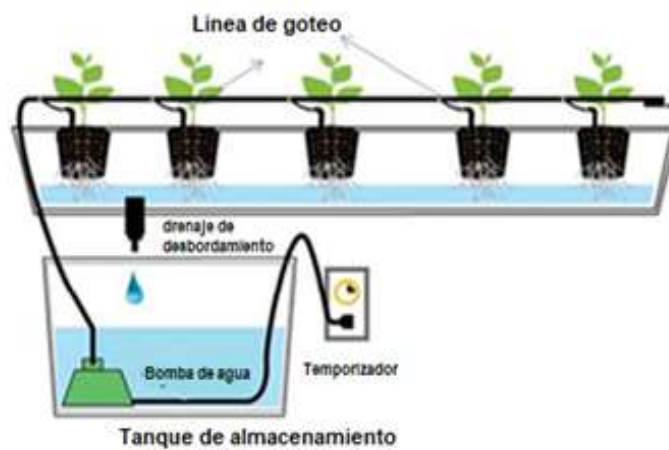


Figura 3. Esquema del sistema hidropónico de goteo.

### 2.3.4 Sistema de película de nutrientes (NFT)

Lo desarrolló el Dr. Alen Cooper para superar la deficiencia del sistema de flujo y reflujos. El nombre de este sistema proviene de la palabra inglesa "Nutrient Film Technique". Una delgada película de solución nutritiva (0.5 a 1.0 cm) fluye a través de un tubo perforado en su parte superior, para introducir la planta (Figura 4). El movimiento de la solución nutritiva dentro de las tuberías y hacia el tanque de fertilizante se crea por gravedad debido a la inclinación. La circulación de la solución no es continua, pero los intervalos de encendido y apagado de la bomba se establecen mediante un temporizador (por ejemplo: 15 minutos encendido y 15 a 30 minutos apagado durante el día; 15 minutos cada 2 a 3 horas durante la noche). La

velocidad de circulación no debe ser excesiva para evitar que las plantas sean arrastradas por la solución y para su absorción por las raíces. Se recomienda un caudal de 1 a 2 litros por minuto (4 a 5%). Una bomba mueve la solución nutritiva desde el tanque de almacenamiento hasta la parte superior de las tuberías. Con esta técnica, muchas plantas de hoja verde se pueden cultivar fácilmente y se utilizan principalmente de manera comercial para la producción de lechuga.

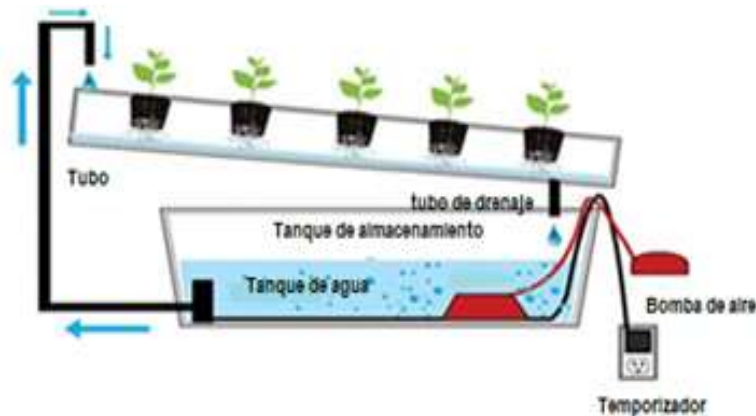


Figura 4. Esquema del sistema hidropónico NFT (técnica de película de nutrientes).

### 2.3.5 Sistema de raíz flotante o agua profunda

Llamada técnica de raíces flotantes, la planta está sostenida por una estructura flotante que se asienta sobre la solución nutritiva con sus raíces sumergidas en ella (Figura 5). Este tipo de sistema es adecuado para hortalizas de hoja. El recipiente con la solución nutritiva debe ser opaco para evitar la luz y que las algas prosperen en su interior. Además, y por la misma razón, se deben evitar las zonas descubiertas de la superficie de la solución. Es importante asegurarse que se permita la infiltración de oxígeno, concentraciones uniformes de nutrientes y control de la temperatura. Esto se logra con bombas de agua y/o aire. Alternativamente, en sistemas a pequeña escala o basados en el hogar, la oxigenación se puede realizar manualmente.

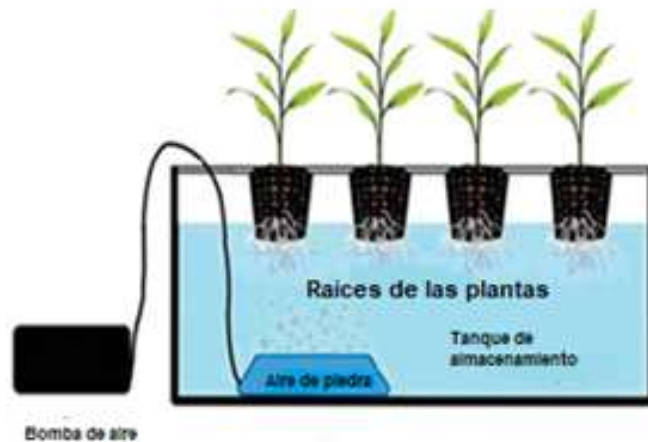


Figura 5. Esquema de sistema hidropónico de raíz flotante.

## 2.4 Etapas del cultivo hidropónico de lechuga

### 2.4.1 Siembra y trasplante

Las semillas pueden sembrarse de manera indirecta en semilleros de plástico o de foamy agrícola recomendados en el cultivo hidropónico. La siembra en charola se realiza en sustrato peat moss previamente humedecido, se coloca una semilla en cada cavidad a una profundidad de 4 mm y se cubre con un poco de sustrato, por último, se riega el semillero con un aspersor procurando que siempre esté húmedo. Se coloca el semillero en un lugar oscuro para acelerar la germinación (Figura 6). El tiempo de permanencia en el semillero es de 4 a 6 semanas, el trasplante se realiza cuando las plantas tienen de 3 a 4 hojas verdaderas (Castañares, 2020).

Las ventajas de este tipo de propagación son:

- Evite el estrés de las plántulas después del trasplante.
- Plántulas equilibradas en tamaño y vigor.
- Producción de plántula más uniforme.
- Producción temprana y más tecnificada de plántulas.
- Ahorro de semillas, un hecho muy importante cuando se trata de híbridos costosos.

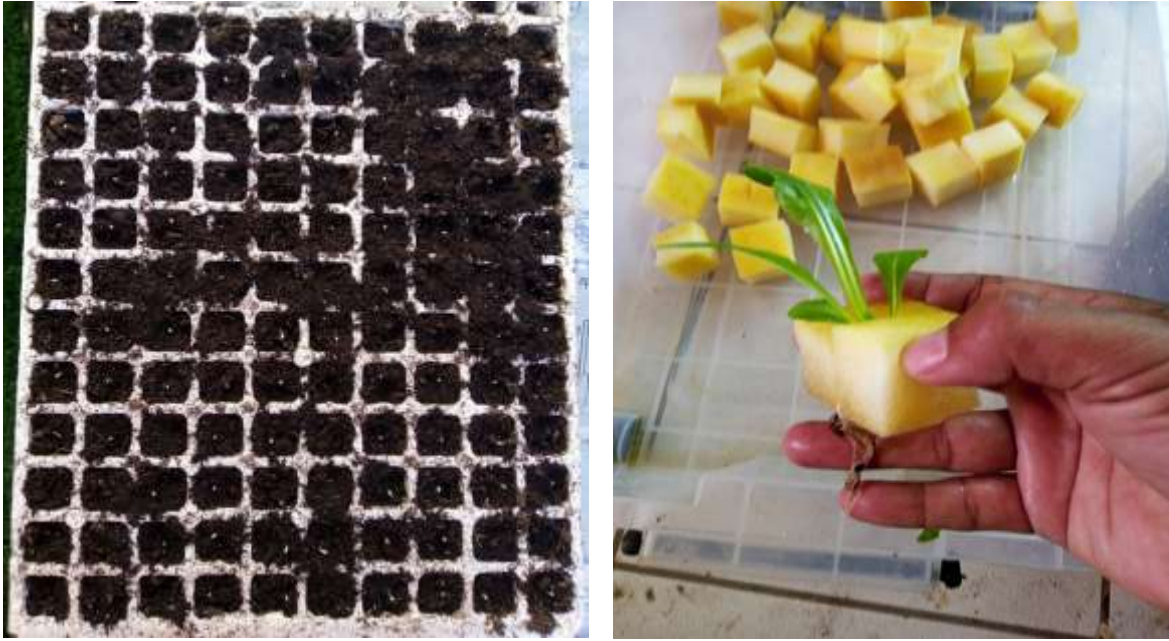


Figura 6. Emergencia de plántulas en semilleros (izquierda), tres días después de la siembra (dds). Planta de lechuga con cuatro hojas verdaderas, a los 20 días dds (derecha).

