



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRIA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



**PRODUCCIÓN DE LECHUGA CON LUZ LED SUPLEMENTARIA EN DOS
SISTEMAS HIDROPÓNICOS CERRADOS**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

Presenta:

GABRIELA JOSELYN ÁNGELES LÓPEZ

Bajo la supervisión de: Dr. Rogelio Castro Brindis



APROBADA



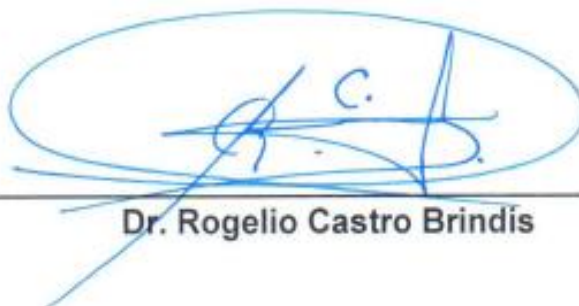
Chapingo, Estado de México, junio de 2023

**PRODUCCIÓN DE LECHUGA CON LUZ LED SUPLEMENTARIA EN DOS
SISTEMAS HIDROPÓNICOS CERRADOS**

**Tesis realizada por GABRIELA JOSELYN ANGELES LOPEZ bajo la
supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y
aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:**

MAESTRA EN CIENCIAS

Director: _____



Dr. Rogelio Castro Brindís

Codirector: _____



Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

Asesor: _____



Dr. Felipe Sánchez Del Castillo

CONTENIDO

1	Resumen	xviii
2	Abstract.....	xix
3	Introducción	20
4	Revisión de literatura.....	23
4.1	Los cultivos sin suelo y la hidroponía	23
4.2	Cultivo en solución	23
4.3	Sistemas de balsas flotantes o raíz profunda	24
4.4	Sistemas de la técnica de película nutritiva	25
4.5	Luz artificial complementaria en plantas	26
4.6	Propiedades nutracéuticas de las lechugas.....	27
5	Materiales y Métodos	28
5.1	Ubicación y condiciones del invernadero	28
5.2	Condiciones de crecimiento	28
5.2.1	Etapas de plántula	28
5.2.2	Etapas de producción	29
5.3	Tratamientos.....	32
5.3.1	Etapas de plántula	32
5.3.2	Etapas de producción	32
5.4	Variables morfológicas.....	32

5.5	Determinación de clorofilas, carotenoides	33
5.6	Cuantificación de nutrimentos.....	33
5.7	Análisis estadístico.....	34
6	Resultados y discusión	35
6.1	Etapa de plántula ciclo 1	35
6.1.1	Efecto de luz.....	35
6.1.2	Efecto de conductividad eléctrica.....	36
6.1.3	Efecto de combinación luz y conductividad eléctrica	38
6.2	Etapa de plántula ciclo 2	40
6.2.1	Efecto de luz.....	40
6.2.2	Efecto de conductividad eléctrica.....	42
6.2.3	Efecto de combinación luz y conductividad eléctrica	44
6.3	Etapa de producción ciclo 1.....	46
6.3.1	Morfología de lechuga en etapa de producción ciclo 1	46
6.3.2	Determinación de clorofilas y carotenoides en lechuga para etapa de producción	52
6.3.3	Concentración nutrimental en lechuga para etapa de producción.....	54

6.4	Etapa de producción ciclo 2.....	56
6.4.1	Morfología de lechuga en etapa de producción ciclo 2	56
6.4.2	Determinación de clorofilas y carotenoides para etapa de producción ciclo 2.....	63
6.4.3	Concentración nutrimental en lechuga para etapa de producción ciclo 2	67
7	Conclusiones.....	69
8	Literatura citada	71

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Comparación de medias en variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 1 de producción, bajo diferentes condiciones de luz.....	35
Cuadro 2. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de luz.	36
Cuadro 3. Comparación de medias para peso de biomasa seca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de luz.	36
Cuadro 4. Comparación de medias para variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 1 de producción, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.	37
Cuadro 5. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.	38
Cuadro 6. Comparación de medias para peso de biomasa fresca y seco en plántula de lechuga tipo italiana durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica	38
Cuadro 7. Comparación de medias para variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 2 de producción, bajo diferentes condiciones de luz.....	41
Cuadro 8. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de luz.	41

Cuadro 9. Comparación de medias para peso de biomasa seca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de luz.	42
Cuadro 10. Comparación de medias para variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 2 de producción, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.	42
Cuadro 11. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.	43
Cuadro 12. Comparación de medias para peso de biomasa fresca y seco en plántula de lechuga tipo italiana durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica	44
Cuadro 13. Comparación de medias para variables morfológicas al final del ciclo 1 de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica	47
Cuadro 14. Comparación de medias para variables morfológicas al final del ciclo 1 de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.	48
Cuadro 15. Comparación de medias para peso de biomasa fresca al final del primer ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.....	48
Cuadro 16. Comparación de medias para peso de biomasa seca al final del primer ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, durante otoño-invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.....	49
Cuadro 18. Comparación de medias para concentración de clorofilas y carotenos en hojas al final del primer ciclo de cultivo de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente conductividad eléctrica en la solución nutritiva.	52

Cuadro 19. Comparación de medias para concentración de clorofilas y carotenos en hojas al final del primer ciclo de cultivo de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente sistema hidropónico.	53
Cuadro 20. Comparación de medias para concentración de macroelementos en planta completa al final del primer ciclo de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente conductividad eléctrica en la solución nutritiva.	54
Cuadro 21. Comparación de medias para concentración de macroelementos en planta completa al final de dos ciclos de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente sistema hidropónico.....	55
Cuadro 22. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en raíz, al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, con diferentes tratamientos de luz.	57
Cuadro 23. Comparación de medias para variables morfológicas al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.	58
Cuadro 24. Comparación de medias para peso de biomasa fresca al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.	58
Cuadro 25. Comparación de medias para peso de biomasa seca al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.	58
Cuadro 26. Comparación de medias para variables morfológicas al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.....	59
Cuadro 27. Comparación de medias para peso de biomasa seca al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, durante otoño-invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.	60

Cuadro 28. Comparación de medias para concentración de clorofilas y carotenos en hojas al final del segundo ciclo de cultivo de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferentes tratamientos de luz.....	63
Cuadro 29. Comparación de medias para concentración de macroelementos en planta completa al final del segundo ciclo de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente conductividad eléctrica en la solución nutritiva.	67
Cuadro 30. Comparación de medias para concentración de macroelementos en planta completa al final de dos ciclos de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente sistema hidropónico.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Experimento establecido con sistemas hidropónicos: Técnica de la película nutritiva (a) y balsas flotantes (b) con planta de lechuga en etapa de producción.	31
Figura 2. Efecto de la combinación luz y conductividad eléctrica, en número de hojas (A), longitud de hoja grande (B), área foliar (C), peso de biomasa fresca de hoja (D), peso de biomasa seca de hoja (E) en plántula de lechuga italiana, durante el primer ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).	39
Figura 3. Efecto de la combinación luz y conductividad eléctrica, en área foliar (A), peso de biomasa fresca de tallo (B) y peso de biomasa seca de tallo (C) en plántula de lechuga italiana, en el segundo ciclo de cultivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).	45
Figura 4. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, en número de hojas (A), peso fresco de hojas (B), peso seco de hojas (C), peso fresco de raíz (D) y peso seco de raíz (E) de lechuga italiana en etapa de producción, en el primer ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).	50
Figura 5. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, en longitud de raíz de lechuga italiana en etapa de producción, durante el primer ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).	51
Figura 6. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, para concentración de magnesio en lechuga italiana para etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras	

distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$)	56
Figura 7. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, peso fresco de tallo (A), peso seco de tallo (B) y peso seco de hoja (C) de lechuga italiana en etapa de producción, en el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).....	61
Figura 8. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, en número de hojas (A), longitud de raíz (B), peso fresco de raíz (C), peso seco de raíz (D) y peso fresco de rallo (E) de lechuga italiana en etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).	62
Figura 9. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, en concentración de clorofila a (A), concentración de clorofila b (B) y concentración de clorofila total (C) de lechuga italiana en etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).....	65
Figura 10. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, en concentración de clorofila a (A), concentración de clorofila b (B), concentración de clorofila total (C) y concentración de carotenos (D) de lechuga italiana en etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).	66
Figura 11. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, para concentración de fósforo en lechuga italiana para etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras	

distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).	69
---	----

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Variables morfológicas, al final de la etapa de plántula, de lechuga tipo italiana, en el primer ciclo de producción, durante otoño invierno.....	75
Apéndice 2. Variables morfológicas, al final de la etapa de plántula, de lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.....	76
Apéndice 3. Numero de hojas, longitud de raíz, peso de biomasa fresca de hojas, raíz y tallo, al final de la etapa de producción, de lechuga tipo italiana, en el primero ciclo de producción, durante otoño invierno.....	77
Apéndice 4. Área foliar, peso de biomasa seca de hoja, raíz y tallo, al final de la etapa de producción, de lechuga tipo italiana, en el primero ciclo de producción, durante otoño invierno.....	78
Apéndice 5. Numero de hojas, longitud de raíz y área foliar, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.....	79
Apéndice 6. Peso de biomasa fresca y seca de hoja, raíz y tallo, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.....	80
Apéndice 7. Clorofila <i>a</i> , <i>b</i> , total y carotenos, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el primer ciclo de producción, durante otoño invierno	81
Apéndice 8. Clorofila <i>a</i> , <i>b</i> , total y carotenos, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.....	82
Apéndice 9. Concentración de nutrimentos en planta, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el primer ciclo de producción, durante otoño invierno.....	83

Apéndice 10. Concentración de nutrimentos en planta, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno	84
Apéndice 11. Análisis de solución nutritiva, al final de los dos ciclos en el cultivo de lechuga tipo italiana, otoño-invierno.....	85
Apéndice 12: Mediciones de pH y conductividad eléctrica en dos ciclos de cultivo (otoño-invierno) durante la etapa de producción de lechuga italiana...	86
Apéndice 13: Temperatura dentro del invernadero en dos etapas de cultivo, durante dos ciclos de producción (otoño-invierno)	87
Apéndice 14. Humedad relativa dentro del invernadero en dos etapas de cultivo, durante dos ciclos de producción (otoño-invierno)	88
Apéndice 15. Radiación fotosintéticamente activa dentro del invernadero en dos etapas de cultivo, durante dos ciclos de producción (otoño-invierno). Datos obtenidos de la plataforma de la NASA y modificados al 35% según el % de sombra del invernadero.....	89
Apéndice 16. Fertilizantes utilizados en la solución nutritiva, Steiner	90

DEDICATORIAS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento primeramente a Dios por permitirme el tiempo, la sabiduría y por situar en mi camino a las personas que me ayudaron a poder obtener este logro.

A Renzo, mi esposo porque con su amor, motivación y apoyo incondicional, ha sido posible culminar este grado.

A mi hijo Rodrigo, quien es el motor que día a día me impulsa para ser una mejor persona, seguir formándome como profesional, para dejarle un mundo y futuro mejor.

A mi madre, hermanos y suegros por siempre animarme para seguir adelante y brindarme su apoyo incondicional.

Dedico este trabajo también, a todos los agricultores y personas interesadas en la presente investigación, espero ayude a mejorar sus técnicas de producción que hacen hoy en día, así como hago la invitación para que sigamos investigando más sobre el tema en cuestión.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero expresar mi profundo y especial agradecimiento al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar por compartirme su sabiduría en este tema de investigación. Por la tutoría en mi formación como investigadora y el apoyo incondicional que me brindó en el proceso académico y de investigación durante la maestría.

Al Dr. Castro Brindis y Dr. Felipe Sánchez Del Castillo por ser parte de mi comité asesor, compartirme sus conocimientos y acompañarme durante mi trayectoria en el posgrado.

A la Lic. Itzel Nayelli Silvestre González laboratorista de Fisiología de Frutales que gracia a su destreza en el área me ayudó y orientó, en la fase de laboratorio.

A la Sra. Ma. Inés Acosta Martínez, auxiliar de campo, por su colaboración en la fase de investigación de campo.

A el Sr. Luis Ángel Romero Rivera, trabajador de campo por su accesibilidad y orientación en los materiales de campo.

A mis amigas (os), gracias a su espíritu de ayuda y trabajo en equipo.

Al CONACyT, por sus acciones a favor de la Ciencia y Tecnología de México, principalmente por su colaboración a mi formación académica y de investigación.

Por último, uno de los pilares en mi vida, a mi alma mater, Universidad Autónoma Chapingo, que me ha dado todo.

DATOS BIOGRAFICOS



Datos personales

Nombre	Gabriela Joselyn Ángeles López
Fecha de nacimiento	10 de agosto de 1997
CURP	AELG970810MVZNPB03
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia
Cédula profesional	13009273

Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria Agrícola
Maestría	Maestría en Ciencias en Horticultura

Producción de lechuga con luz led complementaria en dos sistemas hidropónicos cerrados.

Lettuce production with complementary led light in two closed hydroponic systems

1 Resumen

La luz, conductividad eléctrica y sistema hidropónico, tienen un impacto directamente en los rendimientos y calidad del cultivo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la luz LED sobre el desarrollo de las plantas de lechuga en los sistemas de producción de balsas flotantes y NFT (técnica de la película nutritiva), para obtener mayor rendimiento, calidad y precocidad en el cultivo de lechuga, bajo condiciones de invernadero, con reúso de la solución nutritiva para un segundo ciclo. Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas para la etapa de plántula y subdivididas en etapa de producción. Con 4 tratamientos y 10 repeticiones para la primer etapa y 8 tratamientos con 4 repeticiones para la segunda. Se midieron variables morfológicas en cada etapa de la planta, concentración de clorofilas, carotenos (metodología de Lichtenthaler) y concentración nutrimental en planta completa (método de Kjeldahl y de digestión húmeda) al final de la etapa de producción. Los resultados indicaron que en etapa de plántula la luz LED complementaria con 1.2 dS m^{-1} , promovió un 17 % el número de hojas, un 32 % la longitud de hoja y un 70 % el área foliar, sin embargo la conductividad de 1.8 dS m^{-1} aumento biomasa de tallo. En etapa de producción el número de hojas, biomasa de hoja y raíz aumentaron de un 18 a 40% en condiciones de luz LED, en balsas flotantes con la conductividad más baja. El uso de luz LED blanca presentó mayores beneficios en el segundo ciclo (invierno) para ambas etapas de cultivo; la concentración de 1.2 dS m^{-1} aumentó el vigor de las plantas y en el sistema hidropónico de balsas flotantes las plantas tuvieron un mejor desarrollo.

Palabras clave: sistema hidropónico, conductividad eléctrica, clorofilas, carotenos, luz LED.

Tesis de Maestría en Ciencias, Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Gabriela Joselyn Ángeles López

Director de tesis: Dr. Rogelio Castro Brindis

2 Abstract

Light, electrical conductivity and a hydroponic system have a direct impact on the yields and quality of the crop. The objective of this research was to evaluate the effect of LED light on the development of lettuce plants in the production systems of floating rafts and NFT (nutrient film technique), to obtain higher yield, quality and earliness in the crop of lettuce, under greenhouse conditions, with reuse of the nutrient solution for a second cycle. A randomized complete block experimental design was used, arranged in plots divided for the seedling stage and subdivided for the production stage. With 4 treatments and 10 repetitions for the first stage and 8 treatments with 4 repetitions for the second, morphological variables at each stage of the plant, concentration of chlorophylls, carotenes (Lichtenthaler methodology) and nutritional concentration in the whole plant (Kjeldahl and wet digestion method) at the end of the production stage were measured. The results indicated that at the seedling stage the complementary LED light with 1.2 dS m⁻¹ promoted the number of leaves by 17 %, the leaf length by 32 % and the leaf area by 70 %, however, the conductivity of 1.8 dS m⁻¹ increased in stem biomass. In production stage, the number of leaves, leaf and root biomass mainly increased from 18 to 40% under LED light conditions, in floating rafts with the lowest conductivity. The use of white LED light presented greater benefits in the second cycle (winter) for both stages of cultivation; the concentration of 1.2 dS m⁻¹ increased the vigor of the plants and in the hydroponic system of floating rafts the plants had better development.

Keywords: hydroponic system, electrical conductivity, chlorophylls, carotenes, LED light.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Gabriela Joselyn Ángeles López

Advisor: Rogelio Castro Brindis

3 Introducción

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es un cultivo económicamente importante en todo el mundo y una de las especies más populares cultivadas en granjas verticales. (Carotti et al., 2021). El crecimiento rápido y un ciclo de crecimiento corto han hecho de la lechuga un cultivo modelo para estudiar la interacción entre las plantas y la luz (Carotti et al., 2021).

Las hojas de lechuga también son una buena fuente de compuestos fenólicos, principalmente representados por derivados del ácido hidroxicinámico, con ácidos achicórico y caftárico como los principales representantes de esta subclase, y flavonoides, especialmente flavonoles (Carotti et al., 2021). Se han demostrado varios beneficios para la salud de los ácidos achicórico y caftárico (Carotti et al., 2021).

Mientras que la presencia de flavonoles en los tejidos verdes se ha relacionado con la alta actividad antioxidante en la planta, derivada de su estructura química (Carotti et al., 2021). En particular, la alta capacidad de eliminación de ROS de los glucósidos de quercetina y kaempferol se ha confirmado en algunas especies, como la lechuga y *Phillyrea latifolia* (Carotti et al., 2021).

Las estrategias para mejorar el contenido nutracéutico de los cultivos de interior están dirigidas a obtener cosechas altamente nutritivas durante todo el año, se ha demostrado que la concentración de compuestos fenólicos cambia según la estacionalidad (Carotti et al., 2021). En lechuga, la luz roja y azul se han identificado como las regiones espectrales más eficientes para mejorar el crecimiento y la concentración de compuestos nutracéuticos (Carotti et al., 2021).

La lechuga es una de las especies más importantes del grupo de las hortalizas de hoja, es cultivada al aire libre en zonas templadas, pero actualmente la superficie bajo invernadero ha ido en constante crecimiento por su alta demanda como ensalada en fresco, a nivel nacional e internacional (Santos-Filho et al., 2009) (SIAP, 2021).

En México la producción de lechuga pasó de 318 mil a 539 mil toneladas en el periodo de 2009 a 2020, lo cual se ha reflejado en el consumo per cápita que en la actualidad es de 4.2 kg anuales (SIAP, 2020).

Por otro lado, en nuestro país se importan cerca de 22 mil t de este producto, en tanto que las exportaciones han llegado a las 261 mil t, con un balance comercial positivo, lo que constituye una opción para la generación de divisas (SIAP, 2020). Durante 2020, la superficie cultivada fue de 22,270 ha, con una producción de 541,804 t, y rendimiento promedio de 23.7 t ha⁻¹. Los principales estados productores fueron Guanajuato, Zacatecas, Puebla, Aguascalientes, Baja California y Querétaro con el 82.2 % de la producción nacional (SIAP, 2020).

La superficie cultivada con lechuga corresponde en mayor medida a condiciones de campo, sin embargo, en los últimos cuatro años se reporta su cultivo bajo agricultura protegida con una superficie de 23.75 ha en promedio y rendimientos que superan entre el 50 al 400 % la producción convencional (SIAP, 2021).

Por lo anterior, una opción viable para mejorar la productividad de este cultivo es mediante la técnica de hidroponía, bajo invernadero. Existen técnicas de cultivo forzado utilizadas en hortalizas, los sistemas de cultivo sin suelo son una alternativa productiva para obtener hortalizas con alta calidad sanitaria, con mayores rendimientos y precocidad, en relación con las cultivadas en suelo (Mohammed & Sookoo, 2016). En muchos países para superar el gran reto de aumentar la producción de alimentos manteniendo la estabilidad del ecosistema y rehabilitación del ambiente, se implementó la hidroponía como una solución al problema (Mohammed & Sookoo, 2016).

La necesidad de producir mayor cantidad de alimentos de calidad, con menos insumos y recursos, aprovechando las tecnologías agrícolas existentes, conduce a que las instituciones de investigación generen alternativas de producción más competitivas y sustentables. Por ello se estableció como objetivo evaluar el efecto de la luz LED suplementaria sobre el desarrollo de las plantas de lechuga en los sistemas de producción de balsas flotantes y NFT, para obtener mayor

rendimiento, calidad y precocidad en el cultivo, bajo condiciones de invernadero, con reúso de la solución nutritiva para un segundo ciclo.

Objetivos particulares

1. Evaluar el efecto de la luz LED blanca suplementaria sobre la germinación, emergencia y desarrollo de la plántula del cultivo de lechuga en dos concentraciones de solución nutritiva para el cultivo de lechuga.
2. Cuantificar y comparar la concentración de clorofila a y b en la planta de lechuga cultivada en dos sistemas hidropónicos y soluciones nutritivas con y sin luz LED suplementaria.
3. Cuantificar y comparar la absorción nutrimental de la planta de lechuga en dos sistemas de producción con dos concentraciones de solución nutritiva en dos ciclos de producción consecutivos.
4. Cuantificar y comparar el contenido de nutrimentos remanentes en la solución nutritiva después de uno o dos ciclos de producción de lechuga.
5. Comparar la precocidad y el rendimiento del cultivo de lechuga en balsa flotante y NFT, dos soluciones nutritivas, con o sin luz LED blanca suplementaria.

Hipótesis

1. Debido al mayor volumen de contenedor, las plantas en el sistema de balsas flotantes tendrán mayor área foliar y absorción de nutrimentos remanentes, reflejándose en mayor ganancia de biomasa, que las plantas en el sistema NFT.
2. El uso de luz artificial tendrá efecto sobre el desarrollo de la planta, permitiendo el desarrollo de mayor número de hoja, raíz y tallo, contenido de pigmentos y ganancia de biomasa con relación a las plantas con iluminación natural.
3. El manejo de la solución nutritiva que permitirá obtener dos ciclos de cultivo, será donde el agua evapotranspirada se reponga diariamente con más solución y no con agua simple.

4 Revisión de literatura

4.1 Los cultivos sin suelo y la hidroponía

La historia de los cultivos sin suelo ha estado ligada inevitablemente a los grandes descubrimientos de los secretos fisiológicos de las plantas (Urrestarazu, 2015). En 1699, en Inglaterra, Woodward fue el primer investigador que hizo crecer a las plantas en diversos recipientes en medios en los que habían añadido diferentes cantidades de suelo (Urrestarazu, 2015).

El siguiente paso fue no añadir una cierta cantidad de suelo y así fue como el químico alemán Sanches y colaboradores en 1860 empezó a desarrollar el cultivo en solución nutritiva (Urrestarazu, 2015). Después W.F. Gericke, transfirió toda la tecnología desarrollada en laboratorio a fines comerciales (Urrestarazu, 2015).

Desde entonces los cultivos sin suelo han experimentado un gran avance en todo el mundo (Urrestarazu, 2015). Cuando se habla de cultivos sin suelo o hidroponía se suele referir a los tratamientos y consideraciones que se dan a la raíz de las plantas, ya que en general la parte aérea o vástago de las plantas se manejan igual a los sistemas en suelo convencional (Urrestarazu, 2015).

Por ello los criterios básicos que frecuentemente se usan son:

- ✓ El medio físico o medio de cultivo donde crece y se instala la raíz de la planta
- ✓ La forma de suministro de la disolución nutritiva
- ✓ La forma de oxigenación de la solución nutritiva
- ✓ La existencia o no de reciclado o recuperación de la disolución nutritiva (Urrestarazu, 2015).

4.2 Cultivo en solución

Cultivos en solución, se refiere a aquellos sistemas de producción que no utiliza ningún anclaje sólido para instalar y sustentar el sistema radical, y por lo tanto se desarrolla totalmente en solución nutritiva (Mohammed & Sookoo, 2016). De los sistemas de cultivo sin suelo es el que más se ajusta al termino hidropónico, al menos por su propia etimología (del griego hidro-agua y pono-labor, esfuerzo, trabajo) (Mohammed & Sookoo, 2016).

En este tipo de cultivo se encuentran clasificados cuatro tipos de sistemas hidropónicos

- ✓ Técnica de la película nutritiva (NFT)
- ✓ Balsas flotantes
- ✓ Aeroponía
- ✓ Forraje verde hidropónico (FVH)

Los cultivos en solución tienen distintas ventajas, comparados con los cultivos en suelo, como es el ahorro de agua, obtención de productos en menor tiempo y de mejor calidad, no necesita de insecticidas ni pesticidas, menor contaminación y adaptación a condiciones extremas, todo esto en comparación con campo abierto (Mohammed & Sookoo, 2016).

Sin embargo, hay algunas desventajas asociadas, tales como el costo de los sistemas de diseño y ubicación; la necesidad para personal capacitado; la constante observación y la especial atención en detalles del manejo; y la rápida propagación de una enfermedad una vez que ingresa al sistema (Mohammed & Sookoo, 2016).

Existen varios métodos para aportar el oxígeno necesario a las raíces (Urrestarazu, 2015). Tal vez el más usado en investigación y comercialmente es el de burbujeo de aire continuo, como en el sistema de balsas flotantes (Urrestarazu, 2015).

4.3 Sistemas de balsas flotantes o raíz profunda

La técnica hidropónica de cultivo con flujo laminar de nutrientes, conocida como NFT por sus siglas en inglés (Nutrient Film Technique), se originó en Inglaterra, con el fin de aumentar la productividad del sector de producción hidropónica mediante el uso total del espacio, crear un sistema cerrado donde recirculara la solución nutritiva, aprovechando al máximo el recurso hídrico, y favorecer la absorción en los sistemas radiculares de las plantas (Brenes & Jiménez, 2014). Su facilidad de construcción, así como su uso en unidades domésticas, lo hace muy recomendable, también se ha utilizado con fines comerciales a mediana o gran escala. Es sabido que, en general, valores por debajo de los 3-4 mg L⁻¹ de

oxígeno disuelto en la solución nutritiva producen una disminución en el crecimiento radical, apareciendo un característico oscurecimiento en las raíces (Urrestarazu, 2015).

En todos los sistemas hidropónicos o de cultivos sin suelo cerrados, es decir, aquellos que se reutilizan la solución nutritiva que sale de las unidades de cultivo, es posible aumentar la oxigenación provocando un salto del drenaje en el tanque de recogida como sucede en el sistema de la técnica de película nutritiva (Urrestarazu, 2015).

4.4 Sistemas de la técnica de película nutritiva

La técnica hidropónica de cultivo con flujo laminar de nutrientes, NFT (Nutrient Film Technique) se desarrolló para aumentar la productividad del sector de producción hidropónica (Brenes & Jiménez, 2014). Fue desarrollada durante la década de los sesenta por Allen Cooper para mejorar la oxigenación de las raíces, el tamaño de los canales debe ser proporcional al volumen de las raíces que van a contener (Urrestarazu, 2015).

En esta técnica de cultivo las raíces de las plantas están suspendidas en canales por donde pasa una fina película de solución nutritiva, manteniendo así las raíces húmedas. Los nutrientes se mezclan en consecuencia en un reservorio primario que fluye a través del sistema, alimentando continuamente a las raíces de las plantas a razón de 1 litro por minuto y el sistema puede ser ajustado con automatización para aireación (Mohammed & Sookoo, 2016).

El principio fundamental de la NFT es la recirculación de soluciones nutritivas, los sistemas están ampliamente ajustados para una variedad de producción de cultivos y es ideal para cultivos de corta duración como lechuga, cultivos de hojas y hierbas (Mohammed & Sookoo, 2016).

Los sistemas NFT más grandes son adaptables para producción de cultivos a largo plazo, como pepinos y tomates, esto hace que la hidroponía sea económica (Mohammed & Sookoo, 2016). Con lo anterior resulta ser atractivo y con ventajas destacadas, la ideal para la protección de degradación de los recursos naturales (Mohammed & Sookoo, 2016).

En China continental, la hidroponía, así como otras técnicas como es la luz artificial complementaria ha sido introducido para el aumento de la productividad proporcionando una iluminación precisa y específica a las plantas, evitando así el desperdicio energético (Mohammed & Sookoo, 2016). También se ha vuelto cada vez más popular en los Estados Unidos, Canadá, Europa Occidental y Japón, donde la gente es muy conservadora y protectora de sus ambientes (Mohammed & Sookoo, 2016).

4.5 Luz artificial complementaria en plantas

La luz juega un papel vital en la conducción de la fotosíntesis, regulando crecimiento vegetal y biosíntesis fitoquímica (Chen, et al., 2016). Cuando las luces artificiales se utilizan, el entorno de luz se puede ajustar y optimizar las condiciones de ésta, mejorando así crecimiento y calidad de las plantas hortícolas (Chen, et al., 2016).

Es posible maximizar la eficiencia de la planta, mediante las gestiones precisas de la irradiancia y la longitud de onda en ambientes controlados (Chen, et al., 2016).

Se encontró documentada la evaluación de 3 calidades de luz: LED rojo y azul (RB), rojo+azul+blanco (RBW) y luz fluorescente (FL) de color blanco frío, sobre la biomasa, contenido de clorofilas, proteína soluble, azúcares y nitratos en hojas de lechuga cultivada en hidroponía, con fotoperiodos de 16 h (Lin et al., 2013). Las plantas tratadas con luz RB presentaron menor biomasa en brotes y raíces que las tratadas con LEDs RBW y con FL; el contenido de azúcares y nitratos fue mayor y menor, respectivamente en RBW que en RB; en tanto que el contenido de proteínas y clorofilas presentó comportamiento similar entre los distintos tipos de luz (Lin et al., 2013).

El uso LEDs UV-A, azul (B), verde (G), rojo (R) y rojo lejano (FR), evaluando los efectos de diferentes calidades de luz suplementaria en los fitoquímicos y el crecimiento de lechuga de hoja roja cultivada a una alta densidad de siembra bajo lámparas fluorescentes blancas como fuente principal de luz dentro de una cámara de crecimiento (Li & Kubota, 2009). Después de 12 días de tratamiento,

la concentración de antocianinas aumentó en un 11 % y 31 % con UV-A y B, respectivamente, la concentración de carotenoides aumentó en un 12 % con B, la concentración de fenólicos aumentó en un 6 % con R, mientras que la FR suplementaria disminuyó la concentración de antocianinas, carotenoides y clorofila en 40 %, 11 % y 14 %, respectivamente, en comparación con los del control de luz blanca (Li & Kubota, 2009).

El peso fresco, el peso seco, la longitud del tallo, la longitud de la hoja y el ancho de la hoja aumentaron significativamente en un 28 %, 15 %, 14 %, 44 % y 15 %, respectivamente, con luz suplementaria FR en comparación con la luz blanca (Li & Kubota, 2009). Los resultados demostraron que la calidad de luz suplementaria podría usarse estratégicamente para mejorar el valor nutricional y el crecimiento de la lechuga de hoja pequeña cultivada bajo luz blanca (Li & Kubota, 2009).

4.6 Propiedades nutraceuticas de las lechugas

Las verduras contienen la mayoría, si no todos, los componentes esenciales de la nutrición humana (Hounsome et al., 2008). Los nutrientes se han considerado tradicionalmente como componentes de los alimentos que no pueden ser sintetizados en el cuerpo (por ejemplo, vitamina C) o cuya síntesis requiere un factor específico que en determinadas circunstancias puede estar ausente o ser inadecuado (Hounsome et al., 2008).

Sin embargo, ahora se reconoce que muchos otros compuestos de alimentos vegetales, como la fibra dietética, los flavonoides, los esteroides, los ácidos fenólicos y los glucosinolatos, se asocian con un menor riesgo de enfermedad (Hounsome et al., 2008). Esto ha sido ampliamente divulgado, a veces erróneamente, por la prensa popular (Hounsome et al., 2008).

Un gran número de fitoquímicos con capacidad antioxidante, actividades anti mutagénicas, antifúngicas y antivirales han identificado en brócoli, coliflor, coles de Bruselas, nabos, kale, mostaza, espárragos, espinacas, lechugas y endibias (Hounsome et al., 2008). Estos fitoquímicos se han relacionado a muchos efectos positivos en la salud humana, en enfermedades como diabetes, cataratas, obesidad etc. (Hounsome et al., 2008).

5 Materiales y Métodos

5.1 Ubicación y condiciones del invernadero

El experimento se llevó a cabo en los invernaderos de posgrado de Horticultura del Departamento de Fitotecnia, ubicados en Chapingo, Estado de México, a 19° 29' de latitud norte, 98° 53' de longitud oeste y una altitud de 2,250 m. El invernadero empleado es de tipo túnel con estructura metálica, ventilación lateral y frontal, cubierto con polietileno térmico, blanco lechoso, difusor de luz, con 35 % de sombra.

La investigación constó de 4 etapas:

Etapas de plántula ciclo 1 y 2, dando inicio el 23 de agosto de 2021 y 22 de septiembre de éste mismo año, respectivamente, concluyendo 30 días después de su inicio según el ciclo.

Etapas de producción ciclo 1 y 2, inició con el trasplante el 22 de septiembre de 2021 para el primer ciclo y el 22 de octubre de 2021 para el segundo, mismos terminaron con la cosecha 30 días después, respectivamente.

5.2 Condiciones de crecimiento

5.2.1 Etapa de plántula

La siembra de la variedad Starfigther, que es una lechuga rizada de tonalidad verde claro, proveniente de la casa semillera Itsco, se realizó en 2 charolas de poliestireno de 200 cavidades (25 mL de volumen por cavidad), rellenas de vermiculita húmeda, se colocó una semilla de lechuga por cavidad a 3 mm de profundidad. Una vez realizada la siembra, se cubrió con una capa del mismo sustrato y se volvió a humedecer a saturación.

Los riegos se realizaron de forma asperjada con solución nutritiva (SN) Steiner (Steiner, 1982), ajustada a una conductividad eléctrica (CE) de 1.8 ds m⁻¹ para una de las charolas y de 1.2 ds m⁻¹ para la otra.

Después de la siembra, una de las charolas se mantuvo bajo la condición de luz natural, y otra bajo condición de luz natural más 6 horas de luz LED artificial

(blanca), aplicada de las 18:00 a la 02:00 h por la tarde-noche, con apoyo de un temporizador.

Para proporcionar la condición de luz artificial en el tratamiento que así lo requería, se utilizaron 2 lámparas horizontales marca Tecnoled modelo ML de 40 watts que irradiaban 3,100 luxes de intensidad luminosa, al estar colocadas en forma paralela 60 cm arriba de las plantas. Bajo esta condición las plántulas permanecieron 30 días.

Durante el ciclo 1 de plántula, la temperatura oscilaba entre 9.2 °C y 52.9 °C, mientras que para el ciclo 2, la temperatura mínima fue de 10 y 50.4 °C (Apéndice 13). La humedad relativa estuvo entre 12 y 92 % para el primer ciclo y entre 93 y 11 % para el segundo (Apéndice 14).

Los datos de radiación fotosintéticamente activa (RFA) fueron obtenidos de la página oficial de la NASA y modificados al 35% menos según la sombra del invernadero. Para el primer ciclo tuvo una máxima de 70 watts m⁻¹ y mínima de 38.2 watt m⁻¹ y el segundo ciclo osciló entre 69 y 33 watts m⁻¹ (Apéndice 15) (National Aeronautics and Space Administration, 2023).

5.2.2 Etapa de producción

Después del periodo de almácigo (30 días después de la siembra), las plantas se llevaron a los sistemas hidropónicos de raíz flotante y NFT, donde permanecieron por otros 30 días. Para la condición de luz artificial, las lámparas empleadas fueron similares a las de la etapa de plántula, se utilizaron ocho lámparas en pares, a 60 cm de altura, por encima de las plantas en forma horizontal, con periodo de iluminación igual que en plántula.

Para evitar el efecto de la luz artificial sobre las plantas del tratamiento sin luz artificial, se colocó una doble cortina, para disminuir la absorbancia o reflejo de luz, según sea el caso. Blanca para el lado de las plantas sometidas a LED complementaria y negra por el lado de las plantas con luz natural, las cortinas fueron hechas con ground cover negro y tela blanca, sujetas a los tutores del

invernadero, extendidas a partir de que las lámparas encendían y retiradas al inicio del día.

El trasplante se realizó sobre unas canastillas hidropónicas de polipropileno negro de 2" llenas con fibra de coco previamente lavada con agua simple para retirar el exceso de sales, estas fueron colocadas en ambos sistemas hidropónicos (Figura 1).

Los sistemas empleados fueron NFT y raíz flotante. Para el primero se empleó tubería de PVC sanitario de 3", con orificios cada 30 cm donde se colocaron las canastillas hidropónicas. Los tubos se dispusieron en pares separados a 20 cm, con una pendiente del 1 % para captar el agua drenada y regresar por gravedad a un depósito de 200 L de capacidad, en el cual se colocó una bomba eléctrica de ¼ de HP para realizar riegos (programados cada 15 minutos, de 8:00 a 18:00 h, y cada 90 minutos de 19:00 a 6:00 h, con pulsos de 30 min en ambos casos) (Carrasco, 2004).