#### 2.4.2 Contenedores

El contenedor es el componente de los sistemas hidropónicos que como su nombre lo indica, contiene al sustrato y/o solución nutritiva y, por lo tanto, alberga a la raíz. Básicamente deben cumplir con dos características derivadas de las condiciones óptimas para el desarrollo de las raíces de las plantas: impedir la luz y ser del tamaño necesario, pero también deberán estar fabricados de materiales inertes que no liberen sustancias tóxicas o que reaccionen con la solución nutritiva, prefiriéndose así los de plástico PVC. Las formas dependen principalmente del sistema hidropónico elegido, destacando las bolsas y sacos de plástico, macetas, tubos (ya sea colocados en posición horizontal o vertical), canaletas, tinas o camas de cultivo construidas a medida (Sommantico, 2019).

#### 2.4.3 Primera etapa en sistema hidropónico

En lechuga esta fase puede durar de 21 a 28 días, dependiendo de la época del año. Hay menos distancia entre las plantas (10 a 15 cm) y cuando ha formado cuatro hojas puede trasplantarse a la siguiente etapa (Castañares, 2020).

#### 2.4.4 Segunda etapa en sistema hidropónico

La duración de esta fase también puede variar de 21 a 28 días, dependiendo de la época del año. Cuando las plantas son de mayor tamaño, se debe aumentar la distancia entre ellas. La variación del espaciamiento entre plantas según su tamaño optimiza el uso del espacio, aumentando la productividad por unidad de superficie (Castañares, 2020).

### **2.5 Calidad del agua en sistema hidropónico**

Todos los sistemas de cultivo hidropónico requieren cantidades relativamente considerables de agua pura. Los mejores suministros de agua para uso doméstico o agua para uso agrícola frecuentemente contienen sustancias y elementos que pueden afectar (positiva o negativamente) el crecimiento de las plantas. Incluso el agua de lluvia recogida del invernadero, ya que la cubierta puede contener sustancias inorgánicas y orgánicas que pueden afectar al crecimiento de la planta. En todos los lugares en el mundo la calidad del agua puede ser un factor importante para el uso hidropónico debido a su contenido de diversas sustancias inorgánicas y orgánicas. Por lo tanto, un análisis completo del agua a utilizar para cualquier tipo de cultivo hidropónico es esencial (Jones, 2014).

#### 2.5.1 El pH del agua

El pH del agua puede variar en un amplio rango; además, puede ser difícil determinar con precisión si el agua contiene pocos iones. Por ejemplo, el pH del

agua pura no es una determinación fácil de medir y si dicha agua está expuesta al aire, su pH variará dependiendo de la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido. La proporción de cationes y aniones, los tipos de iones y su concentración en solución determinará el pH del agua (Jones, 2014). Las soluciones con pH  $\geq 7.5$  producen disminución en la absorción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, independientemente de la concentración de éstos, ejerciendo un efecto similar sobre el ion fosfato. Descensos de pH restringen la absorción de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y aumenta la de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Las soluciones con pH  $\leq 4$  disminuye la absorción de K y produce un desbalance en la polaridad de las membranas celulares de las raíces. Los incrementos de pH en la solución nutritiva producen la precipitación de iones, como el Fe, cuya normal absorción es interrumpida (Beltrano *et al.*, 2015).

La disponibilidad máxima de nutrientes se encuentra entre pH 5.5 y 7.0. Las mediciones deben tomarse diariamente, donde se utiliza un dispositivo medidor llamado peachímetro. Debido a la alcalinidad del agua y la reactividad de los fertilizantes, muchas veces es necesario bajar el pH. Esto se logra principalmente con la adición de ácidos nítrico, fosfórico o sulfúrico para uso agrícola. La corrección del pH se puede realizar directamente en el tanque de nutrientes, el ácido debe agregarse lentamente y medirse el pH hasta obtener el valor deseado (Castañares, 2020).

### 2.5.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es un parámetro que mide el total de sales disueltas en el agua y evalúa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, generalmente se expresa en dS m<sup>-1</sup> (decisiemens por metro), esto permite conocer si la solución excede o carece de la cantidad de nutrientes para los cultivos hortícolas. En cultivo hidropónico es necesario medir la CE de la solución nutritiva con regularidad y compensar la falta de nutrientes o el exceso según sea el caso. El rango de CE adecuado para el crecimiento de las plantas de lechuga se encuentra en 2.7 dS m<sup>-1</sup> a 25 °C. Se realiza con un aparato llamado conductímetro (Balcaza, 1998).



### 2.5.3 Oxigenación

El contenido de oxígeno de la solución nutritiva afectará la actividad de las raíces, especialmente la absorción de agua y nutrientes. En un sistema de raíces flotantes, la oxidación se puede lograr por medio de un aireador o una bomba centrífuga (Castañares, 2020). La lechuga crece satisfactoriamente en un nivel de oxígeno disuelto óptimo de  $8 \text{ mg L}^{-1}$ , pero puede crecer satisfactoriamente a niveles de por lo menos  $4 \text{ mg L}^{-1}$  (Alvarado *et al.*, 2001).

## 2.6 Fertilizantes usados en hidroponía

### 2.6.1 Nitrato de potasio

Incrementa de manera notable la CE, dado que una disolución de  $0.5 \text{ g L}^{-1}$  en agua pura representa una CE de  $0.69 \text{ dS m}^{-1}$ . Constituye la fuente más utilizada en fertirrigación: aporta 12% de N y 45% de  $\text{K}_2\text{O}$ , frecuentemente se cubren las necesidades de K con el uso exclusivo de este fertilizante (Muñoz-Ramos, 2003).

### 2.6.2 Nitrato de calcio

Mediante este fertilizante se suministran las cantidades adicionales de Ca que se complementan con las que aporta el agua, de esta manera, en parte se contrarrestan los efectos adversos del sodio y se previene con ello la degradación de la estructura del suelo, además permite balancear la relación Ca/Mg. Un suministro de Ca es fundamental para evitar o reducir la fisiopatía “blossom-end rot” en frutos de tomate, pimiento y melón. El N en concentración de 1.16% está en forma amoniacal y puede ser suficiente para cubrir la demanda de N en esta forma o en etapas de gran demanda en el cultivo hidropónico. Causa un incremento medio en la CE; así, una disolución de  $0.5 \text{ g L}^{-1}$  presenta una CE de  $0.60 \text{ dS m}^{-1}$  (Muñoz-Ramos, 2003).

### 2.6.3 Sulfato de magnesio

Generalmente es la fuente de Mg empleada en hidroponía, para evitar carencias de este. También permite no modificar los equilibrios de NPK. Los incrementos de CE son bajos, una disolución de  $0.5 \text{ g L}^{-1}$  tiene una CE de  $0.41 \text{ dS m}^{-1}$  (Muñoz-Ramos, 2003).

### 2.6.4 Fosfato monopotásico

Es un abono de excelentes cualidades físicas-químicas y nutricionales, y por lo mismo, su precio es elevado. En hidroponía es empleado con aguas de muy buena calidad, con escasa presencia de bicarbonatos, donde el uso de ácido fosfórico hace descender el pH a valores extremadamente bajos. Es un abono que aporta valores bajos en CE, una disolución de  $0.5 \text{ g L}^{-1}$  presenta una CE de solo  $0.37 \text{ dS m}^{-1}$  (Muñoz-Ramos, 2003).

### 2.6.5 Sulfato de potasio

Es el segundo fertilizante potásico más utilizado. Su uso está motivado principalmente por situaciones de potencial deficiencia de azufre o por la necesidad de fertilizantes potásicos sin aumentar el aporte de nitrógeno. Una disolución de  $0.5 \text{ g L}^{-1}$  muestra una CE de  $0.88 \text{ dS m}^{-1}$ , por lo que provoca aumentos de CE altos, limitando su empleo en aguas de alta salinidad, sobre todo si en ellas predomina el ion sulfato (Muñoz-Ramos, 2003).

## 2.7 Nutrición nítrica

Los fertilizantes nítricos son fuentes convencionales de nitrógeno en el cultivo hidropónico de hortalizas (Resh, 2022). Estos fertilizantes son preferidos porque son fisiológicamente neutros y de baja toxicidad. Sin embargo, tienen dos desventajas principales: (1) el nitrato puede acumularse en las plantas cuando la absorción es

mayor que su asimilación. Lo anterior, puede provocar daños a la salud humana (falta de oxígeno en la sangre y cáncer en el estómago) al ser consumidos (Wright y Davison, 1964; Greenwood, 1990); (2) el costo económico de los fertilizantes nítricos es mayor que el de otras fuentes nitrogenadas, por ejemplo, los fertilizantes amoniacales, los cuales son actualmente la fuente más barata de nitrógeno. Debido a lo anterior, sería conveniente la sustitución parcial del nitrato por el amonio, sin embargo, el amonio en condiciones normales generalmente es más tóxico para las plantas que el nitrato, por lo que solo se recomienda su uso en pequeñas cantidades (Baca, 1983).