Para la técnica de raíz flotante, se usaron tinas hidropónicas de 33 cm de ancho por 40 cm de largo rectangulares de 32 L de capacidad, cubiertas de plástico negro, con una placa de poliestireno de 1" de espesor sobre ellas, donde se colocaron dos canastillas con sus plántulas procurando que la distribución y densidad de plantas fuera similar al de NFT (20 plantas m⁻²) (Carrasco, 2004).

Para la oxigenación de la SN, se usó una bomba de acuario marca Aqua Kril con piedras dispersoras de oxígeno, éstas aportaban oxígeno durante 20 minutos, a partir de las 10:00 am hasta las 4:00 am, en intervalos de 2 horas (Carrasco, 2004).

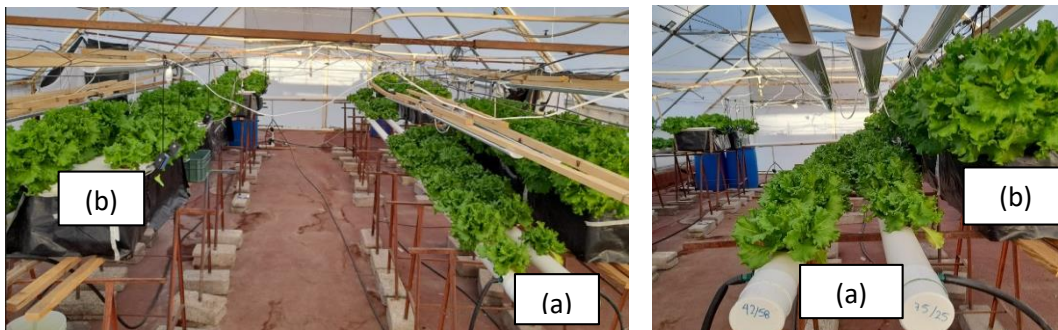


Figura 1. Experimento establecido con sistemas hidropónicos: Técnica de la película nutritiva (a) y balsas flotantes (b) con planta de lechuga en etapa de producción.

Como otro factor de estudio, se trabajó con dos niveles de conductividad eléctrica de la solución nutritiva, 1.8 y 1.2 dS m⁻¹, las cuales se prepararon a partir de la solución Steiner (Apéndice 15), con una disolución al 75 %, es decir 75 % solución nutritiva y 25 % agua, para la primera y al 60 % para la segunda. Para los tratamientos con conductividad de 1.8 dS m⁻¹, la SN evapotranspirada fue repuesta con agua simple y para el segundo caso (conductividad de 1.2 dS m⁻¹) la SN evapotranspirada se repuso con la misma solución y conductividad, de tal forma que para el primer caso la SN fue disminuyendo y en el segundo caso, fue aumentando conforme se desarrolló el cultivo a lo largo de los dos ciclos.

Durante el desarrollo del experimento se registraron algunos factores ambientales, uno de ellos fue la radiación fotosintéticamente activa acumulada en el día, datos los cuales fueron determinados por la estación agrometeorológica de la NASA y los cual se les restó el porcentaje de sombra correspondiente al invernadero.

Asimismo, se colocó un datalogger marca Extech, modelo RHT10 dentro del invernadero para registro de datos de temperatura y humedad relativa cada hora durante el periodo del experimento. Por otro lado, se midió día con día el pH, la temperatura y conductividad eléctrica de la solución nutritiva con ayuda de un equipo combo portátil marca Hanna, modelo HI 98132. Así como el consumo de agua desde la etapa de plántula hasta la cosecha y los costos de producción (estimados) para cada tratamiento.

Durante el ciclo 1 en etapa de producción, la temperatura oscilaba entre 9.2 y 53 °C, mientras que para el ciclo 2, la temperatura mínima fue de 5 y 50 °C (Apéndice 13). La humedad relativa estuvo entre 15 y 93 % para el primer ciclo y entre 8 y 89 % para el segundo (Apéndice 14).

Los datos de radiación fotosintéticamente activa (PAR) fueron obtenidos de la página oficial de la NASA y modificados al 42% menos según el porcentaje de

sombra en el invernadero. Para el primer ciclo tuvo una máxima de 69 watts m^{-1} y mínima de 33 watt m^{-1} y en el segundo ciclo 63 y 34 watts m^{-1} (Apéndice 15) (National Aeronautics and Space Administration, 2023).

5.3 Tratamientos

5.3.1 Etapa de plántula

Los tratamientos en almácigo estaban conformados por dos condiciones de luz: 1) luz natural más luz blanca artificial suplementaria por 6 h; 2) luz natural; además dos conductividades electricas: 1) Solución nutritiva con 1.8 dS m^{-1} de CE. 2) solución nutritiva con 1.2 de CE, obteniendo un total de 4 tratamientos, con 10 repeticiones y un tamaño de unidad experimental de 1 plántula.

5.3.2 Etapa de producción

Para la etapa de producción (30-60 días después de siembra, dds), los tratamientos fueron dos condiciones de luz (similar a la etapa de plántula), dos conductividades eléctricas (1.8 y 1.2 dS m^{-1}) y dos sistemas hidropónicos (raíz flotante y NFT), lo cual conformó 8 tratamientos, con cuatro repeticiones y un tamaño de unidad experimental de 2 plantas.

5.4 Variables morfológicas

Las mediciones biométricas se llevaron a cabo en dos momentos: al final de la etapa de plántula a los 30 días después de la siembra (dds) y en la cosecha (60 dds). Se consideraron número de hojas (NH); longitud de raíz (LR); peso fresco de hoja (PFH); peso fresco de raíz (PFR); peso fresco de tallo (PFT). Para las variables de peso fresco se utilizó una balanza gramera marca OHAUS, modelo Scout Pro. Se midió también peso seco de hoja (PSH); peso seco de raíz (PSR); peso seco de tallo (PST). Las variables de peso seco se cuantificaron en una balanza analítica marca OHAUS, modelo Pioneer, previamente secadas en una estufa de secado marca Robertshaw, modelo BG; largo (LHG).

También se midió el ancho de la hoja más grande (AHG), para el caso de plántula; área foliar (AF), en el momento de la cosecha ésta variable se midió en una hoja grande, mediana y chica de cada planta, mientras que para la plántula

se midieron todas las hojas con un medidor de área foliar marca Lincor, modelo LI-3100C.

5.5 Determinación de clorofilas, carotenoides

Al momento de la cosecha (60 dds) se cuantificaron los pigmentos fotosintéticos de 4 repeticiones de plantas por tratamiento, de acuerdo con el método de Lichtenthaler y Wellburn modificado. Se dejaron reposando 2 g de muestra de hoja madura (1 g de centro y 1 g de orilla de la hoja muestra) en 20 mL de acetona al 80 % dentro de un refrigerador a 6 °C durante 24 h, se filtró y aforó a 25 mL con acetona al 80 %. La absorbancia de la extracción a 645, 646, 652, 663 y 470 nanómetros se midieron con un espectrofotómetro marca Thermo Fisher Scientific, modelo GENESYS 10S VIS (Modificación de Lichtenthaler y Wellburn, 1983).

Las concentraciones de clorofila *a* (Clor *a*), clorofila *b* (Clor *b*), clorofila total (Clor T) y carotenoides se calcularon empleando las siguientes Ecuaciones:

$$\text{Clor T} = 0.0202 A_{652} + 0.00802 A_{663} \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{Clor a} = 0.0127 A_{663} - 0.0026 A_{645} \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{Clor B} = 0.0229 A_{645} - 0.00468 A_{663} \text{ mg L}^{-1}$$

$$\text{carotenoides} = (1000 A_{470} - 1.63 [\text{Clor a}] - 104.96 [\text{Clor b}]) / 221$$

(Modificación de Lichtenthaler y Wellburn, 1983).

5.6 Cuantificación de nutrimentos

Para determinar macronutrimentos se secaron las plantas completas (hoja, raíz y tallo) para después molerlas, se tomó una muestra y procedió a realizar los análisis (Pequerul et al., 1993). Para la determinación de nitrógeno se utilizó el método de Kjeldahl, usando 0.1 g de muestra seca, para someterla a una mezcla de ácido sulfúrico-salicílico y mezcla catalizadora para aforar a 10 mL (Lang, 1958) (Pequerul et al., 1993). Para el resto, (P, K, Ca, Mg y S) se determinaron por el método de digestión húmeda, utilizando una muestra de 0.5 g (Pequerul et al., 1993).

Se tomaron dos muestras de 1 L de solución nutritiva por tratamiento al final de los dos ciclos productivos de lechuga y se determinó CE, pH, así como concentración de macronutrientes y micronutrientes (Pequerul et al., 1993).

5.7 Análisis estadístico

Para la etapa de plántula se empleó un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas, con cuatro tratamientos y diez repeticiones. La parcela grande fue la condición de luz y la chica la CE.

En tanto que, para la etapa de producción fue un diseño de bloques completos aleatorizados, con arreglo en parcelas subdivididas, con ocho tratamientos y cuatro repeticiones. La parcela grande fue la condición de luz, la parcela intermedia la CE de la SN y en la parcela chica el sistema hidropónico.

La unidad experimental (UE) tuvo dos plantas, bajo

El análisis estadístico para ambas etapas se llevó a cabo con el programa SAS, v. 9.0. Se aplicó la prueba de comparación de medias Tukey, con un nivel de significancia del 5 % y la prueba de con las combinaciones que se encontraron entre factores.

6 Resultados y discusión

6.1 Etapa de plántula ciclo 1

6.1.1 Efecto de luz

Las plántulas de lechuga crecidas bajo luz LED y luz natural, durante el ciclo 1 (Cuadro 1), no mostraron diferencia significativa en el número de hojas (Apéndice 1). Mientras que el área foliar, la longitud y el ancho de hoja fue superior en 50, 27 y 15 % en plántulas tratadas con luz natural, respecto a la luz LED.

Con respecto al área foliar, longitud y ancho de hoja, a excepción del número de hojas, fueron consistentes con un experimento donde utilizó luz blanca, con lechuga, durante la etapa de almácigo (Cheng, et al., 2016).

En contraparte, la raíz de las plantas bajo luz LED presentaron mayor longitud de raíz, respecto a la luz natural. Esto se pudo deber a que la intensidad de luz LED generó mayor estrés para la planta que como respuesta, provocó mayor longitud de raíz, por lo que ocurrió el efecto de fototropismo negativo, en donde las raíces crecen en sentido negativo a la luz, cuando están en presencia de ésta (Jiménez-Pérez, 2016).

Cuadro 1. Comparación de medias en variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 1 de producción, bajo diferentes condiciones de luz.

Ciclo	Luz	Número de hojas	Longitud de hoja (cm)	Ancho de hoja (cm)	Área foliar (cm ²)	Longitud de raíz (cm)
1	LED C	4.2 ± 1.3 a	4.8 ± 0.7 b	3.4 ± 0.5 b	16.9 ± 4.9 b	10.8 ± 1.6 a
	Natural	4.0 ± 0.6 a	6.6 ± 1.5 a	4.0 ± 0.6 a	34.2 ± 14.5 a	8.7 ± 2.3 b
	DMSH	0.4	0.6	0.5	4.9	1.1

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; LED C: Luz natural + LED complementaria; - Datos no registrados.

Durante el ciclo 1 de plántula de lechuga, el tallo no fue cuantificable. El peso de biomasa fresca y seca de hojas fue significativamente mayor en 55 y 50 %, respectivamente en los tratamientos bajo luz natural, comparados con los de luz

LED complementaria. Mientras que el peso de biomasa fresca y seca de raíz no tuvo diferencias significativas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Cuadro 3).

Este efecto positivo de la luz natural, puede deberse a que, en etapa de plántula, ésta es más susceptible a espectros de luz rojo (610-750nm) y azul (400-520 nm) para ganar peso seco (Avendaño-Abarca et al., 2020).

Cuadro 2. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de luz.

Ciclo	Luz	Peso de biomasa fresca (g)		
		Tallo	Raíz	Hoja
1	LED C	-	0.78 ± 0.16 a	1.00 ± 0.10 b
	Natural	-	0.68 ± 0.21 a	1.80 ± 0.80 a
	DMSH	-	0.11	0.20

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significativo; LED C: Luz natural + LED complementaria; - Datos no registrados.

Cuadro 3. Comparación de medias para peso de biomasa seca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de luz.

Ciclo	Luz	Peso de biomasa seca (g)	
		Tallo	Hoja
1	LED C	-	0.10 ± 0.02 b
	Natural	-	0.20 ± 0.09 a
	DMSH	-	0.03

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; LED C: Luz natural + LED complementaria; - Datos no registrados.

6.1.2 Efecto de conductividad eléctrica

Durante el ciclo uno las plántulas de lechuga, sometidas a una CE de 1.2 dS m⁻¹ fueron significativamente mayores en el número de hojas, longitud de hoja y área foliar en un 29, 19, 34 % respectivamente, en comparación a las plántulas tratadas con una CE de 1.8 ds m⁻¹. En contraparte el ancho de hoja y longitud de

raíz, no mostraron un efecto significativo, al aplicar diferente conductividad eléctrica (Cuadro 4).

Esto se pudo deber a que, la conductividad eléctrica alta en las plantas puede llegar a inhibir el crecimiento de éstas y reducir la productividad, cuando se encuentran sometidas a altas temperaturas (Cepeda-Guzmán et al., 2014).

Cuadro 4. Comparación de medias para variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 1 de producción, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Longitud				
		Número de hojas	de hoja (cm)	Ancho de hoja (cm)	Área foliar (cm ²)	Longitud de raíz (cm)
1	1.8	3.4 ± 0.6 b	5.1 ± 0.9 b	3.6 ± 0.6 a	20.3 ± 7.7 b	10.37 ± 1.96 a
	1.2	4.8 ± 0.9 a	6.3 ± 1.7 a	3.8 ± 0.6 a	30.8 ± 16.6 a	9.10 ± 2.45 a
	DMSH	0.5	0.6	0.4	0.4	1.08

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ds m⁻¹: decisiemens por metro; CE: conductividad eléctrica; - Datos no registrados.

Durante el ciclo 1 para plántula de lechuga con la solución nutritiva de una conductividad de 1.2 dS m⁻¹, el peso de biomasa fresca y seca en hoja fue mayor un 31 y 50 % en orden de mención, en contraparte la solución con CE de 1.8 dS m⁻¹ fue significativamente mayor en la ganancia de un 50 % de peso de biomasa seca para raíz, comparada con la conductividad más baja (Cuadro 5 y Cuadro 6).

Lo anterior se atribuye a la absorción de agua y minerales por las plantas, si la CE se eleva, la absorción tiende a disminuir por efecto higroscópico que tienen las sales, por ende, las plantas se ven restringidas de estos recursos y disminuyen su rendimiento (Terrazas et al., 2022).

La respuesta más común como método de adaptación de las plantas ante la salinidad está relacionada con modificaciones en la pared celular y cambios en los tejidos radicales, por lo que el aumento del peso de biomasa seca se atribuye posiblemente a un aumento en el grosor de la raíz, ate la inminente falta de alargamiento por tener los nutrimentos cerca de ella (Terrazas et al., 2022).

Cuadro 5. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Peso de biomasa fresca (g)	
		Tallo	Hoja
1	1.8	-	1.1 ± 0.3 b
	1.2	-	1.6 ± 0.7 a
	DMSH	-	0.3

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns= no significativo; ds m⁻¹: decisiemens por metro; CE: conductividad eléctrica; - Datos no registrados.

Cuadro 6. Comparación de medias para peso de biomasa fresca y seco en plántula de lechuga tipo italiana durante otoño-invierno, en el ciclo 1 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Peso de biomasa seca (g)		
		Tallo	Raíz	Hoja
1	1.8	-	0.053 ± 0.018 a	0.111 ± 0.036 b
	1.2	-	0.070 ± 0.021 b	0.180 ± 0.082 a
	DMSH	-	0.013	0.035

Medias ± Desviación estándar, letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). DMSH= Diferencia mínima significativa honesta; ns= no significativo; ds m⁻¹= decisiemens por metro; CE= conductividad eléctrica; - Datos no registrados

6.1.3 Efecto de combinación luz y conductividad eléctrica

En el primer ciclo de cultivo de plántula, otoño-invierno, el número de hojas (Figura 2A) fue significativamente mayor un 17 %, para el tratamiento con luz LED complementaria en 1.2 dS m⁻¹, respecto a luz natural. La longitud de hoja grande de plántula (Figura 2B), en presencia de luz LED complementaria es significativamente mayor un 21 % para 1.8 dS m⁻¹ y 32 % para 1.2 dS m⁻¹, comparado con luz natural.

Por otro lado, el área foliar (Figura 2C), peso de biomasa fresca de hoja (Figura 2D) y peso de biomasa seca de hoja (Figura 2E), fueron significativamente mayores en 63, 77 y 21 % para el tratamiento en luz natural con 1.2 ds m⁻¹.