## **2.8 Nutrición amoniacal**

La nutrición amoniacal produce un patrón de absorción catiónica basado principalmente en  $\text{NH}_4^+$ , lo que disminuye la absorción de otros cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  (Marschner, 1995). Asimismo, induce la excreción radicular de  $\text{H}^+$  al medio para mantener la electroneutralidad en la planta (Imas *et al.*, 1997). La disminución de pH en la rizosfera puede causar toxicidad de Al y Mn, y tiene en general un efecto adverso sobre el crecimiento radical y sobre el desarrollo vegetal (Ganmore-Neumann y Kafkafi, 1980; 1983). La forma de absorción amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ), en ciertas concentraciones, puede resultar tóxica para muchas plantas (Salsac *et al.*, 1987). La toxicidad por amonio varía entre especies y entre cultivares (Claussen y Lenz, 1999) y se ha atribuido a diversos mecanismos: (1) cuando la absorción de  $\text{NH}_4^+$  excede a su asimilación el amonio se acumula en el tejido, lo cual es dañino para la planta (Reisenauer, 1978); (2) la absorción de iones  $\text{NH}_4^+$  por las raíces libera iones hidrógeno acidificando el medio y afectando a la raíz (Maynard y Barker, 1969); (3) una disminución en la absorción de cationes (Kirkby y Mengel, 1967); (4) alteraciones en el balance osmótico o en el metabolismo de las fitohormonas (Gerendás *et al.*, 1997).

## **2.9 Nutrición nítrico:amoniacal**

Aunque la mayoría de las plantas absorben preferentemente los nitratos, es conocido que los mayores rendimientos son obtenidos con una combinación de nitrato y amonio (Haynes y Goh, 1978). En presencia de esta mezcla, la actividad de la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPCase) en las raíces se incrementa aumentando la producción de esqueletos carbonados y la asimilación de esta forma las concentraciones de amonio.

## **2.10 Requerimientos climáticos de la lechuga**

### **2.10.1 Temperatura**

La lechuga es una planta de estación fresca que necesita buena tierra y mucha agua, pero para producir productos de calidad, necesita un buen clima. Esta hortaliza crece mejor con temperaturas diurnas entre 18 y 25 °C y temperaturas nocturnas entre 10 y 15 °C (Saavedra *et al.*, 2017). Por debajo de los 5 °C la lechuga no emite raíces nuevas, pero sí a partir de los 10 °C. Sin embargo, es menos tolerante a temperaturas altas que a temperaturas relativamente bajas. Los climas sobrecalentados provocan fácilmente la dispersión de tallos y flores, lo que comúnmente se conoce como "desprendimiento" de las plantas, también provoca que las hojas se mantengan más largas que anchas, lo que evita el acogollado (Carrasco y Sandoval, 2016).

### **2.10.2 Humedad**

La cantidad de vapor de agua en el aire es un factor importante en la transpiración. Su presencia puede expresarse en gramos por kilogramo de aire (humedad específica), en gramos de agua por m<sup>3</sup> de aire (humedad absoluta) y como humedad relativa. Para la lechuga, la humedad relativa óptima de día y noche oscila entre 60 y 70%, estos valores permiten una adecuada transpiración y los procesos relacionados con el desarrollo y crecimiento (Ruiz *et al.*, 2013).

### 2.10.3 Luminosidad y fotoperiodo

La luminosidad tiene una importancia grande, principalmente cuando es escasa, ya que afecta a la floración, fecundación y robustez de la planta. Respecto al fotoperiodo, aunque es una planta neutral, prefiere condiciones intermedias de luz (Ruiz *et al.*, 2013).

La luz diaria integral (DLI, por sus siglas en inglés) es la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR por sus siglas en inglés, 400 a 700 nm de longitud de onda) recibida durante 24 horas en función de la intensidad de la luz y se expresa como moles de luz por metro cuadrado por día ( $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). La intensidad de luz representa la cantidad o densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD, por sus siglas en inglés) que inciden en una unidad de área en un segundo (luz instantánea) y su unidad de medida es  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Faust y Logan, 2018). El cultivo de lechuga requiere un acumulado de fotones diarios (DLI) de 12 a 17  $\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$ , lo que representa un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 horas oscuridad con una intensidad de luz de 200 a 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Albright *et al.*, 2000).

## 2.11 Aspectos relevantes de la luminosidad en lechugas

La iluminación de plantas con luz artificial está diseñada para cultivar plantas donde hay poca o ninguna luz natural o donde se esperan días prolongados durante los meses de verano o prolongar la luz en invierno. Las luces de cultivo tradicionalmente intentaban parecerse a la luz del sol en términos de su composición espectral, aunque no fue hasta la llegada de los LED, cuando realmente es posible construir luces personalizadas o espectros. Las lámparas de uso más común en los invernaderos son las de sodio de alta presión (HPS), emiten principalmente en las regiones amarilla y roja del espectro, mientras que las lámparas fluorescentes se usan comúnmente en los cuartos de cultivo que incorporan muchas luces ligeramente más azules. Debido a los beneficios ambientales y la eficiencia de producción, las luces LED se han descrito como el invento más revolucionario en tecnología de iluminación hortícola en las últimas décadas (Bures *et al.*, 2018).

Ramos y Ramírez (2016) señalan que básicamente es necesario proponer y probar un sistema de iluminación que pueda estimular positivamente la fotosíntesis de ciertas plantas, que sea efectivo para plantas de interior donde el control total y/o procesos automatizados y parciales pueden mostrar la importancia de la iluminación artificial LED. Así, la luz artificial para el crecimiento de las plantas funciona de tres formas diferentes: aportan toda la luz que la planta necesita para crecer, agregan luz natural, especialmente durante los meses de invierno cuando las horas de luz son cortas; o aumentan la exposición solar para estimular el crecimiento y la floración. Los mismos autores señalan que la vida media es de unas 50,000 horas y su tiempo de encendido es prácticamente instantáneo, su sencillez hace que pueda albergar diferentes tipos de LED (color) en una misma carcasa, su coste disminuye día a día y su eficiencia aumenta, indicando que el consumo de energía es más bajo que cualquier otra fuente de luz artificial. Otro aspecto importante de las lámparas y/o dispositivos LED es que el ángulo de emisión de la luz es inferior a 180°, lo que significa que toda la luz producida se enfoca hacia la parte frontal del dispositivo. También, se pueden utilizar superficies reflectantes para la atenuación de la intensidad de luz (Ramos y Ramírez, 2016).

Los efectos de la luz sobre las enzimas de las plantas son diversos: (1) el aumento de la captura de  $\text{NO}_3^-$  por los conductos vasculares de las hojas (2) mantener niveles adecuados de polirribosomas y capacidad de síntesis de proteínas, (3) la relación con el sistema fotocromico determina, entre otros fenómenos, un aumento significativo del transporte de nitrato a través de la membrana, y (4) la inactivación de los inhibidores del nitrato reductasa formados en la oscuridad y en la luz acelera la desnitrificación (Matt *et al.*, 2001).

Abarca *et al.* (2020) evaluaron la influencia de la calidad e intensidad de luz en el crecimiento y absorción total de nutrientes en el cultivo de lechuga romana tipo baby, demostrando que, a mayor intensidad de luz, considerando su calidad, se promueve un mayor crecimiento en el cultivo. Regulando la cantidad de luz ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y el espectro se pueden obtener, diferentes características de lechugas que satisfacen las necesidades del agricultor para cada tipo de instalación y producto (floración, crecimiento vegetativo, etc.). También impulsa la acumulación de

compuestos químicos en los cultivos que pueden o no tener relevancia en la salud humana (Bures *et al.*, 2018).

### **III. HIPÓTESIS**

Aumentar tanto la concentración de amonio en la solución nutritiva, con respecto al ion nitrato, como la intensidad de luz incrementa el crecimiento de la lechuga cultivada en hidroponía y reduce las concentraciones de nitratos en las hojas.



## **IV. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo general**

Conocer el efecto que producen tres relaciones nitrato/amonio de la solución nutritiva y dos intensidades de luz en el crecimiento y contenido de nitratos en hojas de lechuga hidropónica.

### **4.2. Objetivos específicos**

1. Determinar el contenido de nitrato en plantas de lechuga hidropónica inducido por tres relaciones nitrato/amonio en la solución nutritiva, dos intensidades de luz y la combinación de estas.
2. Determinar el contenido nutrimental en la lechuga hidropónica cultivada con dos intensidades de luz y tres relaciones nitrato/amonio.
3. Establecer la influencia de dos intensidades de luz y tres relaciones nitrato/amonio sobre el crecimiento radical y foliar de las plantas de lechuga hidropónica.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Ubicación del área de estudio

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Fisiología y Anatomía Vegetal de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, ubicado en el kilómetro 17.5 de la maxipista Culiacán-Mazatlán.

### 5.2 Establecimiento del cultivo

#### 5.2.1 Material genético

Se utilizaron plantas de lechuga orejona 41-co1225 (Rijk Zwaan).

#### 5.2.2 Condiciones del experimento y trasplante

En el trabajo de investigación se utilizaron dos cámaras de crecimiento de 1.94 m<sup>3</sup> de espacio útil (1.66 x 1.62 x 0.72 m) con condiciones de temperatura controlada 22 a 24 °C, humedad relativa de 60 a 80% y concentración de dióxido de carbono ambiental (Figura 7).



Figura 7. Cámaras de crecimiento de las lechugas.