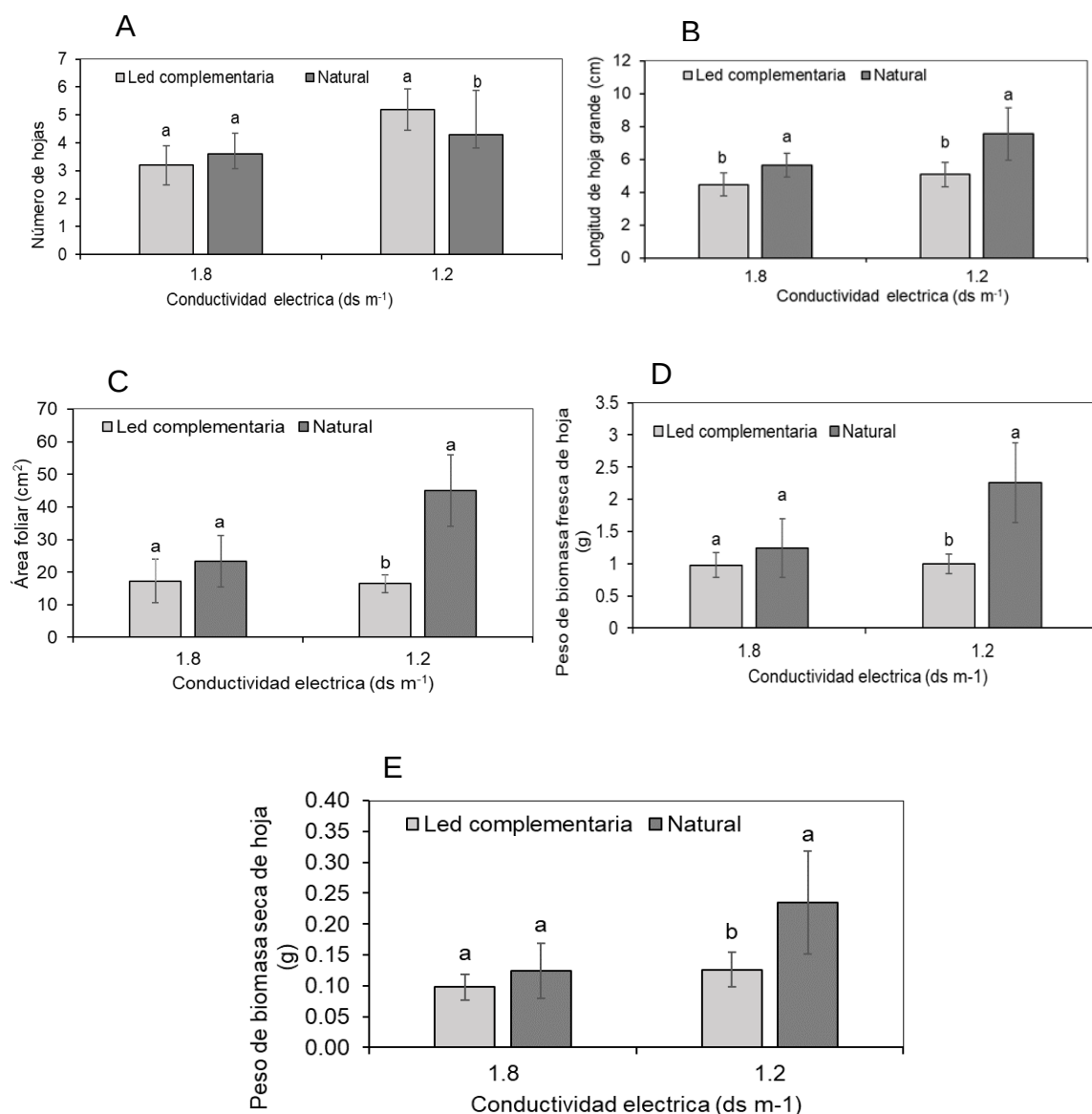


Figura 2. Efecto de la combinación luz y conductividad eléctrica, en número de hojas (A), longitud de hoja grande (B), área foliar (C), peso de biomasa fresca de hoja (D), peso de biomasa seca de hoja (E) en plántula de lechuga italiana, durante el primer ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

El aumento en número de hojas y longitud de hoja, en plántula de lechuga durante otoño-invierno, en el ciclo uno de producción (Figura 1A y 1B), ante la presencia de luz LED complementaria, se puede influir en la tasa de división celular, la

elongación celular y la diferenciación de tejidos, lo que lleva a un crecimiento y desarrollo óptimos de las plántulas.

La disminución en área foliar, biomasa fresca y seca de hoja para luz LED complementaria (Figura 2C, 2D y 2E), en éste mismo ciclo, fue congruente con los resultados encontrados por Zheng y Van Labeke (2017). La expansión de la lámina foliar está relacionada con los citocromos, los cuales, su activación está ligada a luz azul, por lo que las plántulas en presencia de Luz LED complementaria más luz natural, pudieron llegar a inhibir el efecto de luz azul (Zheng & Van Labeke, 2017).

6.2 Etapa de plántula ciclo 2

6.2.1 Efecto de luz

En el ciclo 2 (Cuadro 7), el número de hojas, longitud y ancho de hoja, área foliar y longitud de raíz fue significativamente superior en un 20, 32, 23, 42 % respectivamente, para los tratamientos bajo luz LED suplementaria en comparación con las plántulas tratadas con luz natural. Este efecto en comparación con el primer ciclo de cultivo pudo deberse, a la menor radiación solar del periodo de invierno, por lo que el efecto de la luz LED ayudó a su desarrollo.

Por otro lado, la longitud de raíz tuvo un desarrollo raquíptico, por lo que no fue posible medirla, esto se atribuye a la baja temperatura a nivel de rizosfera que tuvo la raíz, en comparación con el ciclo 2 (Cuadro 7) (Avendaño-Abarca, et al., 2020).

Cuadro 7. Comparación de medias para variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 2 de producción, bajo diferentes condiciones de luz.

Ciclo	Luz	Número de hojas	Longitud de hoja (cm)	Ancho de hoja (cm)	Área foliar (cm ²)	Longitud de raíz (cm)
2	LED C	6.7 ± 1.3 a	11.1 ± 3.6 a	6.5 ± 2.5 a	78.4 ± 24.8 a	-
	Natural	5.3 ± 0.9 b	7.5 ± 2.3 b	5.0 ± 2.4 b	45.4 ± 31.0 b	-
	DMSH	0.8	1.6	0.9	16.5	-

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; LED C: Luz natural + LED complementaria; - Datos no registrados.

El segundo ciclo de cultivo, donde el peso de biomasa fresca y seca de tallo, raíz y hoja fue significativamente mayor en los tratamientos con luz LED 100, 38, 46, 100, 33 y 34 %, en ese mismo orden, en relación con la luz natural (Cuadro 8 y Cuadro 9) La menor acumulación de biomasa en los tratamientos de luz natural, puede deberse a la menor radiación solar de los días nublados de invierno (Apéndice 12) (Zheng & Van Labeke, 2017).

Cuadro 8. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de luz.

Ciclo	Luz	Peso de biomasa fresca (g)		
		Tallo	Raíz	Hoja
2	LED C	0.52 ± 0.20 a	1.60 ± 1.10 a	4.40 ± 1.50 a
	Natural	0.00 ± 0.00 b	1.00 ± 0.40 b	2.40 ± 1.20 b
	DMSH	0.07	0.53	0.88

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significativo; LED C: Luz natural + LED complementaria.

Cuadro 9. Comparación de medias para peso de biomasa seca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de luz.

Ciclo	Luz	Peso de biomasa seca (g)	
		Tallo	Hoja
2	LED C	0.02 ± 0.01a	0.29 ± 0.12 a
	Natural	0.00 ± 0.00 b	0.20 ± 0.09 b
	DMSH	0.01	0.08

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; LED C: Luz natural + LED complementaria.

6.2.2 Efecto de conductividad eléctrica

Para el periodo de cultivo en este segundo ciclo, la solución con la conductividad más alta (1.8 ds m^{-1}) incrementó el vigor morfológico de plántula, en comparación con la CE de 1.2 ds m^{-1} (Cuadro 10). Esto se pudo deber a que la temperatura y conductividad eléctrica más alta disminuyeron gradualmente (Apéndice 11).

Atribuyendo también a que durante el ciclo 2 la planta no se vio obligada a evapotranspirar en mayor proporción, como en el ciclo 1, para regular su temperatura, por consiguiente la solución nutritiva no se concentró como en el ciclo pasado y la planta pudo absorber más eficientemente los nutrientes proporcionados (Pérez-Reategui & Pérez-Reategui, 2016).

Cuadro 10. Comparación de medias para variables morfológicas de plántulas de lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, en el ciclo 2 de producción, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.

Ciclo	CE (ds m^{-1})	Longitud				
		Número de hojas	de hoja (cm)	Ancho de hoja (cm)	Área foliar (cm^2)	Longitud de raíz (cm)
2	1.8	6.6 ± 1.2 a	11.0 ± 3.8 a	7.0 ± 2.6 a	79.6 ± 27.0 a	-
	1.2	5.4 ± 1.1 b	7.8 ± 2.2 b	4.6 ± 1.8 b	44.2 ± 27.6 b	-
	DMSH	0.6	1.5	1.5	12.5	-

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ds m^{-1} : decisiemens por metro; CE: conductividad eléctrica; - Datos no registrados.

El segundo ciclo, el peso de biomasa fresca y seca, de tallo y hoja, fue mayor un 33, 39, 60 y 43 % en orden de mención, para los tratamientos con 1.8 ds m⁻¹, en comparación con 1.2 ds m⁻¹ (Cuadro 11 y Cuadro 12).

Esto se atribuye a la disminución de temperatura en invierno (Apéndice 11) y aumento de la conductividad eléctrica (1.8 ds m⁻¹), comparado con la más baja. A temperaturas bajas, el metabolismo de las plantas tiende a ralentizarse. Sin embargo, una solución nutritiva con una mayor conductividad eléctrica puede estimular el metabolismo de las plantas debido a la presencia de una mayor concentración de nutrientes (Taiz et al., 2017).

Lo antes mencionado, puede aumentar la actividad metabólica de las plantas, aunado al aumento de la solubilidad del oxígeno en la solución por la disminución de la temperatura, puede resultar en un mayor crecimiento y producción de biomasa (Rojas-Velázquez et al., 2013).

Cuadro 11. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en plántula de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Peso de biomasa fresca (g)	
		Tallo	Hoja
2	1.8	0.3 ± 0.3 a	4.3 ± 1.7 a
	1.2	0.2 ± 0.2 b	2.6 ± 1.1 b
	DMSH	0.1	0.6

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significativo; ds m⁻¹: decisiemens por metro; CE: conductividad eléctrica.

Cuadro 12. Comparación de medias para peso de biomasa fresca y seco en plántula de lechuga tipo italiana durante otoño-invierno, en el ciclo 2 de producción, con diferentes tratamientos de conductividad eléctrica

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Peso de biomasa seca (g)		
		Tallo	Raíz	Hoja
2	1.8	0.015 ± 0.020 a	0.340 ± 0.356 a	0.320± 0.116 a
	1.2	0.003 ± 0.005 b	0.175 ± 0.214 a	0.179±0.064 b
	DMSH	0.007	0.66	0.047

Medias ± Desviación estándar, letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). DMSH= Diferencia mínima significativa honesta; ns= no significativo; ds m⁻¹= decisiemens por metro; CE= conductividad eléctrica.

6.2.3 Efecto de combinación luz y conductividad eléctrica

En el segundo ciclo de cultivo de plántula, otoño-invierno, el área foliar (

Figura 3A) fue significativamente mayor un 70 %, para el tratamiento con luz LED complementaria en 1.2 ds m⁻¹, respecto a luz natural. El peso de biomasa fresca de tallo (Figura 3B), en presencia de luz LED complementaria tuvo significancia estadística en 100 % para 1.8 y 1.2 ds m⁻¹, comparado con luz natural, simultáneamente el peso de biomasa seca de tallo (Figura 2B) fue estadísticamente superior un 100 % con luz LED complementaria en 1.8 y 1.2 ds m⁻¹.

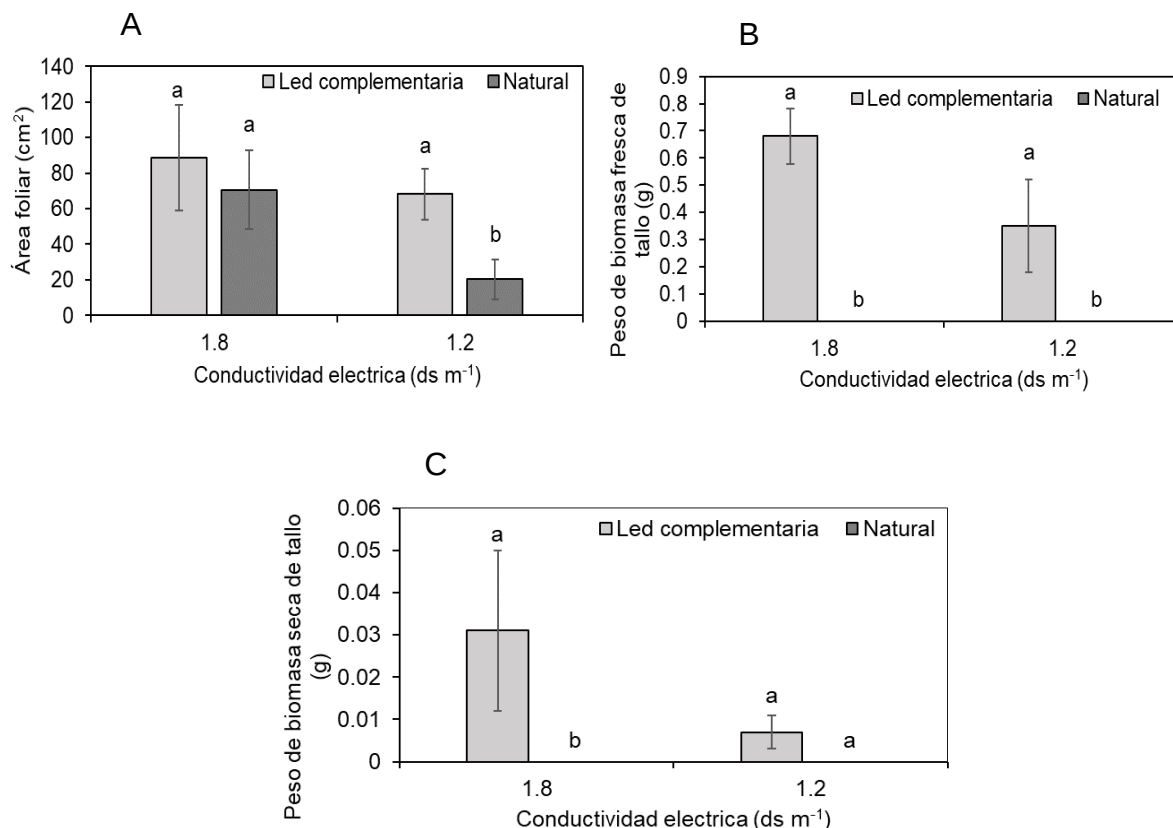


Figura 3. Efecto de la combinación luz y conductividad eléctrica, en área foliar (A), peso de biomasa fresca de tallo (B) y peso de biomasa seca de tallo (C) en plántula de lechuga italiana, en el segundo ciclo de cultivo. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el segundo ciclo de cultivo, la superioridad de área foliar, peso de biomasa fresca y seca de tallo en Luz LED, pudo complementar la radiación solar que necesitaba las plántulas a causa de los días de invierno (Apéndice 14). Éste complemento de luz LED, ante la inminente falta de radiación solar, pudo resaltar la luz roja, la cual activa los fitocromos lo que desencadena diversas respuestas fisiológicas en las plantas, el alargamiento del tallo y la inhibición de la elongación de las hojas, redistribuyendo los nutrientes al aumento de área foliar (Zheng & Van Labeke, 2017).

Un exceso de sales puede afectar la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces, lo que puede llevar a un estrés hídrico y desequilibrios nutricionales en las plántulas (Cepeda-Guzmán et al., 2014). Por el contrario, una CE más baja

puede indicar una concentración de sales más equilibrada y adecuada para las plántulas de lechuga en su etapa inicial, lo que a su vez promueve un crecimiento más saludable y vigoroso de éstas (Cepeda-Guzmán *et al.*, 2014).

6.3 Etapa de producción ciclo 1

6.3.1 Morfología de lechuga en etapa de producción ciclo 1

Efecto de luz

Al final del ciclo uno de lechuga, el número de hojas, largo y ancho de hoja, área foliar, longitud de raíz, peso de biomasa fresca y seca de hoja, raíz y tallo, no presentó alguna diferencia significativa al aplicar diferente tipo de luz (Apéndice 3 y 4), esto se atribuye a que las plantas de lechuga en su etapa adulta resultan ser más selectivas, en las longitudes de onda de espectros, en comparación con la etapa de plántula, para modificarse físicamente (Chang & Chang, 2014).

Efecto de conductividad eléctrica

A nivel de conductividad eléctrica, al concluir el primer ciclo de cultivo de lechuga, tipo italiana, el número de hojas, área foliar, peso de biomasa fresca y seca de hoja, raíz y tallo, no tuvieron diferencia significativa (Apéndice 3), sin embargo, para la longitud de raíz se vio favorecida un 21 %, para los tratamientos con una conductividad de 1.2 ds m^{-1} (Cuadro 13).

Lo anterior mencionado se atribuye a la menor concentración de sales por cm^3 , la raíz, como medio principal de abastecimiento, se vio con la necesidad de alargarse para poder obtener los nutrimentos necesarios y así no afectar su desarrollo, por ello en las demás variables morfológicas no se encontró alguna significancia (Samarakoon *et al.*, 2016; Rodríguez *et al.*, 2002).

Cuadro 13. Comparación de medias para variables morfológicas al final del ciclo 1 de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Número de hojas	Área foliar (cm ²)	Longitud de raíz (cm)
1	1.8	26.5 ± 8.3 a	324.5 ± 157.6 a	28.7±12.9 b
	1.2	25.3 ± 7.6 a	295.5 ± 130.4 a	36.4±36.4 a
	DMSH	3.0	67.2	5.6

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significativo; ds m⁻¹: decisiemens por metro, CE; conductividad eléctrica.

Efecto de sistema hidropónico

En cuanto al tipo de sistema hidropónico, durante el primer ciclo de cultivo con el sistema de balsas flotantes, el número de hojas, área foliar y longitud de raíz fueron superiores un 31, 49 y 52 % comparado con el sistema de la técnica de película nutritiva (NFT; por sus siglas en inglés) (Cuadro 14).

Para el primer ciclo, se atribuye a que en el sistema balsas flotantes, la raíz de la planta estaba totalmente sumergida en la solución nutritiva (SN), por lo que le era más fácil tomar los nutrimentos caso contrario al sistema de NFT, donde únicamente pasaba por los extremos de la raíz una película de SN. Así como también influyó, que en el sistema de balsas flotantes se tenía un volumen mayor de SN por planta (Brenes & Jiménez, 2018).

Cuadro 14. Comparación de medias para variables morfológicas al final del ciclo 1 de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Ciclo	Sistema	Número de hojas	Área foliar (cm ²)	Longitud de raíz (cm)
1	Balsas flotantes	30.7 ± 8.2 a	411.7 ± 124.7 a	43.9 ± 11.7 a
	NFT	21.2 ± 3.8 b	208.7 ± 74.1 b	21.2 ± 7.4 b
	DMSH	2.6	48.9	3.8

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

Para el ciclo 1, el peso de biomasa fresca de hoja, raíz y tallo, fueron superiores un 65, 43 y 60 %, respectivamente para el sistema de balsas flotantes (Cuadro 15).

Esto se atribuye a la mayor cantidad de solución nutritiva disponible para la planta en el sistema de balsas flotantes, al tener la raíz una mayor superficie de contacto con la solución nutritiva, absorbe con mayor facilidad (Brenes & Jiménez, 2018).