La siembra se realizó en charolas de unicel de 200 cavidades, rellenas con turba (PRO-MIX® FLX, Premier Tech Horticulture, EE. UU). El trasplante a los contenedores con solución nutritiva se realizó una vez que las plantas desarrollaron las primeras cinco hojas verdaderas. Se colocaron tres contenedores (50 x 34 x 21 cm) en cada cámara de crecimiento, con un volumen de 20 litros de solución nutritiva y en la superficie de cada contenedor se colocaron seis plantas de lechuga. La iluminación constó de tubos transparentes de LEDs blancos (T8 LED 30 W, 6500 K, 2400 lm; MRGL-08, Megaluz, México). La primera cámara de crecimiento contó con 9 tubos de LEDs blancos para obtener una intensidad total de  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y la segunda con 5 tubos LEDs blancos para una intensidad total de  $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . El trasplante se realizó el 13 de mayo de 2021.

### 5.2.3 Manejo hidropónico en el sistema raíz flotante utilizado

Las plantas fueron colocadas en canastillas para raíz flotante y sostenidas sobre perforaciones realizadas en las tapas de los contenedores de manera que sus raíces quedaban inmersas en la solución nutritiva (Figura. 8).



Figura 8. Sistema hidropónico de raíz flotante implementado en el experimento.

#### 5.2.4 Preparación de las soluciones nutritivas

Las diferentes soluciones nutritivas se prepararon con sales inorgánicas hidrosolubles y agua destilada (Cuadro 1), a las que se añadieron micronutrientes mediante la fuente Quelato Fullmix B, que tiene la siguiente composición (% p/p): Fe 7.50%, Mn 3.70%, B 0.70%, Cu 0.30%, Zn 0.60% y Mo 0.20%.

Cuadro 1. Fertilizantes y dosis, utilizadas en el experimento.

Fertilizante	Nitrato/amonio		
	100/0	75/25	50/50
Dosis (g 1000 L <sup>-1</sup> )			
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	1062	902.7	708
KNO <sub>3</sub>	303	136.35	0
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	261	280.575	426.3
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	492	418.2	344.4
kH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	136	187	0
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0	0	201.25
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	198	280.5
CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	0	0	25.5

#### 5.2.5 Riegos

Las raíces de las plantas siempre estuvieron en contacto con la solución nutritiva. La cual se renovó cada siete días, se ajustó el pH con un medidor de pH/CE/TDC (HI-98130, Hanna) entre 5.5 y 6.0 con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y se colocaron bombas de aire para suministrar oxígeno a la solución nutritiva.

### 5.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar, con arreglo factorial 3A x 2B, de seis tratamientos y seis repeticiones. El factor A correspondió a la relación

nitrato/amonio, con tres niveles: 100/0, 75/25, 50/50 y el factor B fue la intensidad de luz, con dos niveles: 200 y 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Cuadro 2).

Cuadro 2. Diseño de los tratamientos.

(A) Relación nitrato/amonio			
(B) PPFD ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	100/0	75/25	50/50
200	T1	T2	T3
400	T4	T5	T6

A y B = factores, PPFD = densidad de flujo de fotones fotosintéticos, T = tratamientos.

A causa de las relaciones nitrato/amonio se hicieron las modificaciones a la solución nutritiva universal (Steiner, 1984), que se muestran en el Cuadro 3. La intensidad de luz expresada en PPFD ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) fue determinada con un ceptómetro (AccuPAR LP-80, Decagon). La unidad experimental constó de una planta de lechuga, lo que originó un total de seis tratamientos con seis repeticiones con un total de 36 unidades experimentales correspondientes a cada planta de lechuga. Por otra parte, la solución de Steiner no incluyó el  $\text{NH}_4^+$  como fuente de N, por lo que la modificación consistió en la adición de una determinada concentración de  $\text{NH}_4^+$ , lo que reduce una cantidad equivalente a la concentración total de  $\text{NO}_3^-$  (12 meq  $\text{L}^{-1}$ ). Al disminuir la cantidad de  $\text{NO}_3^-$  disminuyó la concentración relativa de los aniones ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), estos aniones deben mantener la concentración total de 20 meq  $\text{L}^{-1}$ , por lo que se incrementaron las concentraciones de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  hasta igualar la concentración de  $\text{NH}_4^+$ , manteniéndose la relación mutua de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . La adición de  $\text{NH}_4^+$  en la solución nutritiva incrementó la concentración de los cationes ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{NH}_4^+$ ); de este modo, la cantidad de  $\text{NH}_4^+$  añadido se restó de las concentraciones de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , lo que permitió mantener la concentración total de los cationes en 20 meq  $\text{L}^{-1}$ , siempre manteniendo la relación mutua entre  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ . Se ajustaron las concentraciones de los iones mediante un factor de corrección (0.024), propuesto por Steiner (1984), debido a que las modificaciones provocaron un cambio en la presión osmótica de la

solución nutritiva. Las soluciones tenían una presión osmótica -0.072 MPa y una CE de 2 dS m<sup>-1</sup>.

Cuadro 3. Composición química de las soluciones nutritivas e intensidades de luz que se utilizaron en cada tratamiento del experimento.

Tratamiento	PPFD ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
		-----meq L <sup>-1</sup> -----						
1	200	12	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00	0.00
2	200	9	1.37	9.62	5.95	7.65	3.40	3.00
3	200	6	1.75	12.25	4.9	6.3	2.80	6.00
4	400	12	1.00	7.00	7.00	9.00	4.00	0.00
5	400	9	1.37	9.62	5.95	7.65	3.40	3.00
6	400	6	1.75	12.25	4.90	6.30	2.80	6.00

## 5.4 Variables de respuesta

### 5.4.1 Crecimiento de planta

La cosecha de las plantas de lechuga se realizó a los 29 días después del trasplante. Se registró el peso fresco de cada lechuga con una balanza de precisión (CP622, Sartorius, Alemania) y el volumen radical con la técnica de desplazamiento de agua (Böhm, 1979). La raíz completa, se sumergió en una probeta graduada con un determinado volumen de agua, el resultante del volumen desplazado se expresó en cm<sup>3</sup>. También se registró el peso seco (g) de hoja y raíz con una balanza de precisión.

### 5.4.2 Contenidos nutrimentales en las hojas de lechuga

La composición mineral en hojas de lechuga se evaluó 29 días después del inicio de la aplicación de los tratamientos, se colocaron en estufa con circulación forzada de aire (9053L, Ecoshel, E.U.A.) a 70 °C durante 72 h, luego fueron procesados en

un molino eléctrico (MOGRA1, Surtek, México) y pasados por un tamiz con malla 40. Al material resultante se le realizó digestión seca en una mufla (DTT 434, Caisa, México) a 550 °C durante 5 h, se le agregaron 2 mL de ácido clorhídrico y se colocó en una plancha de calor hasta evaporar el líquido, posteriormente se le agregó agua destilada, se filtró mediante un papel filtro y el filtrado se aforó en un matraz a 100 mL. Los filtrados se colocaron en un recipiente para posteriormente determinar las concentraciones de P, K, Ca y Mg. Para la realización de estos análisis se utilizaron los siguientes métodos. El P por colorimetría de complejos molibdofosfóricos reducidos con ácido ascórbico (AOAC, 1980). El K, Ca y Mg por espectrometría de absorción atómica (Aanalyst 200, Perkin Elmer, E.U.A.), según Rodríguez y Rodríguez (2015). Para K, Ca, Mg y P se utilizaron extractos provenientes de digestión seca, conforme a las metodologías propuestas por Motsara y Roy (2008). Para la estimación de los contenidos totales, se consideró las concentraciones de cada elemento en el tejido vegetal, así como el peso de la biomasa seca de la parte aérea.

El contenido de nitratos se determinó por el método de Cataldo y el contenido de nitrógeno reducido (NR) se determinó por el método de Nessler descritos por Alcántar y Sandoval (1999).

## **5.5 Análisis estadístico**

Para el análisis de varianza realizado a los datos obtenidos de las variables estudiadas, se evaluaron los factores principales del diseño factorial: relación nitrato/amonio en la solución nutritiva e intensidad de luz, así como su interacción. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistica (Statsoft, 2004).

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Volumen radical y peso seco de raíz

Los resultados de volumen radical y peso seco de raíz de lechuga se muestran en la Figura 9. Ambas variables fueron estadísticamente ( $P \leq 0.05$ ) afectadas por la relación nitrato/amonio y densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD). La relación nitrato/amonio 50/50 disminuyó en 28 % el volumen radical (Figura 9A) y en 9% el peso seco en raíz (Figura 9B), comparado con las plantas sin aplicación de  $\text{NH}_4^+$  (100/0).

Estos resultados en las variables volumen radical y peso seco de raíz se pueden atribuir a que el amonio suministrado acidificó el medio, no puede ser almacenado en la raíz y no es convertido rápidamente en compuestos orgánicos lo que provoca toxicidad (Magalhaes y Huber, 1989). Tiene relación con lo reportado por Parra *et al.* (2012), quienes observaron en plantas de tomate una disminución considerable en volumen radical cuando se aumentó la relación nitrato/amonio 70/30, quienes sugieren que las raíces de plantas de tomate también pueden tener alta sensibilidad a la relación nitrato/amonio. Con respecto al peso seco en raíz, esta disminución concuerda con lo reportado por Lara-Izaguirre *et al.* (2019), ya que mencionan que la relación nitrato/amonio 50/50 causó un 16% menos peso seco en raíz de lechuga que en el resto de los tratamientos.