Cuadro 15. Comparación de medias para peso de biomasa fresca al final del primer ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Ciclo	Sistema	Peso de biomasa fresca (g)		
		Hoja	Raíz	Tallo
1	Balsas flotantes	259.1 ± 96.2 a	58.1 ± 28.1 a	27.9 ± 12.5 a
	NFT	90.7 ± 41.0 b	33.4 ± 10.2 b	11.2 ± 7.0 b
	DMSH	28.6	7.1	4.2

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

El peso de biomasa seca para el ciclo 1, en hoja y tallo fueron superiores un 47 y 42 %, en balsas flotantes, comparado con el sistema de la técnica de película nutritiva (NFT por sus siglas en inglés), en contraparte en el peso de biomasa seca de raíz, no se encontró significancia (Cuadro 16).

La planta en el sistema de raíz profunda tiene menor desgaste energético para obtener sus alimentos al contener mayor superficie radical dentro de la solución nutritiva comparado con el sistema NFT, por lo que la mayor cantidad de energía es canalizada a la parte aérea (Lara-Herrera, 1999).

Cuadro 16. Comparación de medias para peso de biomasa seca al final del primer ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, durante otoño-invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Ciclo	Sistema	Peso de biomasa seca (g)		
		Hoja	Raíz	Tallo
1	Balsas flotantes	12.0 ± 4.7 a	2.0 ± 1.0 a	1.9 ± 0.9 a
	NFT	6.3 ± 2.3 b	1.8 ± 0.5 a	1.1 ± 0.6 b
	DMSH	1.5	0.3	0.4

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significancia; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

Efecto de combinación luz y sistema hidropónico

El primer ciclo de cultivo de planta adulta, otoño-invierno, el número de hojas (Figura 4A), peso fresco de hoja (Figura 4B), peso seco de hoja (Figura 4C), peso fresco de raíz (Figura 4D) y peso seco de raíz (Figura 4E) fueron significativamente mayor para el tratamiento con luz LED complementaria en balsas flotantes, un 30, 32, 36, 47 y 40 % respectivamente, comparado con luz natural en el mismo sistema. Mientras que, la longitud de raíz, peso fresco de tallo, peso seco de tallo y área foliar no fueron estadísticamente diferentes (Apéndice 3 y 4).

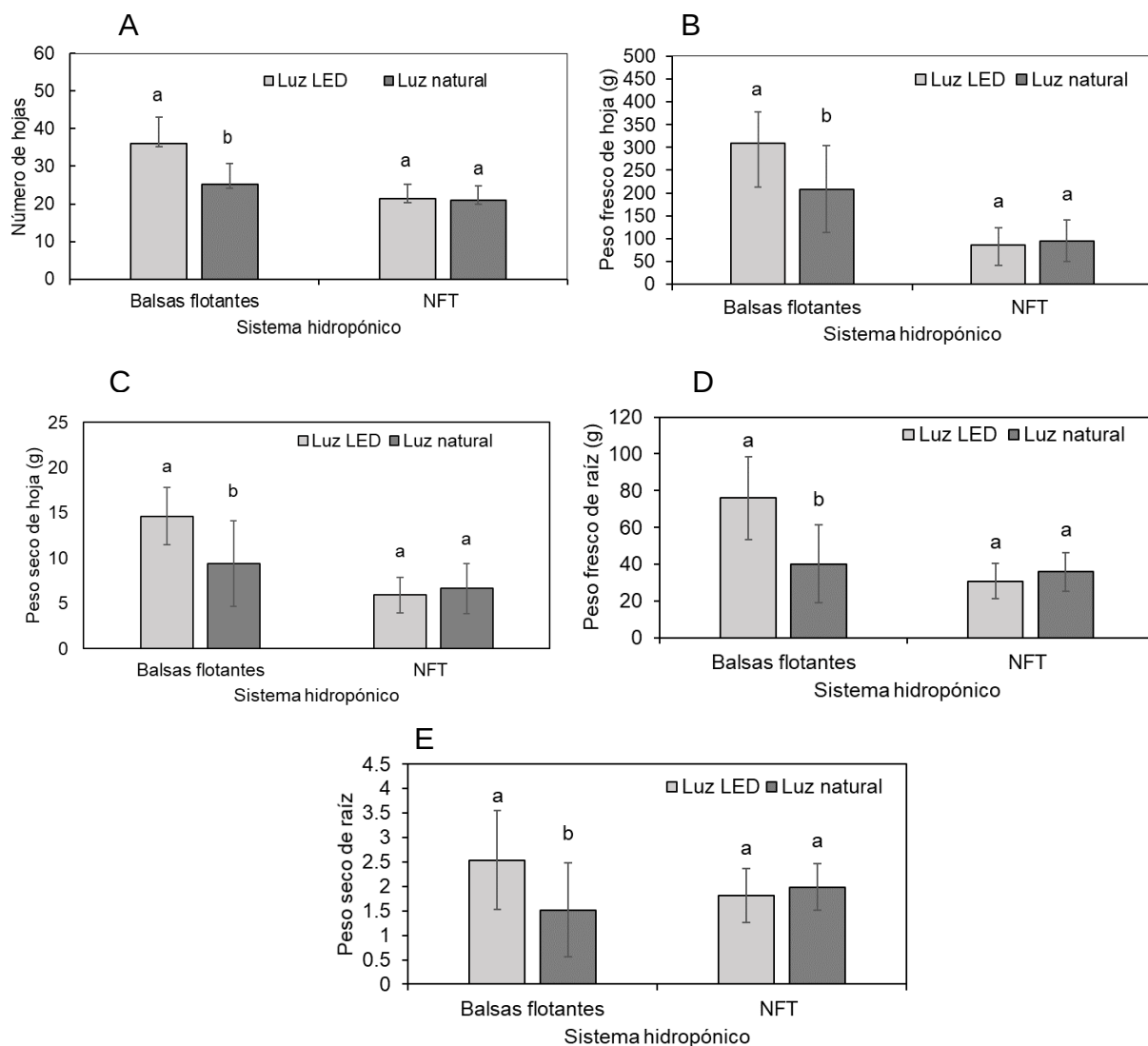


Figura 4. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, en número de hojas (A), peso fresco de hojas (B), peso seco de hojas (C), peso fresco de raíz (D) y peso seco de raíz (E) de lechuga italiana en etapa de producción, en el primer ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico

El primer ciclo de cultivo de planta adulta, otoño-invierno, la longitud de raíz (Figura 5), fue significativamente mayor un 20 % para el tratamiento de balsas flotantes con 1.2 ds m^{-1} . Mientras que, el número de hojas, peso fresco y seco de hoja, raíz y tallo no tuvo significancia estadística ante esta combinación de factores (Apéndice 3 y 4).

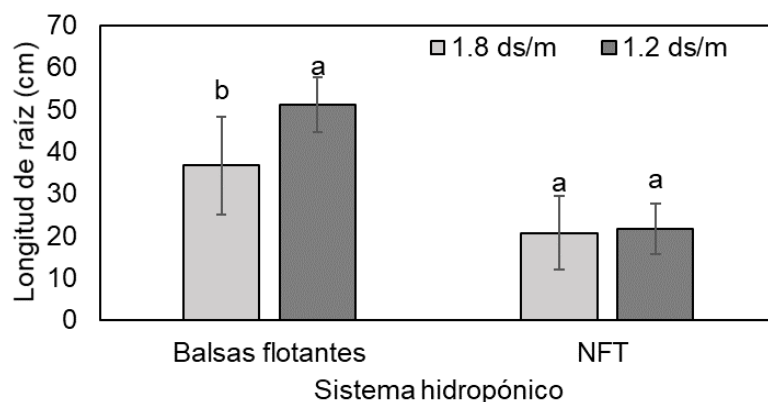


Figura 5. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, en longitud de raíz de lechuga italiana en etapa de producción, durante el primer ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

Durante el primer ciclo de cultivo, el aumento de número de hojas, biomasa de hojas y raíces (Figura 4) en el sistema de balsas flotantes con luz LED, es posible que la mayor solución por planta de este sistema, comparado con el NFT, haya proporcionado una mejor retención de agua y una mayor disponibilidad de nutrientes para las raíces de las plantas, así como una estabilidad en la rizosfera (Moreno-Pérez et al., 2015).

Lo que resultó en un crecimiento más vigoroso y un mayor peso de biomasa fresca y seca de las hojas y las raíces en comparación con el sistema NFT, donde la solución nutritiva fue menos abundante (Moreno-Pérez et al., 2015).

El efecto de conductividad eléctrica por sistema hidropónico durante el primer ciclo de cultivo, el aumento de la longitud de raíz en balsas flotantes con 1.2 dS m^{-1} (Figura 5), se atribuye a un estrés de raíz por falta de nutrimentos disponibles, mismo que ayudó a su crecimiento de hojas y tallo, por ello, en dichos órganos no presentaron una significancia entre soluciones nutritivas (García-Terrazas et al., 2022).

6.3.2 Determinación de clorofilas y carotenoides en lechuga para etapa de producción

Efecto de luz

Durante el primer ciclo de cultivo, para las clorofilas *a*, *b*, total y carotenos no tuvieron diferencia estadística en los tratamientos ante luz natural y luz LED complementaria (Apéndice 9), resultados, congruentes con un estudio donde se utilizó luz LED blanca en plántula de lechuga (Chen et al., 2016).

Efecto de conductividad eléctrica

Únicamente el ciclo 1, la concentración de clorofila *a* y totales, un 50 y 55 % respectivamente, fue significativamente mayor, en los tratamientos con 1.2 ds m⁻¹ (Cuadro 17). Esto es congruente con una investigación, donde trabajaron con una conductividad eléctrica de 1.1 a 1.2 ds m⁻¹ y obtuvieron en todos sus tratamientos una mayor concentración de clorofilas, comparados al testigo (Chen et al., 2016)

Cuadro 17. Comparación de medias para concentración de clorofilas y carotenos en hojas al final del primer ciclo de cultivo de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente conductividad eléctrica en la solución nutritiva.

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total	Carotenoides
		μg g ⁻¹			
1	1.8	0.06 ± 0.05 b	0.02 ± 0.01 a	0.09 ± 0.08 b	20.04 ± 16.1 a
	1.2	0.12 ± 0.04 a	0.04 ± 0.02 a	0.20 ± 0.06 a	28.82 ± 10.3 a
	DMSH	0.03	0.02	0.05	13.66

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ds m⁻¹: decisiemens por metro; CE: conductividad eléctrica.

Efecto del sistema hidropónico

Durante el ciclo 1 de producción, el comportamiento de clorofilas en los sistemas hidropónicos tuvo una significancia únicamente en el primer ciclo de producción, donde las concentraciones de clorofila *a*, *b* y total, fueron superiores en el sistema de balsas flotantes con un 46, 50 y 39 % respectivamente, comparado con el sistema de balsas flotante (Cuadro 18).

Se atribuye a que la planta realizó una mayor tasa de fotosíntesis en el sistema de balsas flotantes, debido a su mayor facilidad de obtener nutrimentos, por tener mayor área de contacto radical en la solución nutritiva (Khoshbakht et al., 2015).

Cuadro 18. Comparación de medias para concentración de clorofilas y carotenos en hojas al final del primer ciclo de cultivo de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente sistema hidropónico.

Ciclo	Sistema	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total
µg g ⁻¹				
1	Balsas flotantes	0.11 ± 0.05 a	0.04 ± 0.01 a	0.18 ± 0.08 a
	NFT	0.06 ± 0.04 b	0.02 ± 0.02 b	0.11 ± 0.08 b
	DMSH	0.03	0.01	0.05

Medias $\pm$ Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

Efecto de luz y sistema hidropónico

El primer ciclo de cultivo de planta adulta, otoño-invierno, las concentraciones de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total y carotenos fueron significativamente iguales ante el efecto de luz y sistema hidropónico (Apéndice 9).

Efecto de la combinación conductividad eléctrica por sistema hidropónico

El primer ciclo de cultivo de planta adulta, otoño-invierno, las concentraciones de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total y carotenos fueron significativamente iguales ante el efecto de luz y sistema hidropónico (Apéndice 9).

La concentración de clorofilas y carotenoides se ve influenciado por el fotoperiodo, mas no a la intensidad luminosa, por lo que durante el primer ciclo de cultivo las plantas no necesitaban luz LED complementaria para poder llevar a cabo los procesos metabólicos para su desarrollo (Lyubov et al., 2023).

6.3.3 Concentración nutrimental en lechuga para etapa de producción

Efecto de luz

La condición de luz, tanto natural como luz led suplementaria en la planta completa de lechuga tipo italiana, durante el ciclo uno, no influyó en la concentración de ningún elemento (Apéndice 9).

Sin embargo, Li y Kubota (2009) obtuvieron lo contrario al aplicar distintas emisiones de luz, durante la etapa de plántula, esto se pudo deber a que no se aplicó la intensidad de luz complementaria suficiente para afectar la absorción de nutrimentos y a que la lechuga es menos fotosensible en etapa de planta en comparación con plántula (Cheng et al., 2016).

Efecto de conductividad eléctrica

En el ciclo 1, la CE de la solución nutritiva, las plantas establecidas con 1.8 ds m^{-1} presentaron 14 % más de nitrógeno, comparadas con la de 1.2 ds m^{-1} (Cuadro 19). Esto se relaciona con la mayor concentración de sales disueltas en la solución nutritiva con 1.8 ds m^{-1} , al menos al inicio del ciclo, por lo que la planta pudo absorber mayor cantidad de nutrientes por mayor disponibilidad (Carrasco et al., 2006).

Cuadro 19. Comparación de medias para concentración de macronutrientes en planta completa al final del primer ciclo de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente conductividad eléctrica en la solución nutritiva.

Ciclo	Conductividad eléctrica (ds m^{-1})	N	K	P
		g kg^{-1}		
1	1.8	$24.8 \pm 4.7 \text{ a}$	$31.6 \pm 7.6 \text{ a}$	$2.1 \pm 0.5 \text{ a}$
	1.2	$21.4 \pm 5.3 \text{ b}$	$30.2 \pm 4.8 \text{ a}$	$1.6 \pm 0.5 \text{ a}$
	DMSH	2.6	5.5	0.7

Medias $\pm$ Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significativo, ds m^{-1} : decisiemens por metro.

Efecto del sistema hidropónico

Durante el primer ciclo de producción, la concentración de N, Ca, Mg, P y S fueron superiores en un 27, 5, 32, 40 y 31 % respectivamente, en el sistema de balsas flotantes (Cuadro 20). Esta significancia se atribuyó a la mayor cantidad de solución nutritiva que había por planta y el área superior de raíz que cubría este volumen de solución, comparado con el sistema NFT (Alcántar-González et al., 2016).

Lo anterior se atribuye a que en el sistema NFT el pH fue superior a 5.5. El calcio a este pH, se precipita y con ello baja la disponibilidad de fósforo, por lo tanto, la disponibilidad de estos elementos para la planta es muy baja o nula (Seo et al., 2009).

Mientras que con el sistema de balsas flotantes no ocurrió esto, su pH oscilaba por debajo de 5.5, así como, la mayor cantidad de agua por planta que tenía el sistema de balsas flotantes ayudó a la estabilización del pH en la solución nutritiva (Moreno-Pérez et al., 2015).

Cuadro 20. Comparación de medias para concentración de macronutrientes en planta completa al final de dos ciclos de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente sistema hidropónico.

Ciclo	Sistema	N	Ca	Mg g kg ⁻¹	P	S
1	Balsas flotantes	26.8 ± 2.5 a	11.0 ± 1.1 a	5.8 ± 0.8 b	2.3 ± 0.4 a	3.9 ± 0.5 a
	NFT	19.5 ± 4.5 b	10.5 ± 1.0 b	8.5 ± 2.3 a	1.4 ± 0.3 b	2.7 ± 0.3 b
	DMSH	5.6	0.3	1.6	0.4	0.6

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns= no significancia; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

Efecto de la combinación conductividad eléctrica por sistema hidropónico

Para el ciclo uno de planta adulta, otoño-invierno, la concentración de magnesio en la planta completa fue significativamente mayor 9 % en NFT con 1.2 ds m⁻¹ comparado con 1.8 ds m⁻¹. En tanto que, para el sistema balsas flotantes la

concentración de Mg fue estadísticamente igual en ambas conductividades (Figura 6).

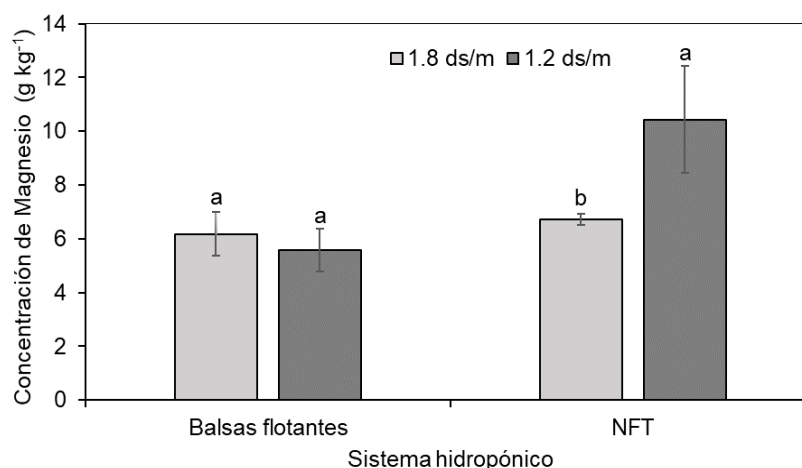


Figura 6. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, para concentración de magnesio en lechuga italiana para etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$)

La mayor concentración de fósforo (Figura 6) en balsas flotantes a 1.8 dS/m (nivel de solución nutritiva fue rellenado con agua), se atribuye a la reducción de competencia iónica entre nutrientes de la solución, lo que puede facilitar la absorción y asimilación de fósforo por parte de las plantas. En condiciones de alta CE, la presencia de otros iones puede dificultar la absorción de fósforo, puesto que el fósforo inorgánico es de movilidad lenta (Alcántar-González et al., 2016).

6.4 Etapa de producción ciclo 2

6.4.1 Morfología de lechuga en etapa de producción ciclo 2

Efecto de luz

Durante el ciclo 2 del cultivo, el peso de biomasa fresca de hojas y tallo; peso seco de hojas, raíz y tallo, no tuvieron diferencia significativa, mientras que el peso fresco de raíz fue la única variable que se vio afectada por el tratamiento tipo de luz, con 13 % más para los tratamientos sometidos a luz LED complementaria (Cuadro 21).

Esto puede deberse a la mayor cantidad de horas luz a la que se sometieron las plantas, éstas evapotranspiran más, por lo que las raíces entraron en estrés y tuvieron que acumular mayor cantidad de agua para tener una reserva (Tambussi, 2005).

Cuadro 21. Comparación de medias para peso de biomasa fresca en raíz, al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, con diferentes tratamientos de luz.

Ciclo	Luz	Peso de biomasa fresca (g)
		Raíz
2	LED C	29.4±20.6 a
	Natural	25.7±18.3 b
	DMSH	2.1

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; LED C: Luz natural + LED complementaria.

Efecto de conductividad eléctrica

Para el ciclo 2 de cultivo, el número de hojas, área foliar, longitud de raíz, peso de biomasa fresca y seca de hoja, raíz y tallo, presentaron una diferencia significativa entre tratamientos de conductividad con un 41, 57, 53, 71, 72, 72, 74, 46, 78 % mayor, en orden de referencia, para la conductividad de 1.2 ds m⁻¹ (Cuadro 22, Cuadro 23 y Cuadro 24).

Esto se relaciona con la concentración de sales disponibles para la planta. La CE de 1.2 ds m⁻¹ al cabo de este segundo ciclo, terminó con mayor concentración de sales comparada con la CE de 1.8 ds m⁻¹ (Apéndice 12), por lo que las plantas tuvieron mayor cantidad de nutrimentos disponibles para su desarrollo (Samarakoon et al., 2006).

Cuadro 22. Comparación de medias para variables morfológicas al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.

Ciclo	CE (ds m ⁻¹)	Número de hojas	Área foliar (cm ²)	Longitud de raíz (cm)
2	1.8	12.0 ± 4.1 b	64.4 ± 38.0 b	24.3±19.4 b
	1.2	20.4 ± 4.3 a	150.3 ± 31.8 a	53.0±03 a
	DMSH	2.8	19.3	7.3

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significativo; ds m⁻¹: decisiemens por metro, CE; conductividad eléctrica.

Cuadro 23. Comparación de medias para peso de biomasa fresca al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.

Ciclo	Conductividad eléctrica (ds m ⁻¹)	Peso de biomasa fresca (g)		
		Hojas	Raíz	Tallo
2	1.8	20.3 ± 13.1 b	11.6 ± 6.5 b	2.3 ± 0.9 b
	1.2	70.4 ± 19.7 a	43.4 ± 14.4 a	8.3 ± 3.4 a
	DMSH	10.1	4.5	1.7

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ds m⁻¹: decisiemens por metro; CE: conductividad eléctrica.

Cuadro 24. Comparación de medias para peso de biomasa seca al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes tratamientos de conductividad eléctrica.

Ciclo	Conductividad eléctrica (ds m ⁻¹)	Peso de biomasa seca (g)		
		Hojas	Raíz	Tallo
2	1.8	1.9 ± 1.2 b	1.4 ± 1.2 b	0.2 ± 0.1 b
	1.2	7.2 ± 2.0 a	2.6 ± 0.7 a	0.9 ± 0.4 a
	DMSH	1.0	0.6	0.1

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ds m⁻¹: decisiemens por metro; CE: conductividad eléctrica.

Efecto de sistema hidropónico

El segundo ciclo el número de hojas fue mayor un 13 % en el sistema de balsas flotantes. En contraparte, el área foliar y la longitud de raíz fue mayor un 48 y 21 %, en orden de mención, para el sistema NFT (Cuadro 25). Por el contrario, la biomasa fresca de hoja, raíz y tallo no tuvieron significancia (Apéndice 3)

En el segundo ciclo de producción, al tener condiciones ambientales menos favorables para su desarrollo y mayor dificultad para absorber los nutrimentos por la dilución de la solución nutritiva, esto comparado con el primer ciclo productivo, la planta pudo desarrollar un mecanismo de sobrevivencia, por lo que desarrolló en mayor proporción longitud de hoja y raíz (Brenes & Jiménez, 2018).

Cuadro 25. Comparación de medias para variables morfológicas al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Ciclo	Sistema	Número de hojas	Área foliar (cm ²)	Longitud de raíz (cm)
2	Balsas flotantes	17.3 ± 6.8 a	26.3 ± 17.5 b	94.8±59.3 b
	NFT	15.1 ± 4.6 b	51.0 ± 17.7 a	120.0±49.1 a
	DMSH	1.9	4.0	15.3

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

Para el segundo ciclo de cultivo el peso de biomasa seca en hoja y raíz fue mayor en 40 y 33 %, con balsas flotantes, por el contrario, el peso de biomasa seca de tallo no tuvo significancia en los tratamientos bajo balsas flotantes y NFT (Cuadro 26).

La planta en el sistema de raíz profunda tiene mayor facilidad de obtener sus alimentos al contener mayor superficie radical dentro de la solución nutritiva comparado con el sistema NFT, por lo que la mayor cantidad es aprovechada para la ganancia de biomasa (Lara-Herrera, 1999).

Cuadro 26. Comparación de medias para peso de biomasa seca al final del segundo ciclo de cultivo en lechuga tipo italiana, durante otoño invierno, durante otoño-invierno, bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Ciclo	Sistema	Peso de biomasa seca (g)		
		Hoja	Raíz	Tallo
2	Balsas flotantes	5.4 ± 3.08 a	2.4 ± 0.6 a	0.6 ± 0.6 a
	NFT	3.8 ± 3.08 b	1.6 ± 1.4 b	0.6 ± 0.3 a
	DMSH	0.7	0.5	0.1

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significancia; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

Efecto de combinación luz y sistema hidropónico

El segundo ciclo de cultivo de planta adulta, el peso de biomasa fresca de tallo (Figura 7A) y peso de biomasa seca de tallo (Figura 7B) fueron estadísticamente mayor en 42 y 40 % los tratamientos con luz LED complementaria bajo un sistema de NFT.

Por otro lado, el peso seco de hoja en el sistema de balsas flotantes fue significativamente mayor un 16 % en las plantas con luz natural, mientras que, en el sistema NFT fueron estadísticamente superior un 18 % para la misma variable, en las plantas sometidas a luz LED complementaria. En contraparte el número de hojas, longitud de raíz, peso fresco de hoja, peso fresco de raíz, peso seco de raíz y área foliar, no fueron estadísticamente diferentes (Apéndice 5 y 6).

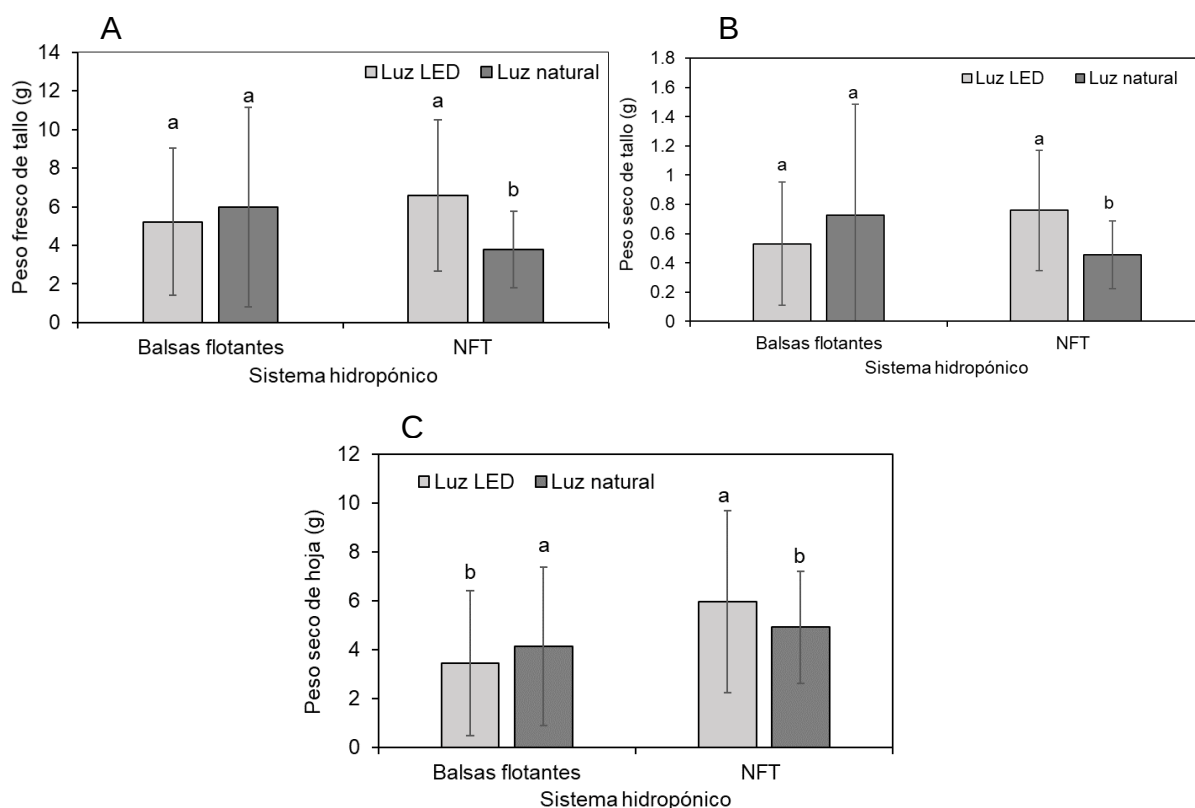


Figura 7. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, peso fresco de tallo (A), peso seco de tallo (B) y peso seco de hoja (C) de lechuga italiana en etapa de producción, en el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico

En el segundo ciclo de cultivo de planta adulta, el número de hojas (Figura 8A), longitud de raíz (Figura 8B), peso biomasa fresca de raíz (Figura 8C) y peso fresco de tallo (Figura 8E) fueron significativamente mayor un 52, 37, 87 y 79 % respectivamente, en balsas flotantes y un 30, 79, 52 y 63 % en orden de mención para éstas mismas variables en el sistema NFT con 1.2 ds m^{-1} comparado con 1.8 ds m^{-1} .

Por otro lado, el peso seco de raíz fue estadísticamente superior un 69 % con 1.2 ds m^{-1} en el sistema de balsas flotantes, mientras que para el sistema NFT, el peso seco de raíz fue estadísticamente igual con 1.2 ds m^{-1} y 1.8 ds m^{-1} . En contraparte el peso fresco y seco de hoja, peso seco de tallo y área foliar, no fueron significativos estadísticamente (Apéndice 5 y 6).

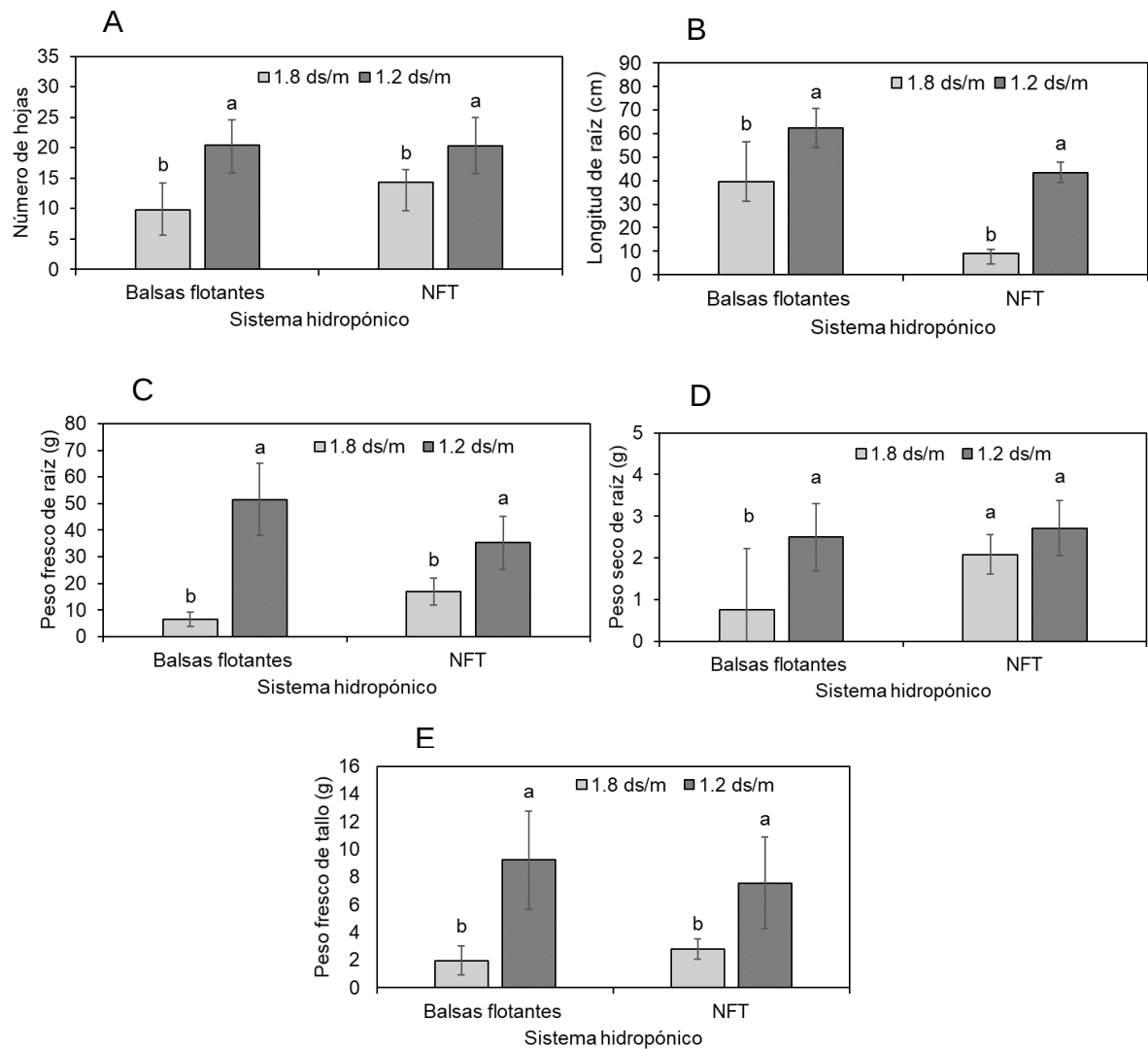


Figura 8. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, en número de hojas (A), longitud de raíz (B), peso fresco de raíz (C), peso seco de raíz (D) y peso fresco de tallo (E) de lechuga italiana en etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

El aumento de peso de biomasa fresca y seca de tallo en el sistema NFT (Figura 7), se atribuye al descenso de temperatura en invierno (Apéndice 11), lo que pudo haber permitido un mejor control de temperatura en la solución, traduciéndose a mayor desarrollo de tallo, asociado a que en este sistema se absorbió mayor

cantidad de fósforo, comparado con el sistema de NFT, lo que estimula el desarrollo de tallo (Veneklaas et al., 2012).

El número de hojas, longitud de raíz, peso de biomasa fresca de raíz y tallo (Figura 8) fueron superiores con 1.2 dS m⁻¹ en ambos sistemas hidropónicos por la mayor concentración de nutrimentos que tenía la planta en la solución nutritiva, en este segundo ciclo de producción (Brenes & Jiménez, 2018).

6.4.2 Determinación de clorofilas y carotenoides para etapa de producción ciclo 2

Efecto de luz

En el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno, la concentración de carotenoides fue mayor en 36 % para los tratamientos sometidos a luz LED complementaria, homológamente ocurrió con la clorofila *a*, *b* y total, donde no se encontró alguna diferencia significativa (Cuadro 27), datos que concuerdan con lo que mencionaron Lin et al (2013).

La luz LED blanca tiene espectros de color rojo y azul, las cuales representan ondas de longitud que producen máxima acción en los pigmentos vegetales. La luz roja estimula el aparato fotosintético y la luz azul promueve la apertura estomática, ganando más CO₂, el cual es el sustrato de la fotosíntesis, promoviendo su eficiencia (Chen, et al., 2016).

Cuadro 27. Comparación de medias para concentración de clorofilas y carotenos en hojas al final del segundo ciclo de cultivo de lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferentes tratamientos de luz.

Ciclo	Luz	Carotenoides
		µg g ⁻¹
2	LED C	60.9 ± 19.5 a
	Natural	49.8 ± 9.5 b
	DMSH	10.249

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; LED C: Luz natural + LED complementaria.

Efecto de conductividad eléctrica

En el ciclo dos de etapa de producción la concentración de clorofila *a*, *b* y total en la planta no presentó significancia estadística ante el cambio de conductividad eléctrica (Apéndice 9)

Efecto del sistema hidropónico

En el ciclo dos de etapa de producción la concentración de clorofila *a*, *b* y total en la planta no presentó significancia estadística ante el cambio de sistema hidropónico (Apéndice 9)

Efecto de luz y sistema hidropónico

El segundo ciclo de cultivo de planta adulta, las concentraciones de clorofila *a* (Figura 9A), clorofila *b* (Figura 9B) y clorofila total (Figura 9C) fueron significativamente mayor un 77, 27 y 29 % respectivamente, para los tratamientos en balsas flotantes sometidas a luz LED complementaria, por el contrario, el tipo de luz en plantas bajo el sistema NFT no influyó significativamente. En contraparte la concentración de carotenos no tuvo significancia estadística ante la combinación de luz por sistema hidropónico (Apéndice 10).