Por otra parte, con la PPFD de  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  se obtuvo un volumen de raíz 65% mayor (Figura 9A) y 90% más peso seco de raíz (Figura 9B), comparados con la PPFD de  $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Estos resultados concuerdan con lo reportado por Weiguo *et al.* (2012) y Avendaño *et al.* (2020), quienes señalan que con una intensidad de 400 a  $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y calidad de luz óptima se obtuvieron lechugas con mayor calidad y crecimiento.



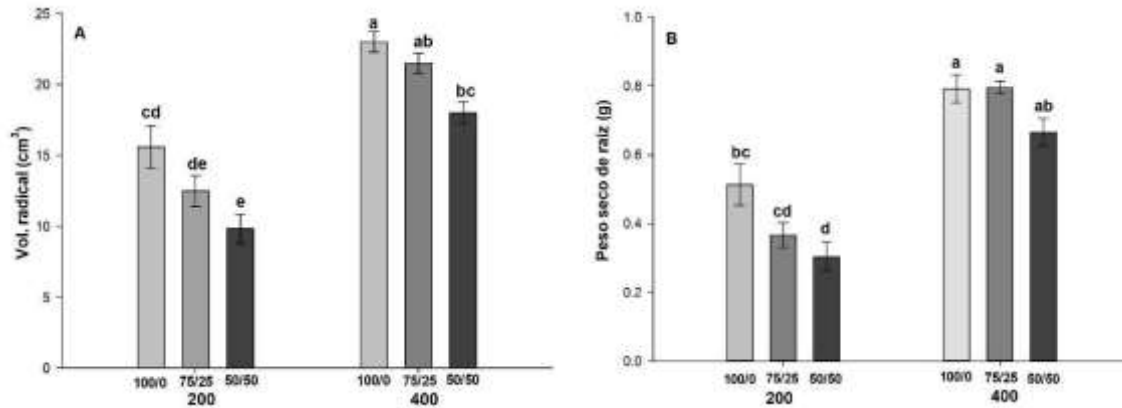


Figura 9. Efecto de la interacción entre la relación nitrato/amonio (100/0, 75/25 y 50/50) y la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (200 y 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) sobre el volumen radical (A) y peso seco de raíz (B) de planta de lechuga. Medias  $\pm$  error estándar con letras idénticas en cada gráfica son estadísticamente iguales (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

## 6.2 Peso fresco y seco de hojas y peso seco total de lechugas

La relación nitrato/amonio no afectó estadísticamente ( $P \leq 0.05$ ) las variables peso fresco, peso seco de hojas y peso seco total en lechugas hidropónicas (Figura 10). Sin embargo, con la densidad de flujo de fotones fotosintéticos de 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  promovió un 55% más peso fresco de hojas (Figura 10A), 61 % mayor peso seco de hojas (Figura 10B) y 63% y más peso seco total (Figura 10C), comparados con los respectivos pesos obtenidos con 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Se puede inferir que el incremento en peso de estas variables se debe a que, a mayor intensidad luminosa mayor actividad fotosintética, estos resultados coinciden con los reportados por Johkan *et al.* (2012) y Avendaño-abarca *et al.* (2020), quienes señalan que al aumentar la intensidad luminosa se incrementa la biomasa y peso en lechugas hidropónicas.

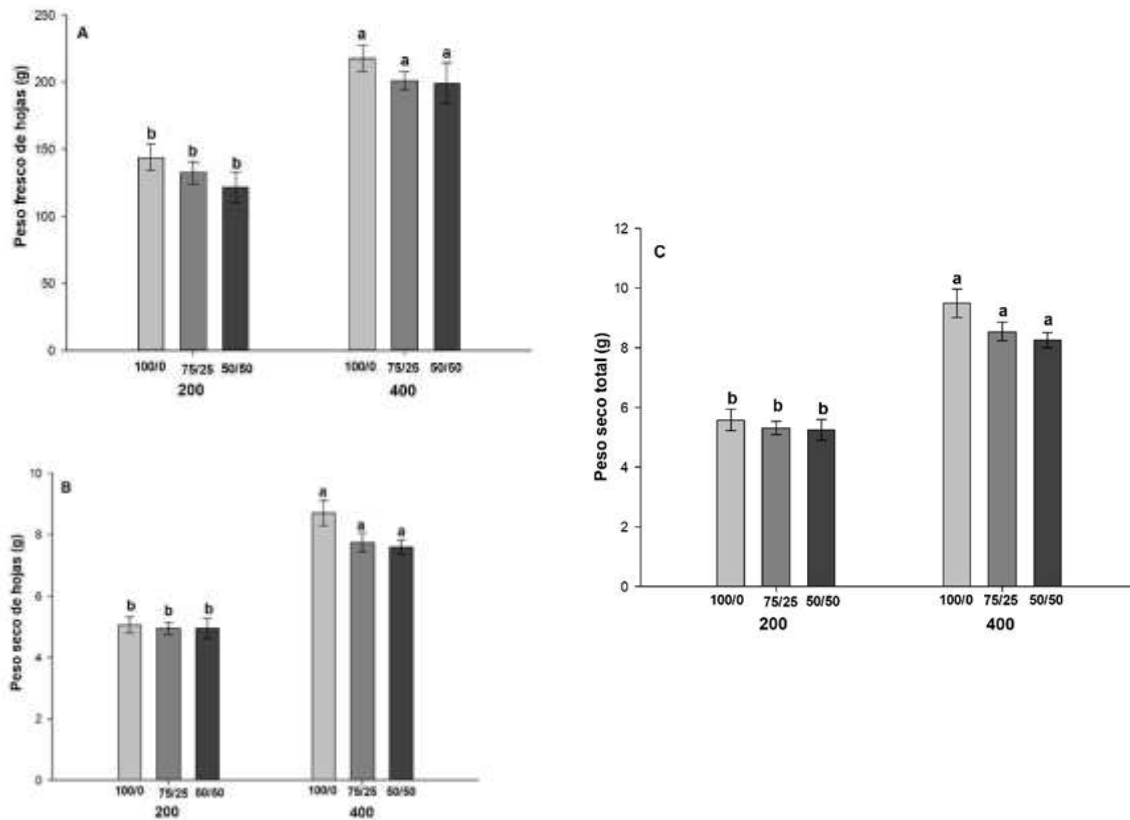


Figura 10. Efecto de la interacción entre la relación nitrato/amonio (100/0, 75/25 y 50/50) y la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (200 y 400 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) sobre el peso fresco (A) y peso seco de hojas (B) y Peso seco total por planta de lechuga (C). Medias ± error estándar con letras idénticas en cada gráfica son estadísticamente iguales (Tukey, P ≤ 0.05).

### 6.3 Concentración de fósforo, potasio, calcio y magnesio en hojas de lechuga hidropónica

La relación nitrato/amonio no afectó significativamente (P ≤ 0.05) los contenidos nutrimentales de fósforo y magnesio en hojas de lechuga, pero sí de manera significativa el contenido de potasio y calcio (Cuadro 4). Con la relación 100/0 las concentraciones de potasio y calcio fueron 6.18% y 0.79%, respectivamente, mayores comparados con los inducidos por la relación 50/50 (4.32% y 0.61%), lo que representa una disminución de 30% de potasio y 23% de calcio,

respectivamente.

Cuadro 4. Contenido de fósforo, potasio, calcio y magnesio en hojas de lechuga hidropónica por efecto de la relación nitrato/amonio, PPFD y su interacción, en un sistema de producción hidropónico e iluminación de leds blancos.

Factor	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio
	-----%-----			
Nitrato/amonio	ns	**	**	ns
100/0	0.27 ± 0.02a*	6.18 ± 0.19a	0.79 ± 0.07a	0.32 ± 0.03a
75/25	0.25 ± 0.01a	4.69 ± 0.25b	0.62 ± 0.03b	0.34 ± 0.02a
50/50	0.28 ± 0.01a	4.32 ± 0.21b	0.61 ± 0.03b	0.36 ± 0.01a
<sup>1</sup> PPFD	ns	ns	**	**
200	0.28 ± 0.01a	5.09 ± 0.25a	0.77 ± 0.05a	0.38 ± 0.01a
400	0.26 ± 0.01a	5.03 ± 0.27a	0.59 ± 0.02b	0.30 ± 0.02b
Tratamiento	ns	ns	**	**
T1 100/0*200	0.28 ± 0.03a	6.23 ± 0.29a	0.95 ± 0.09a	0.37 ± 0.03a
T2 75/25*200	0.25 ± 0.01a	4.23 ± 0.32bc	0.65 ± 0.05b	0.39 ± 0.02a
T3 50/50*200	0.32 ± 0.01a	4.83 ± 0.21bc	0.70 ± 0.03b	0.39 ± 0.01a
T4 100/0*400	0.27 ± 0.02a	6.13 ± 0.28a	0.63 ± 0.06b	0.28 ± 0.04a
T5 75/25*400	0.26 ± 0.02a	5.16 ± 0.30ab	0.60 ± 0.03b	0.29 ± 0.03a
T6 50/50*400	0.25 ± 0.01a	3.80 ± 0.23c	0.53 ± 0.03b	0.33 ± 0.02a

<sup>1</sup>PPFD = densidad de flujo de fotones fotosintéticos ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ). \*Medias  $\pm$  error estándar con letras idénticas dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns y \*\* = no significativo y significativo a  $P \leq 0.01$ .