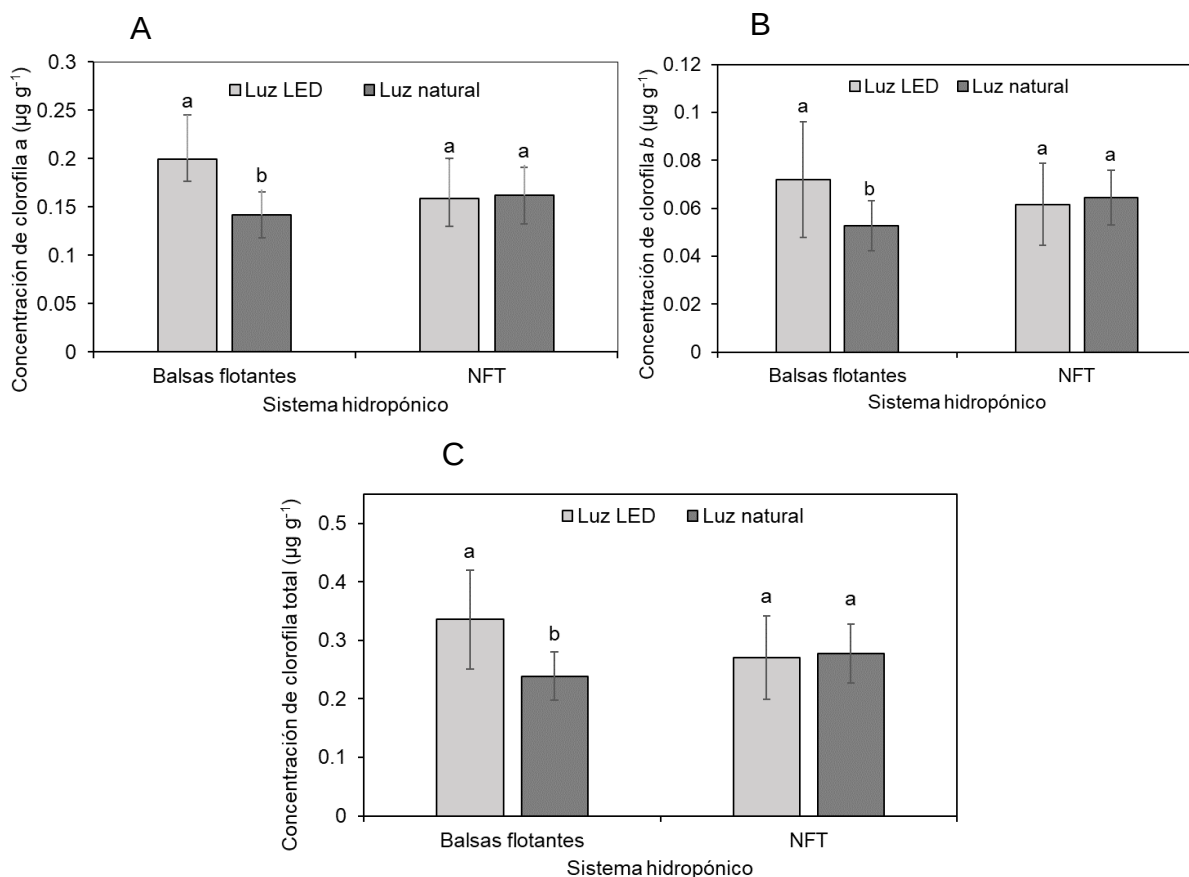


Figura 9. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, en concentración de clorofila *a* (A), concentración de clorofila *b* (B) y concentración de clorofila total (C) de lechuga italiana en etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

Efecto de la combinación conductividad eléctrica por sistema hidropónico

El segundo ciclo de cultivo de planta adulta, las concentraciones de clorofila *a* (Figura 10A), clorofila *b* (Figura 10B), clorofila total (Figura 10C) y carotenos (Figura 10D) fueron significativamente mayor un 22, 32, 24 y 33 % en orden de mención, para los tratamientos de balsas flotantes con 1.2 ds m^{-1} , por el contrario, la CE en plantas bajo el sistema NFT no influyó significativamente.

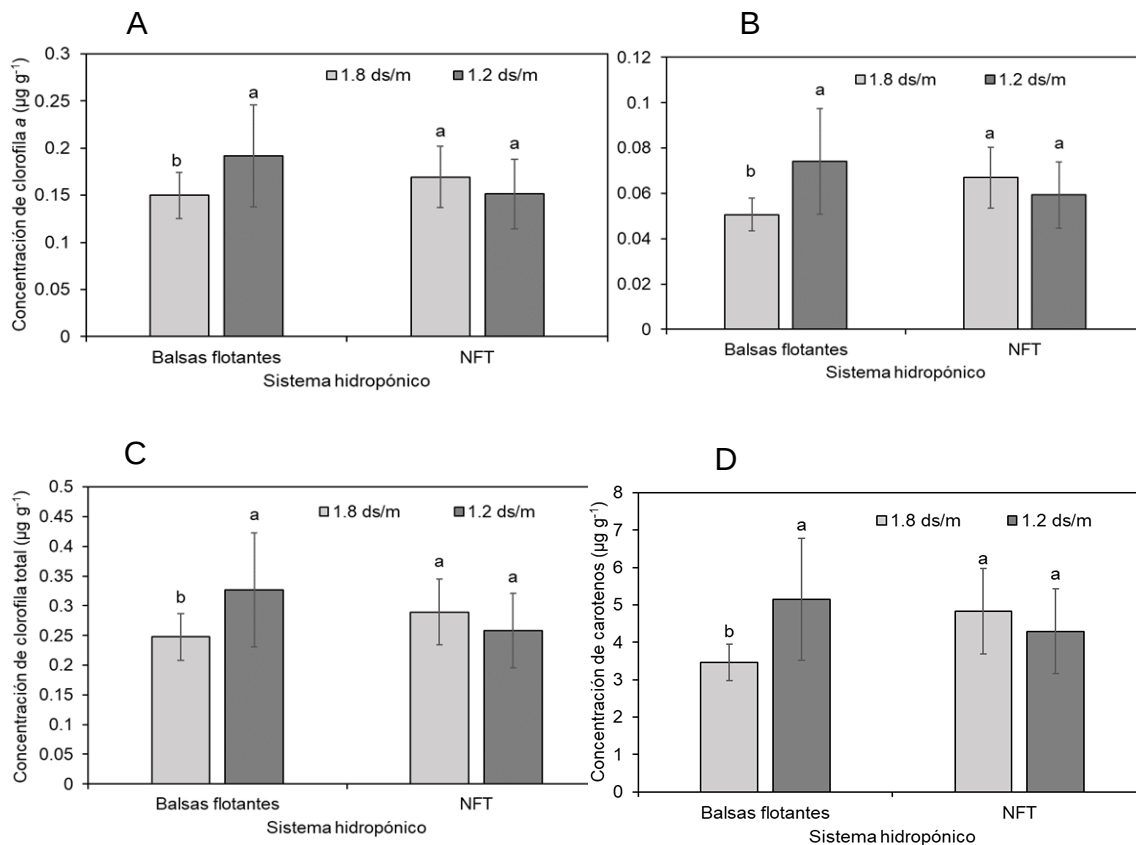


Figura 10. Efecto de combinación luz y sistema hidropónico, en concentración de clorofila a (A), concentración de clorofila b (B), concentración de clorofila total (C) y concentración de carotenos (D) de lechuga italiana en etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

En el segundo ciclo de cultivo, la superioridad del sistema de balsas flotantes, respecto al sistema NFT, en la concentración de clorofila a, b, total y carotenos, con luz LED complementaria (Figura 9), se atribuye a la menor radiación solar de los días de invierno (Lyubov et al., 2023).

La conductividad eléctrica de una solución nutritiva está relacionada con la concentración de nutrimentos disueltos en ella. Por lo tanto, una conductividad eléctrica óptima proporciona los nutrientes necesarios para la producción de pigmentos fotosintéticos.

En el caso de la Figura 10, la mayor disponibilidad de nutrimentos abastecido por el sistema de balsas flotantes en comparación del NFT y la incorporación de

minerales al reponer el nivel de solución, traducen a una superior concentración de clorofila *a*, *b*, total y carotenos (Nguyen et al., 2018).

6.4.3 Concentración nutrimental en lechuga para etapa de producción ciclo 2

Efecto de luz

Durante el segundo ciclo de producción de lechuga los tipos de luz no presentó diferencia significativa en la concentración de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre (Apéndice 9)

Efecto de conductividad eléctrica

Durante el segundo ciclo de cultivo la concentración de potasio fue mayor un 14 % para las plantas sometidas a una CE de 1.2 ds m⁻¹, mientras que para fósforo la absorción fue 70 % mayor en la CE de 1.8 ds m⁻¹(Cuadro 28), cabe señalar que esto también se ve reflejado en la concentración de nutrimentos de la solución, apéndice 10. Todo esto se atribuye a el transporte pasivo por el cual se mueven los nutrimentos mencionados, su transporte por difusión permite ir de mayor a menor concentración (Lara-Herrera, 1999).

Cuadro 28. Comparación de medias para concentración de macroelementos en planta completa al final del segundo ciclo de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente conductividad eléctrica en la solución nutritiva.

Ciclo	Conductividad eléctrica (ds m ⁻¹)	N	K	P
		g kg ⁻¹		
2	1.8	30.4 ± 8.1	22.2 ± 3.0 b	2.7 ± 1.4 a
	1.2	29.1 ± 4.2	25.8 ± 0.6 a	0.8 ± 0.08 b
	DMSH	10.2	2.9	1.1

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns: no significativo, ds m⁻¹: decisiemens por metro.

Efecto del sistema hidropónico

Para el segundo ciclo de cultivo, calcio y fósforo, tuvieron una concentración significativamente mayor del 16 y 48 % en el sistema de balsas flotantes, mientras

que los demás nutrimentos no tuvieron alguna diferencia significativa entre sistemas (Cuadro 29).

Lo anterior se atribuye a que en el sistema NFT el pH fue superior a 5.5. El calcio a este pH, se precipita y con ello baja la disponibilidad de fósforo, por lo tanto, la disponibilidad de estos elementos para la planta es muy baja o nula (Seo et al., 2009).

Mientras que con el sistema de balsas flotantes no ocurrió esto, su pH oscilaba por debajo de 5.5, así como, la mayor cantidad de agua por planta que tenía el sistema de balsas flotantes ayudó a la estabilización del pH en la solución nutritiva (Moreno-Pérez et al., 2015).

Cuadro 29. Comparación de medias para concentración de macronutrientes en planta completa al final de dos ciclos de producción con lechuga tipo italiana, durante otoño-invierno, bajo diferente sistema hidropónico.

Ciclo	Sistema	N	Ca	Mg g kg ⁻¹	P	S
2	Balsas flotantes	32.2 ± 8.2	7.6 ± 1.1 a	15.0 ± 14.7	2.3 ± 1.8 a	2.3 ± 0.4
	NFT	27.3 ± 2.3	6.4 ± 0.2 b	21.7 ± 10.0	1.2 ± 0.4 b	1.9 ± 0.1
	DMSH		0.8		0.7	

Medias ± Desviación estándar; letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$); DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; ns= no significancia; NFT: Nutrient Film Technique (por sus siglas en inglés).

Efecto de la combinación conductividad eléctrica por sistema hidropónico

El ciclo dos de planta adulta, otoño-invierno, la concentración de fósforo en la planta completa fue estadísticamente mayor en 79 % en balsas flotantes con 1.8 ds m⁻¹ comparado con 1.2 ds m⁻¹. Por el contrario, el sistema NFT no fue significativo en plantas con 1.8 y 1.2 ds m⁻¹ en balsas flotantes (Figura 11).

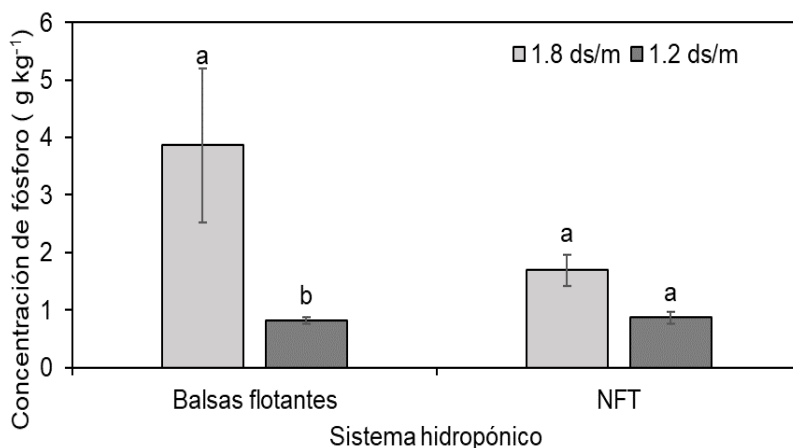


Figura 11. Efecto de combinación conductividad eléctrica y sistema hidropónico, para concentración de fósforo en lechuga italiana para etapa de producción, durante el segundo ciclo de cultivo, otoño-invierno. Medias $\pm$ DE con letras distintas en cada variable, indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$).

La mayor concentración de fosforo (Figura 11) en balsas flotantes a 1.8 dS/m (nivel de solución nutritiva fue rellenado con agua), se atribuye a la reducción de competencia iónica entre nutrientes de la solución, lo que puede facilitar la absorción y asimilación de fósforo por parte de las plantas. En condiciones de alta CE, la presencia de otros iones puede dificultar la absorción de fósforo, puesto que el fosforo inorgánico es de movilidad lenta (Alcántar-González et al., 2016).

7 Conclusiones

Etapa de plántula

La luz natural en otoño, es suficiente para el desarrollo y crecimiento de plántula de lechuga, tipo italiana, variedad starfigther. Por el contrario, en temporadas invernales, el uso de lámparas LED blancas son una buena opción para la producción de plántula, sin embargo, se recomienda complementar con lámparas de color azul y rojo.

La conductividad eléctrica de 1.2 aumentó el vigor de plántula para el ciclo desarrollado en otoño, contrariamente en invierno, la conductividad más alta (1.8 dS m⁻¹) implicó un mejor desarrollo de raíz, hoja y tallo en plántula de lechuga.

Por lo que se recomienda que, en la producción de plántula, a baja temperatura y radiación se realicen riegos con mayor conductividad eléctrica y viceversa.

Etapas de producción

Las plantas tuvieron mejor crecimiento y desarrollo en el sistema de balsas flotantes, reflejándose en la ganancia de biomasa. Así como la luz artificial tuvo efecto sobre el desarrollo de la planta, permitiendo una mayor precocidad, contenido de pigmentos, ganancia de biomasa y absorción nutrimental con relación a las plantas con iluminación natural.

La solución nutritiva que alcanzó y dio resultados superiores en el crecimiento de planta, concentración de clorofilas y carotenoides, para dos ciclos de cultivo, fue donde se inició con una conductividad baja y el agua evapotranspirada se repuso diariamente con la misma solución

8 Literatura citada

- Avendaño-Abarca, V. H., González-Sandoval, D. C., Munguía-López, J. P., Hernández-Cuevas, R., Luna-Maldonado, A. I., Vidales-Contreras, J. A., ... & Rodríguez-Fuentes, H. (2020). Crecimiento y absorción total nutrimental de lechuga romana tipo baby cultivada con iluminación led bajo sistema fábrica de plantas. *ITEA-Inf. Tec. Econ. Agrar.* (en prensa), 166(4), 1-14.
- Alcántar-González, G., Trejo-Telléz, L. I. y Gómez-Merino, F.C. (2016). *Nutrición de cultivos*. Segunda edición. Colegio de postgraduados.
- Brenes, L. P., & Jiménez, M. F. (2014). Manual de producción hidropónica para hortalizas de hoja en sistemas NFT (Nutrient Film Technique).
- Cárdenas, C. M. (2004). *Determinación de los efectos en rendimiento de la producción de lechuga hidropónica y convencional en condiciones de El Zamorano, Honduras*.
- Carrasco, G., Tapia, J., & Urrestarazu, M. (2006). Contenido de nitratos en lechugas cultivadas en sistemas hidropónicos. *Idesia (Arica)*, 24(1), 25-30.
- Carrasco, G. & Urrestarazu, M. (2004). Manual de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. p. 541-554.
- Carotti, L., Potente, G., Pennisi, G., Ruiz, K. B., Biondi, S., Crepaldi, A., ... & Antognoni, F. (2021). Pulsed LED Light: Exploring the Balance between Energy Use and Nutraceutical Properties in Indoor-Grown Lettuce. *Agronomy*, 11(6), 1106.
- Cepeda-Guzmán, A., Valdez-Aguila, L. A., Castillo-González, A. M., Ruiz-Torres, N. A., Robledo-Torres, V., & Mendoza-Villarreal, R. (2014). Respuestas de lechuga a la conductividad eléctrica con riego superficial y subirrigación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(7), 1233-1245.
- Chang, C. L., & Chang, K. P. (2014). The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple wavelength-band light-emitting diode lighting. *Scientia Horticulturae*, 179, 78-84.
- Chen, X. L., Xue, X. Z., Guo, W. Z., Wang, L. C., & Qiao, X. J. (2016). Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode. *Scientia Horticulturae*, 200, 111-118.
- García-Terrazas, M. I., Carrillo, I. E. S., Mina, R. H., & Aldaco, O. S. (2022). Impacto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en la biomasa, pigmentos fotosintéticos y compuestos nitrogenados en lechuga. *Biotechnia*, 24(3), 115-122.
- Hounsome, N., Hounsome, B., Tomos, D., & Edwards-Jones, G. (2008). Plant metabolites and nutritional quality of vegetables. *Journal of Food Science*, 73(4), R48-R65.

- Jiménez-Pérez, L. (2016). Efecto de la intensidad lumínica de lámparas LED en la producción de lechuga (*Lactuca sativa*). *Facultad de Educación Técnica Para el Desarrollo—d Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*.
- Khoshbakht, D., Ramin, A.A. & Baninasab, B. 2015. Effects of sodium chloride stress on gas exchange, chlorophyll content and nutrient concentrations of nine citrus rootstocks. *Photosynthetica*. 53 ,241-249.
- Lang, C. A. (1958). Simple microdetermination of Kjeldahl nitrogen in biological materials. *Analytical Chemistry*. 30(10), 1692-1694.
- Lara-Herrera, A. L. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 221-229.
- Li Q. & Kubota C. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Elsevier Reserch*, 67(1), 59-64.
- Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 603
- Lin, K. H., Huang, M. Y., Huang, W. D., Hsu, M. H., Yang, Z. W. & Yang, C. M. 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). *Scientia Horticulturae*, 150: 86-91.
- Lyubov, Y., Ekaterina, S., Ekaterina, G., Maxim, M., Yuriy Z., Alyona... & Sukhov, V. (2023). Effect of Duration of LED Lighting on Growth, Photosynthesis and Respiration in Lettuce. *MDPI Journals*, 12 (3), 442.
- Mohammed, S. B., & Sookoo, R. (2016). Nutrient film technique for commercial production. *Agricultural Science Research Journal*, 6(11), 269-274.
- Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-Del Castillo, F., Gutiérrez-Tlaque, J., González-Molina, L. & Pineda-Pineda, J. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 21(1), 43-55.
- Meng, X., Bai, S., Wang, S., Pan. Y., Chen, K., Xie... M., Guo, S. (2023). The sensitivity of photosynthesis to magnesium deficiency differs between rice (*Oryza sativa* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Plant Sci*. 14.
- National Aeronautics and Space Administration. (mayo, 2023). *POWER Data Access Viewer*. Agroclimatology. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nguyen, V. Q., Wantana, S., Supharat, C., Kriangsuk, B. & Kaewduangta, W. (2018). Effects of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on growth, yield and quality of lettuce under vertical hydroponic systems. *Khon kaen Agr. J*. 46 (3), 613-622.