La disminución de calcio y potasio en hojas de lechuga hidropónica se puede atribuir al incremento de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  en la solución nutritiva, debido a la cual, consecuentemente fueron disminuidas las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  para mantener en equilibrio en el total de cationes de la solución nutritiva (Steiner, 1984). Por lo tanto, la reducción de calcio y potasio en la solución nutritiva disminuye las concentraciones de estos elementos en las hojas de lechuga (Mengel y Kirkby,

2000). Este resultado concuerda con Chaillou y Lamaze (2001), quienes mencionan que la absorción de amonio despolariza la célula y reduce la absorción de potasio y calcio. También coincide con lo reportado por Parra *et al.* (2012), quienes refieren que la relación nitrato/amonio afectó en forma directa la concentración de calcio en hojas y tallos de tomate, aunque no de potasio, ya que los niveles empleados de amonio no fueron suficientemente altos para ejercer un antagonismo con  $K^+$ .

Por otro lado, PPF<sub>D</sub> afectó en forma significativa la concentración de calcio y magnesio (Cuadro 4). Con  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  se tuvo una disminución de calcio y magnesio, de 23 y 21%, respectivamente, comparado con  $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . De acuerdo con lo reportado por Song *et al.* (2020), en el cultivo de lechuga infieren que con una alta intensidad de luz se disminuye la acumulación de calcio y magnesio y se refieren a la reducción de estos minerales a la alta actividad fotosintética en la planta acumulándose en menor cantidad en los órganos vegetales.

#### **6.4 Concentración de nitrato y amonio en hojas de lechuga hidropónica**

La relación nitrato/amonio afectó el contenido de nitrato en el tejido vegetal (Cuadro 5). Con la relación 50/50 la concentración de nitrato en las hojas de lechuga fue menor en 36%, comparadas con la inducida por la relación 100/0. Este resultado concuerda con Lara-Izaguirre *et al.* (2019), donde mencionan que la nutrición amoniaca puede reducir la acumulación de nitrato en las hojas.

Con respecto al amonio, al aumentar la concentración del catión en la solución nutritiva con la relación 50/50 comparado con la relación 100/0, se tuvo un incremento de 89% en la concentración de este catión en el tejido de las hojas de lechuga (Cuadro 5).

Por otra parte, el PPF<sub>D</sub> de  $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  indujo una concentración de nitrato que superó en 22.5% al nitrato acumulado en las hojas de lechuga cultivada con  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Este resultado coincide con lo reportado por Song *et al.* (2020), quienes también obtuvieron en lechuga producida con intensidades de 250 a  $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  mayores concentraciones de nitrato foliar, las cuales fueron disminuyendo al

aumentar el PPFD a 450  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Mientras que, con respecto al catión amonio ocurrió lo contrario, pues con el PPFD de 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  se obtuvo una reducción de 40%, comparado con las hojas de lechuga que interceptaron 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de PPFD.

Cuadro 5. Contenido de nitrato y amonio en las hojas de lechuga por efecto de la relación nitrato/amonio, PPFD y su interacción en sistema de producción hidropónico e iluminación de leds blancos.

Factor	Nitrato -----mg kg <sup>-1</sup> -----	Amonio
nitrato/amonio	**	**
100/0	1249 ± 53.34a	1377 ± 222.77b
75/25	833 ± 59.82b	2416 ± 136.96a
50/50	797 ± 63.82b	2607 ± 180.44a
<sup>1</sup> PPFD	**	**
200	1057 ± 41.88a	1600 ± 166.70b
400	863 ± 81.29b	2667 ± 128.94a
Tratamiento	**	**
T1 100/0 200	1182.44b ± 99.07ab	678.76 ± 52.71c
T2 75/25 200	1013.36c ± 51.06b	2050.19 ± 56.35b
T3 50/50 200	974.60d ± 24.05b	2071.04 ± 151.21b
T4 100/0 400	1315.18a ± 30.68a	2075.67 ± 143.00b
T5 75/25 400	652.10e ± 12.33c	2782.24 ± 160.54b
T6 50/50 400	619.49f ± 68.80c	3143.63 ± 73.11a

<sup>1</sup>PPFD=densidad de flujo de fotones fotosintéticos ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Medias ± error con letras idénticas dentro de cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ); ns y \*\* = no significativo y significativo a  $P \leq 0.01$ .

## 6.5 Correlación entre variables

Los coeficientes de correlación mostrados en el Cuadro 6, indican que, al incrementarse las concentraciones de nitratos en tejido vegetal se reduce un 65% la concentración de amonio, pero se incrementan un 56% el potasio y 45% el calcio en tejido vegetal, pero con respecto a las variables fósforo, magnesio, volumen radical, peso fresco y seco de hojas, peso seco de raíz y peso seco total en lechugas hidropónicas no se tienen datos que sustenten una afirmación. Con respecto a amonio, al incrementar las concentraciones de este elemento en el tejido vegetal se reducen las concentraciones de potasio (62%) y calcio (65%) en el tejido vegetal, se incrementa el peso fresco un 41% y 49% el peso seco en hoja de lechuga hidropónica y aumenta el peso seco total de hoja de lechuga. Al incrementarse las concentraciones de potasio también se incrementan las concentraciones de calcio 55% en hojas de lechuga hidropónica.

Cuadro 6. Análisis de correlación para variables nitrato, amonio, fósforo, potasio, calcio en lechuga hidropónica Coss. Culiacán, Sinaloa. 2021.

Variabes	Nitrato	Amonio	Fósforo	Potasio	Calcio
Amonio	-0.65***				
Fósforo	0.21 <sup>ns</sup>	-0.19 <sup>ns</sup>			
Potasio	0.56***	-0.62***	0.34*		
Calcio	0.45***	-0.65***	0.47***	0.55***	
Magnesio	0.17 <sup>ns</sup>	-0.22 <sup>ns</sup>	0.70***	0.02 <sup>ns</sup>	0.48***
Volumen radical	-0.06 <sup>ns</sup>	0.25 <sup>ns</sup>	-0.26 <sup>ns</sup>	0.25 <sup>ns</sup>	-0.22 <sup>ns</sup>
Peso fresco de hoja	-0.19 <sup>ns</sup>	0.41**	-0.23 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	-0.39**
Peso seco de hoja	-0.20 <sup>ns</sup>	0.49***	-0.19 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>ns</sup>	-0.47***
Peso seco raíz	-0.21 <sup>ns</sup>	0.29 <sup>ns</sup>	-0.25 <sup>ns</sup>	0.23 <sup>ns</sup>	-0.31 <sup>ns</sup>
Peso seco total	-0.21 <sup>ns</sup>	0.47***	-0.21 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	-0.46***

<sup>ns</sup>, \*, \*\* y \*\*\*, no significativo, significativo a  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.001$ .

Con respecto a calcio al incrementarse el contenido de este catión en hoja de lechuga, aumenta un 48% en contenido de magnesio en hoja de lechuga

hidropónica, pero se disminuye 39% el peso fresco y 47% el peso seco de hoja de lechuga y 46% el peso seco total de lechuga hidropónica.

De acuerdo con el análisis de correlación de las variables magnesio, volumen radical, peso fresco y peso seco de hoja y peso seco de raíz de lechuga hidropónica se tienen los siguientes valores (Cuadro 7). La concentración de magnesio afectó de manera negativa el volumen radical, peso fresco y seco de hoja, peso seco de raíz y peso seco total de lechuga hidropónica con una significancia de ( $P \leq 0.01$ ). al incrementar el volumen radical de lechuga también aumenta el peso fresco un 86% y el peso seco de hoja de lechuga 82%, el peso seco de raíz 87% y el peso total 84% en lechuga hidropónica con una significancia de ( $P \leq 0.01$ ). Con respecto al peso fresco de hoja de lechuga al aumentar, también aumentan el peso seco de hoja, peso seco de raíz y peso seco total de hoja de lechuga hidropónica. El peso seco de hoja tiene una alta correlación con el peso seco de raíz y peso seco total de lechuga y al aumentar el peso seco de raíz también se incrementa un 86% el peso seco total de la hoja de lechuga hidropónica.

Cuadro 7. Análisis de correlación para variables magnesio, volumen radical, peso fresco hoja, peso seco hoja y peso seco raíz en lechuga hidropónica Coss. Culiacán, Sinaloa. 2021.

Variabes	Magnesio	Volumen radical	Peso fresco hoja	Peso seco hoja	Peso seco raíz
Volumen radical	-0.53**				
Peso fresco hoja	-0.52***	0.86***			
Peso seco hoja	-0.58***	0.82***	0.85***		
Peso seco raíz	-0.57***	0.87***	0.89***	0.83***	
Peso seco total	-0.60***	0.84***	0.87***	1.00***	0.855***

ns, \*, \*\* y \*\*\*, no significativo, significativo a  $P \leq 0.05$ ,  $P \leq 0.01$  y  $P \leq 0.001$ .

## VII. CONCLUSIONES

- El volumen radical y el peso seco de raíz fueron afectados negativamente al incrementar el amonio en la solución nutritiva.
- El peso fresco de hojas, el peso seco de hojas y el peso seco total de la lechuga no fueron afectados por la relación porcentual nitrato/amonio en la solución nutritiva.
- Incrementar el PPFD de 200 a 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en las cámaras de crecimiento aumentó el volumen de raíz, el peso fresco de hojas, el peso seco de hojas, el peso seco de raíz y el peso seco total de lechugas.
- La utilización de amonio en la solución nutritiva afectó negativamente la concentración de potasio y calcio en las hojas de lechuga, mientras que los contenidos de calcio y magnesio fueron afectados de manera negativa por el incremento de PPFD de 200 a 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en las cámaras de crecimiento.
- La utilización de amonio en la solución nutritiva redujo significativamente la concentración de nitratos y aumentó la concentración de amonio en las hojas de lechuga, especialmente al combinarse con el PPFD de 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .



## VIII. LITERATURA CITADA

Albright, L. D., Both, A. J. and Chiu, A. J. 2000. Controlling greenhouse light to a consistent daily integral. Transactions of the ASAE 43(2): 421-431.

Alvarado, D., Chávez, F. y Wilhelmina, A. K. 2001. Lechugas hidropónicas. Seminario de Agronegocios. Universidad del Pacífico. 96p. <https://docplayer.es/6623604-Lechugas-hidroponicas.html>. (Fecha de consulta: 03 de agosto de 2022).

Alcántar, G. G. y Sandoval, V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal: guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 156p.

AOAC (Association of Official Analytical Chemists). 1980. Official methods of analysis. 13th edition. Washington, D.C. 1038p.

Theodoracopoulos, M., Lardizabal, R. y Arias, S. 2009. Manual de Producción de lechuga. MCA-Honduras/EDA. FHIA, La Lima, Cortes, Honduras. 34p. [http://bvirtual.infoagro.hn/xmlui/bitstream/handle/123456789/72/EDA\\_Manual\\_Produccion\\_Lechuga\\_02\\_09.pdf?sequence=1](http://bvirtual.infoagro.hn/xmlui/bitstream/handle/123456789/72/EDA_Manual_Produccion_Lechuga_02_09.pdf?sequence=1). (Fecha de consulta: 21 de marzo de 2021).

ASTRE (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2015. Resumen de salud pública. Nitrato y nitrito. Departamento de Salud y Servicios Sociales de los Estados Unidos. Atlanta, Georgia, USA. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs204.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs204.pdf) (Fecha de consulta: 15 Enero de 2018).

Avendaño-Abarca, V. H., González-Sandoval, D. C., Munguía-López, J. P., Hernández-Cuevas, R., Luna-Maldonado, A. I., Vidales-Contreras, J. A.,

- Niño-Medina, G. y Rodríguez-Fuentes, H. 2020. Crecimiento y absorción total nutrimental de lechuga romana tipo baby cultivada con iluminación led bajo sistema fábrica de plantas. ITEA 116(4): 280-293. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.011>.
- Azcon-Bieto, J. y Talon, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Ed. Mc Graw Hill/Interamericana. Madrid, España. 522p.
- Baca, C. G. 1983. Efecto de la solución nutritiva, la frecuencia de los riegos, el sustrato y la densidad de siembra en cultivos hidropónicos al aire libre de pepino, melón y jitomate. Tesis de Doctor en Ciencias. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 172p.
- Balcaza, L.1998. Análisis de suelos en cultivos intensivos. Boletín Hortícola N° 20. <http://boletinhorticolalaplata.blogspot.com/1998/08/?m=0>. (Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2021).
- Barroso, J. M. 2011. Commission regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. Official Journal of the European Union 320: 15-17. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:320:0015:0017:EN:PDF>. (Fecha de consulta: 22 de febrero de 2021).
- Baslam, M., Morales, F., Garmendia, I. and Goicoechea, N. 2013. Nutritional quality of outer and inner leaves of green and red pigmented lettuces (*Lactuca sativa* L.) consumed as salads. Scientia Horticulturae 151: 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.12.023>.
- Beltrano, J. y Gimenez, D. O. 2015. Cultivo en hidroponía. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). 182p.

- Blom-Zandstra, G. and Lampe, J. 1985. The role of nitrate in the osmoregulation of lettuce (*Latuca sativa* L.) grown at different light intensities. *Journal of Experimental Botany* 36(168): 1043-1052. <http://www.jstor.org/stable/23688514>. (Fecha de consulta: 22 de septiembre de 2021).
- Böhm, W. 1979. Root parameters and their measurement. *In: Methods of studying root system. Ecological Studies*, vol 33. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8_12).
- Briceño, V. G. 2021. Horticultura. <https://www.euston96.com/horticultura/>. (Fecha de consulta: 27 de agosto de 2022).
- Bures, S., Urrestarazu, G. M. y Kotiranta, S. 2018. Iluminación artificial en agricultura. *Biblioteca Horticultura*. 46p. [https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/iluminaci\\_\\_n\\_artificial\\_en\\_agricult?e=8490508/57420774](https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/iluminaci__n_artificial_en_agricult?e=8490508/57420774). (Fecha de consulta: 01 de enero de 2021).
- Capera, Q. J. S., Sierra, F. B. L. y Ávila, B. T. D. 2017. Análisis temático de principios de automatización en el desarrollo de cultivos hidropónicos. *Boletín Semillas Ambientales* 11(2): 138-148. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/view/12862>. (Fecha de consulta: 03 de noviembre de 2021).
- Carrasco, S. G. A. y Sandoval, B. C. 2016. Manual práctico del cultivo de la lechuga. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 148p.
- Casierra-Posada, F. y Peña-Olmos, J. E. 2015. Modificaciones fotomorfogénicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas. *Revista de la*

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 39(Supl.): 84-92. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.276>.

Castañares, J. L. 2020. ABC de la hidroponía. EEA AMBA. 15p. [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_amba\\_-\\_abc\\_de\\_la\\_hidroponia.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_amba_-_abc_de_la_hidroponia.pdf). (Fecha de consulta: 22 de febrero de 2021).

Cavaiuolo, M. and Ferrante, A. 2014. Nitrates and glucosinolates as strong determinants of the nutritional quality in rocket leafy salads. *Nutrients* 6(4): 1519-1538. <https://doi.org/10.3390/nu6041519>.

Chaillou, S. and Lamaze, T. 2001. Ammoniacal nutrition of plants. *In: Nitrogen assimilation by plants*. Morot-Gaudry, J. F. (ed.). Science Publishers, Inc. Enfield, NH, USA. 18p.

Chen, X.-L., Guo, W.-Z., Xue, X.-Z., Wang, L.-C. and Qiao, X.-J. 2014. Growth and quality responses of 'Green Oak Leaf' lettuce as affected by monochromatic or mixed radiation provided by fluorescent lamp (FL) and light-emitting diode (LED). *Scientia Horticulturae* 172: 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.009>.

Chiesa, A. 2010. Factores precosecha y postcosecha que inciden en la calidad de la lechuga. *Horticultura Argentina* 29(68): 28-32. <http://www.horticulturaar.com.ar/es/articulos/factores-precosecha-y-postcosecha-que-inciden-en-la-calidad-de-la-lechuga.html>. (Fecha de consulta: 13 de agosto de 2021).

Chowdhury, A. and Das, A. 2015. Nitrate accumulation and vegetable quality. *International Journal of Science and Research* 4(12): 1668-1672. <https://www.ijsr.net/archive/v4i12/NOV152366.pdf>. (Fecha de consulta: 13 de agosto de 2021).

- Claussen, W. and Lenz F. 1999. Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis, growth, and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry and strawberry. *Plant and Soil* 208: 95-102. <https://doi.org/10.1023/A:1004543128899>.
- Cramer, M. D. and Lewis, O. A. M. 1993. The influence of nitrate and ammonium nutrition on the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays*) plants. *Annals of Botany* 72(4): 359-365. <https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1119>..
- Faust, J. E. and Logan, J. 2018. Daily light integral: a research review and high-resolution maps of the United States. *HortScience* 53(9): 1250-1257. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13144-18>.
- Fukuda, N., Fujita, M., Ohta, Y., Sase, S., Nishimura, S. and Ezura, H. 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *Scientia Horticulturae* 115: 176-182. <https://doi.org/10.1016/J.Scienta.2007.08.006>.
- Ganmore-Neumann, R. and Kafkafi, U. 1980. Root temperature and percentage  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  effect on tomato plant development I. Morphology and growth. *Agronomy Journal* 72(5): 758-761. <https://doi.org/10.2134/agronj1980.00021962007200050016x>.
- Ganmore-Neumann, R. and Kafkafi U. 1983. The effect of root temperature and percentage  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  ratio on strawberry plants. I. Growth, flowering, and root development. *Agronomy Journal* 75(6): 941-947. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500060020x>.

- Gerendás, J., Zhu, Z., Bendixen, R., Ratcliffe, R. G. and Sattelmacher B. 1997. Physiological and biochemical processes related to ammonium toxicity in higher plants. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160(2): 239-251. <https://doi.org/10.1002/jpln.19971600218>
- Haynes, R. J., and K. M. Goh. 1978. Ammonium and nitrate nutrition of plants. *Biological Reviews* 53: 465-510.
- Hunter, D. C. and Burritt, D. J. 2004. Light quality influences adventitious shoot production from cotyledon explants of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant* 40: 215-220. <https://doi.org/10.1079/IVP 2003492>.
- Imas, P., Bar-Yosef, B., Kafkafi, U. and Ganmore-Neumann R. 1997. Release of carboxylic anions and protons by tomato roots in response to ammonium nitrate ratio and pH in nutrient solution. *Plant and Soil* 191: 27-34. <https://doi.org/10.1023/A:1004214814504>.
- Jiao, Y., Lau, O. S. and Deng, X. W. 2007. Light-regulated transcriptional networks in higher plants. *Nature Reviews Genetics* 8: 217-230. <https://doi.org/10.1038/nrg2049>.
- Jones Jr., J. B. 2014. Complete guide for growing plants hydroponically. 1<sup>st</sup> edition. CRC Press. 223p. <https://doi.org/10.1201/b16482>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.010>.

- Kirkby, A. E. and Mengel K. 1967. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea or ammonium nutrition. *Plant Physiology* 42: 6-14.
- Lara-Izaguirre, A., Rojas-Velázquez, A. N., Romero-Méndez, M. J., Ramírez-Tobías, H. M., Cruz-Crespo, E., Alcalá-Jáuregui, J. A., y Loredó-Ostí, C. 2019. Crecimiento y acumulación de  $\text{NO}_3^-$  en lechuga hidropónica con relaciones nitrato/amonio en dos estaciones de cultivo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(1): 21-29. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.1.21>.
- Loconsole, D., Cocetta, G., Santoro, P. and Ferrante, A. 2019. Optimization of LED lighting and quality evaluation of Romaine lettuce grown in an innovative indoor cultivation system. *Sustainability* 11(3): 841. <https://doi.org/10.3390/su11030841>.
- Macwan, J., Pandya, D., Pandya, D. H. and Mankad, D. A. 2020. Review on soilless method of cultivation: hydroponics. *International Journal of Recent Scientific Research* 11(1): 37122-37127. <http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.2020.1101.5058>.
- Magalhaes, J. R. and Huber, D. M. 1989. Ammonium assimilation in different plant species as affected by nitrogen form and pH control in solution culture. *Fertilizer Research* 21: 1-6. <https://doi.org/10.1007/BF01054728>.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press. San Diego, California. USA. 889p.
- Martínez-Carrillo, G., Lara-Herrera, A., Padilla-Bernal, L. E., Luna-Flores, M., Avelar-Mejía, J. J., y Llamas-Llamas, J. J. 2015. Evaluación técnica y financiera del cultivo de lechuga en invernadero, como alternativa para invierno. *Terra Latinoamericana* 33(3): 251-260.

- Matt, P., Geiger, M., Walch-Liu, P., Engels, C., Krapp, A. and Stitt, M. 2001. Elevated carbon dioxide increases nitrate uptake and nitrate reductase activity when tobacco is growing on nitrate, but increases ammonium uptake and inhibits nitrate reductase activity when tobacco is growing on ammonium nitrate. *Plant, Cell & Environment* 24(11): 1119-1137. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00771.x>.
- Maynard, D. N. and Barker, A. V. 1969. Studies on the tolerance of plants to ammonium nutrition. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 94: 235-239.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 2000. *Principios de nutrición vegetal*. Trad. al español por Melgar R. J. y Ruíz, M. 4ª ed. Internacional Potash Institute. Basel, Switzerland. pp:113-145.
- Moreira, O., Cabrera, L., Carbajal, A. y Cuadrado, C. 2013. Canela Molida. Tabla de composición de alimentos. Condimentos y Aperitivos. Ediciones Pirámide. pp:585-586. <https://www.fen.org.es/storage/app/media/flipbook/mercado-alimentos-fen/013-Condimentos.pdf>. (Fecha de consulta: 18 de abril de 2021).
- Moreno-Pérez, E. D. C., Sánchez-Del Castillo, F., Gutiérrez-Tlaque, J., González-Molina, L. and Pineda-Pineda, J. 2015. Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 21(1): 43-55. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.12.047>.
- Motsara, M. R. and Roy, R. N. 2008. *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 19. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 220p.



- Muñoz-Ramos, J. J. 2003. El cultivo de tomate en invernadero. *En*: Muñoz-Ramos, J. J. y Castellanos, J. Z. (eds). Manual de producción hortícola en invernadero. INCAPA, México. Pp:226–262.
- Nguy-Robertson, A., Suyker, A. and Xiao, X. 2015. Modeling gross primary production of maize and soybean croplands using light quality, temperature, water stress, and phenology. *Agricultural and Forest Meteorology* 213: 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.008>.
- Näsholm, T., Kielland, K. and Ganeteg, U. 2009. Uptake of organic nitrogen by plant. *New Phytologist* 182(1): 31-48. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02751.x>.
- Olmos, L. M. 2021. Más de 6000 años de historia y evolución en tu ensalada. *Tecnología Hortícola*. <https://www.tecnologiahorticola.com/lechuga-evolucion-ensalada/>. (Fecha de consulta: 15 de mayo de 2021).
- Parra-Terraza, S., Lara-Murrieta, P., Villarreal-Romero, M. y Hernández-Verdugo, S. 2012. Crecimiento de plantas y rendimiento de tomate en diversas relaciones nitrato/amonio y concentraciones de bicarbonato. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35(2): 143-153. <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.2.143>.
- Ramos, G. y Ramírez, L. E. 2016. Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF). *Informador Técnico* 80(2): 111-120. <https://doi.org/10.23850/22565035.480>.
- Raviv, M. and Lieth, J. H. 2008. 1 - Significance of soilless culture in agriculture. *In*: Soilless culture. Theory and practice. Raviv M. and Lieth J. H. (eds.). Elsevier Science. pp:1-11. <https://doi.org/10.1016/B978-044452975-6.50003-4>.

- Reisenauer, H. M. 1978. Absorption and utilization of ammonium nitrogen by plants. *In*: Nitrogen in the environment. Soil-plant-nitrogen relationships. Nielsen, D. R. and MacDonald, J. G. (eds.). Academic Press, Inc. pp:157-170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-518402-1.50013-5>.
- Resh, H. M. 2022. Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. 8<sup>th</sup> ed. CRC Press. pp:60-90.
- Rodríguez, F. H. y Rodríguez, A. J. 2015. Métodos de análisis de suelos y plantas: criterios de interpretación. Editorial Trillas. 288p.
- Ruiz, C. J. A., Medina, G. G., González, A. I. J., Flores, L. H. E., Ramírez, O. G., Ortiz, T. C., Byerly, M. K. F. y Martínez, P. R. A. 2013. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Segunda Edición. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 564p. [http://inifapcirpac.gob.mx/publicaciones\\_nuevas/requerimientos%20agroec%20de%20cultivos%202da%20edici%C3%B3n.pdf](http://inifapcirpac.gob.mx/publicaciones_nuevas/requerimientos%20agroec%20de%20cultivos%202da%20edici%C3%B3n.pdf). (Fecha de consulta: 17 de noviembre de 2021).
- Saavedra, R. G. (ed.). 2017. Manual de producción de lechuga. Boletín INIA no. 374. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile. 153p. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6703> (Fecha de consulta: 18 de octubre de 2021).
- Salsac, L., Chaillou, S., Morot-Gaudry, J., Lesaint, C. and Jolivet E. 1987. Nitrate and ammonium nutrition in plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 25: 805-812.

- Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Sirtautas, R., Novičkovas, A. and Duchovskis, P. 2011. Supplementary red-LED lighting affects phytochemicals and nitrate of baby leaf lettuce. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 9(3/4 part 1): 271-274. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113397439>. (Fecha de consulta: 22 de enero de 2021).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2020 Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.(Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2020).
- Sommantico, S. 2019. Hidroponía: guía práctica para crear tu propio sistema de raíz flotante en tu hogar. Infocampo. <https://www.infocampo.com.ar/hidroponia-guia-practica-para-crear-tu-propio-sistema-de-raiz-flotante-en-tu-hogar/>. (Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2020).
- Song, J., Huang, H., Hao, Y., Song, S., Zhang, Y., Su, W. and Liu, H. 2020. Nutritional quality, mineral and antioxidant content in lettuce affected by interaction of light intensity and nutrient solution concentration. *Scientific Reports* 10: 2796. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59574-3>.
- StatSoft, inc. 2004. STATISTICA (data analysis software system), version 7. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. Sixth International Congress on Soilless Culture. ISOSC Proceeding. The Netherlands. Pp:633-649.
- Weiguo, F., Pingping, L., Yanyou, W. and Jianjian, T. 2012. Effects of different light intensities on anti-oxidative enzyme activity, quality and biomass in lettuce. *Horticultural Science* 39(3): 129-134. <https://doi.org/10.17221/192/2011-hortsci>.

Wright, M. G. and Davison, K. L. 1964. Nitrate accumulation in crops and nitrate poisoning of animals. *Advances in Agronomy* 16: 197-247.  
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60025-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60025-5).