- Pinho, P., Jokinen, K., & Halonen, L. (2017). The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. *Lighting Research & Technology*. 49(7), 866-881.
- Pequerul, A., Pérez, C., Madero, P., Val, J., & Monge, E. (1993). *Un método rápido de digestión húmeda para el análisis de plantas*. En *Optimización de la nutrición vegetal* (pp. 3-6). Springer, Dordrecht.
- Pérez-Reategui, F. I., & Pérez-Reategui, U. F. (2016). Aplicación de software para controlar el balance de la solución nutritiva de un sistema cultivo de lechuga (*Lactuca Sativa*) bajo técnica de hidroponía automatizada a raíz del monitoreo de nitrógeno, PH y conductividad eléctrica en Pucallpa.
- Rodríguez, A., Chang, M., Hoyos, M. 2002. Soluciones nutritivas en hidroponía, Mekanobooks.
- Rojas-Velázquez, Á. N., Valdez-Aguilar, L. A., Ruiz-Posadas, L. D. M., Sandoval-Villa, M., & Bertolini, V. (2013). Respuestas de *Antirrhinum majus* (L.) para flor de corte al potencial osmótico de la solución nutritiva en dos estaciones de crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(8), 1151-1160.
- Santos Filho, B. G., Lobato, A. K. S., Silva, R. B., Schmidt, D., Costa, R. C. L., Alves, G. A. R., & Neto, C. O. (2009). Growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in protected cultivation and open field. *Journal of Applied Sciences Research*, 5(5), 529-533.
- Samarakoon, U. C., Weerasinghe, P. A., & Weerakkody, W. A. P. (2006). Effect of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on nutrient uptake, growth and yield of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in stationary culture. *Tropical Agricultural Reserch*, 18(13), 13-21.
- Seo, M.W., Yang, D.S., Kays, S.J., Kim, J.H., Woo, J.H. & Park, K.W. (2009). Effects of the electrical conductivity of the nutrient solution and the concentration of sulfur, magnesium and phosphorus on sesquiterpene lactones in lettuce grown hydroponically (*Lactuca sativa* L.). *Scientia horticulturae*, 122 (3), 369-374.
- SIAP, Servicio de información agroalimentaria y pesquera (2020). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola en México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP, Servicio de información agroalimentaria y pesquera (2021). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola en México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Steiner, AA. 1984. The universal nutrient solution. Sixth international congress on soilless culture, Lunteren, Netherlands. *International Society for Soilless Culture (ISOSC)*. Wageningen, Holanda. p. 633-649.
- Tambussi, E. A. (2005). Fotosíntesis, fotoprotección, productividad y estrés abiótico: algunos casos de estudio. Universitat de Barcelona.

- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (7ª Edição). Artmed Editora.
- Urrestarazu, G. M. (2015). Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía. Ediciones Paraninfo, SA.
- Veneklaas, E. J., Lambers, H., Bragg, J., Finnegan, P. M., Lovelock, C.E., Plaxton, W. C., Price, C. A., Scheible... & Raven, J. A (2012). Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist Foundation*, 195 (2).
- Zheng, L., & Van Labeke, M. C. (2017). Chrysanthemum morphology, photosynthetic efficiency and antioxidant capacity are differentially modified by light quality. *Journal of Plant Physiology*, 213, 66-74.

Apéndice 1. Variables morfológicas, al final de la etapa de plántula, de lechuga tipo italiana, en el primer ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	gl	Número de hojas	Hoja más grande (cm)		Longitud de raíz (cm)	Área foliar (cm ²)	Peso de biomasa fresca (g)		Peso de biomasa seca (g)	
			Longitud	Ancho			Raíz	Hoja	Raíz	Hoja
LUZ	1	0.6 ns	33.1 **	3.7 **	47.3 **	3004.3 **	0.1 ns	5.8 **	0.0013 ns	0.046 **
BLOQ	9	0.4 ns	1.8 ns	0.1 ns	2.1 ns	54.5 ns	0.0 ns	0.2 ns	0.0004 ns	0.002 ns
Ea	9	0.3	0.8	0.4	2.3	48.6	0.0	0.1	0.0003	0.003
CONC	1	18.2 **	15.9 **	0.3 ns	16.3 ns	1094.3 **	0.1 ns	2.7 **	0.0027 **	0.048 **
LUZ*CONC	1	4.2 **	4.1 **	0.3 ns	23.3 ns	1274.0 **	0.0 ns	2.5 **	0.0001 ns	0.017 **
Error	18	0.6	0.8	0.4	4.3	65.1	0.0	0.2	0.0004	0.003
TOTAL	39									
CV		19.2	15.3	16.0	21.4	31.6	26.6	31.4	33.9	0.1

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 2. Variables morfológicas, al final de la etapa de plántula, de lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	gl	Número de hojas	Hoja más grande (cm)		Área foliar (cm ²)	Peso de biomasa fresca (g)		
			Longitud	Ancho		Tallo	Raíz	Hoja
LUZ	1	19.6 **	129.60 **	24.03 **	10905.85 **	2.65 **	3.60 **	36.67 **
BLOQ	9	1.0 ns	8.97 ns	5.97 **	453.58 ns	0.01 ns	0.73 ns	1.97 ns
Ea	9	1.3	5.25	1.78	531.68	0.01	0.55	1.53
CONC	1	14.4 **	105.63 **	57.60 **	12554.97 **	0.27 **	1.16 ns	29.07 **
LUZ*CONC	1	1.6 ns	22.50 ns	16.90 ns	2261.41 **	0.27 **	0.06 ns	0.51 ns
Error	18	0.7	5.40	4.96	354.68	0.01	0.99	0.69
TOTAL	39							
CV		14.1	24.78	38.56	30.42	40.99	76.45	24.12
FV	gl	Peso de biomasa seca (g)						
		Tallo	Raíz	Hoja				
LUZ	1	0.004 **	0.006 ns	0.086 **				
	9	0.0001	0.003 ns	0.002 ns				
BLOQ		ns						
Ea	9	0.0001	0.002	0.014				
	1	0.001 **	0.00003	0.199 **				
CONC			ns					
LUZ*CONC	1	0.001 **	0.006 ns	0.014 ns				
Error	18	0.000	0.002	0.005				
TOTAL	39							
CV		111.51	62.78	28.57				

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 3. Numero de hojas, longitud de raíz, peso de biomasa fresca de hojas, raíz y tallo, al final de la etapa de producción, de lechuga tipo italiana, en el primero ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	GL	No. de	Longitud	Peso de biomasa fresca (g)						
		hojas	de raíz	Hojas		Raíz		Tallo		
BLOQ	3	26.4 ns	87.2 ns	6903.6 ns	161.0 ns	92.8 ns				
LUZ	1	511.8 ns	17.1 ns	34031.0 ns	3802.2 ns	179.0 ns				
Ea	3	53.1	176.3	16502.0	847.4	282.6				
CONC	1	23.7 ns	949.4 **	2530.0 ns	859.2 ns	15.75 ns				
LUZ*CONC	1	6.8 ns	83.0 ns	485.1 ns	3.2 ns	0.2 ns				
Eb	6	25.3	85.4	6428.0	621.3	197.4				
SIST	1	1453.5 **	8265.0 **	454107.5 **	9758.97 **	4449.7 **				
LUZ*SIST	1	435.7 **	59.4 ns	47917.2 **	6607.6 **	540.8 **				
CONC*SIST	1	0.7 ns	733.7 **	144.6 ns	214.2 ns	280.3 ns				
LUZ*CONC*SIST	1	54.3 ns	348.2 **	3825.4 ns	787.5 ns	0.9 ns				
Ec	44	25.7	56.5	3220.6	198.2	69.2				
TOTAL	63									
CV		19.5	23.1	32.45	30.8057	42.6				

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 4. Área foliar, peso de biomasa seca de hoja, raíz y tallo, al final de la etapa de producción, de lechuga tipo italiana, en el primero ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	GL	Peso de biomasa seca (g)						Área foliar	
		Hoja		Raíz		Tallo			
BLOQ	3	18.30	ns	0.81	ns	0.28	ns	18398.22	ns
LUZ	1	81.11	ns	2.81	ns	0.72	ns	44588.92	ns
Ea	3	33.90		1.12		0.69		8095.92	
CONC	1	27.26	ns	0.80	ns	0.58	ns	13773.52	ns
LUZ*CONC	1	1.61	ns	0.06	ns	0.02	ns	20155.59	ns
Eb	6	11.07		0.68		0.35		12086.51	
SIST	1	528.37	**	0.28	ns	9.20	**	659254.89	**
LUZ*SIST	1	140.45	**	5.77	**	2.45	ns	4711.91	ns
CONC*SIST	1	3.42	ns	0.08	ns	2.44	ns	2385.33	ns
LUZ*CONC*SIST	1	20.53	ns	5.20	**	1.49	ns	1023.06	ns
Ec	44	8.71		0.48		0.64		9413.13	
TOTAL	63								
CV		32.22		35.21		53.86		31.28	

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 5. Numero de hojas, longitud de raíz y área foliar, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	GL	No. de hojas	Longitud de raíz	Área foliar
BLOQ	3	14.3 ns	134.0 ns	4755.7 ns
LUZ	1	9.0 ns	464.9 ns	241.1 ns
Ea	3	21.8	70.1	1145.0
CONC	1	1122.3 **	13181.9 **	118128.2 **
LUZ*CONC	1	6.3 ns	353.9 ns	1203.0 ns
Eb	6	21.1	146.1	1004.4
SIST	1	76.6 **	9788.6 **	10173.4 **
LUZ*SIST	1	76.6 **	242.2 ns	379.7 ns
CONC*SIST	1	85.6 **	514.7 **	54.1 ns
LUZ*CONC*SIST	1	18.1 ns	317.3 **	184.4 ns
Ec	44	13.5	63.4	916.9
TOTAL	63			
CV		22.7	20.6	28.2

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 6. Peso de biomasa fresca y seca de hoja, raíz y tallo, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	gl	Peso de biomasa fresca (g)			Peso de biomasa seca (g)		
		Hojas	Raíz	Tallo	Hojas	Raíz	Tallo
BLOQ	3	244.5 ns	192.3 **	3.6 ns	2.1 ns	0.3 ns	0.1 ns
LUZ	1	92.6 ns	226.9 **	17.0 ns	0.6 ns	0.1 ns	0.0 ns
Ea	3	223.0	6.9	7.5	0.9	0.1	0.1
CONC	1	40250.4 **	16170.3 **	576.0 **	454.6 **	22.3 **	7.5 **
LUZ*CONC	1	51.1 ns	209.9 ns	12.8 ns	5.4 ns	2.7 ns	0.1 ns
Eb	6	272.3	55.8	8.5	2.7	1.0	0.1
SIST	1	1003.3 ns	136.6 ns	2.6 ns	43.5 **	9.5 **	0.0 ns
LUZ*SIST	1	970.3 ns	198.5 ns	50.4 **	12.2 **	0.9 ns	1.0 **
CONC*SIST	1	704.9 ns	2831.6 **	25.3 **	0.3 ns	4.9 **	0.3 ns
LUZ*CONC*SIST	1	184.3 ns	123.5 ns	15.6 ns	6.9 ns	0.1 ns	0.2 ns
Ec	44	257.9	68.6	4.4	1.9	0.9	0.1
TOTAL	63						
CV		35.4	30.06	39.0	29.8	47.6	57.1

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 7. Clorofila *a*, *b*, total y carotenos, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el primer ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	GL	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Carotenos
		µg g⁻¹			
BLOQ	3	0.019 ns	0.011 ns	0.059 ns	6.016 ns
LUZ	1	0.035 ns	0.002 ns	0.097 ns	0.189 ns
Ea	3	0.012	0.005	0.032	5.572
CONC	1	0.305 **	0.023 ns	0.819 **	6.164 ns
LUZ*CONC	1	0.004 ns	0.000 ns	0.009 ns	5.240 ns
Eb	6	0.075	0.027	0.218	14.959
SIST	1	0.171 **	0.027 **	0.463 **	1.017 ns
LUZ*SIST	1	0.044 ns	0.011 **	0.124 ns	10.782 **
CONC*SIST	1	0.064 **	0.003 ns	0.175 **	0.022 ns
LUZ*CONC*SIST	1	0.031 ns	0.007 ns	0.082 ns	0.040 ns
Ec	12	0.156	0.023	0.412	11.299
TOTAL	31	0.917	0.139	2.490	61.305
CV		41.3892	47.75211	40.38783	39.71549

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 8. Clorofila *a*, *b*, total y carotenos, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	gl	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Carotenos
		µg g⁻¹			
BLOQ	3	0.04415 ns	5.80E-03 ns	0.12695 ns	3.18473 ns
LUZ	1	0.09398 ns	8.58E-03 ns	0.25216 ns	9.87557 **
Ea	3	0.04389	0.01075	0.14306	2.48912
CONC	1	0.01751 ns	7.94E-03 ns	0.07162 ns	4.17044 ns
LUZ*CONC	1	0.00012 ns	6.15E-05 ns	0.00066 ns	0.0180 ns
Eb	6	0.04585	0.01324	0.15996	6.53994
SIST	1	0.01376 ns	0.00006 ns	0.02224 ns	0.83840 ns
LUZ*SIST	1	0.11641 **	0.01554 **	0.33823 **	2.1475 ns
CONC*SIST	1	0.11272 **	0.03034 **	0.37787 **	15.5439 **
LUZ*CONC*SIST	1	0.08723 **	0.01768 **	0.27639 **	10.6068 **
Ec	12	0.21633	0.0361	0.63892	25.3835
TOTAL	31	0.79194	0.14608	2.40805	80.7982
CV		20.51459	22.10864	20.81055	6.237

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 9. Concentración de nutrimentos en planta, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el primer ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	gl	N		Ca		K		Mg		P		S	
g kg⁻¹													
BLOQ	1	2.7	ns	554.5	ns	21900.9	ns	238.7	ns	99.5	ns	2.0	ns
LUZ	1	0.1	ns	692.4	ns	14785.1	ns	1091.2	ns	21.5	ns	0.3	ns
Ea	1	3.2		992.6		27410.9		788.9		126.5		29.2	
CONC	1	4.5	**	1080.8	ns	8085.2	ns	9647.8	ns	884.2	ns	2.3	ns
LUZ*CONC	1	0.1	ns	758.7	ns	4285.9	ns	4439.2	ns	0.1	ns	62.5	ns
Eb	2	0.1		1669.6		6654.1		660.7		124.8		231.2	
SIST	1	21.4	**	966.9	**	239118.2	ns	29415.3	**	3581.9	**	5970.9	**
LUZ*SIST	1	0.3	ns	80.1	ns	76.0	ns	1570.9	ns	16.3	ns	462.1	ns
CONC*SIST	1	0.8	ns	2225.8	**	139.3	ns	18698.1	**	73.4	ns	835.5	ns
LUZ*CONC*SIST	1	0.4	ns	7328.0	**	41253.0	ns	439.0	ns	46.7	ns	89.5	ns
Error	4	1.6		73.4		54216.8		1474.2		111.2		213.5	
Total	15												
CV		17.37		2.51		23.76		16.82		17.56		13.70	

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

Apéndice 10. Concentración de nutrimentos en planta, al final de la etapa de producción en lechuga tipo italiana, en el segundo ciclo de producción, durante otoño invierno.

FV	gl	N		Ca		K		Mg		P	S	
g kg ⁻¹												
BLOQ	1	0.03	ns	637.0	ns	3491.7	ns	168242.0	ns	12.6	ns	323.7 **
LUZ	1	0.01	ns	1072.7	ns	297.3	ns	36369.9	ns	991.2	ns	17.6 **
Ea	1	7.97		263.8		1658.1		117324.7		557.3		0.003
CONC	1	0.69	ns	132.9	ns	51102.8	ns	1097569.7	ns	14993.8	**	0.2 ns
LUZ*CONC	1	3.75	ns	1386.9	ns	52.1	ns	129709.0	ns	1506.6	ns	150.6 ns
Eb	2	2.27		392.7		1894.6		115338.1		293.3		173.1
SIST	1	9.60	ns	5591.6	**	11913.0	ns	176390.6	ns	4467.7	**	606.6 ns
LUZ*SIST	1	1.76	ns	1634.6	ns	8679.6	ns	9119.7	ns	467.1	ns	10.3 ns
CONC*SIST	1	0.08	ns	1113.9	ns	19913.6	ns	3166.4	ns	4968.5	**	49.8 ns
LUZ*CONC*SIST	1	2.58	ns	1484.2	ns	3281.0	ns	601.7	ns	355.3	ns	0.8 ns
Error	4	7.37		388.5		3757.6		107802.5		290.0		222.7
Total	15											
CV		28.772		8.88		8.06		56.39		29.72		21.58

Medias; ** indica que los valores son significativamente diferentes (Tukey's, $P \leq 0.05$); ns= no significativo; CV= Coeficiente de variación.

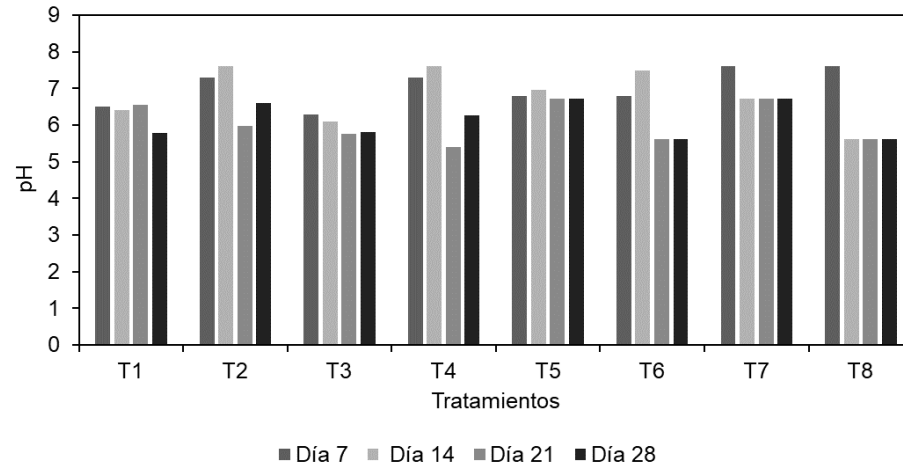
Apéndice 11. Análisis de solución nutritiva, al final de los dos ciclos en el cultivo de lechuga tipo italiana, otoño-invierno.

Trat	Rep	B	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Zn	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻
mg /L														
1	1	0.36	84.42	0.02	0.01	4.20	60.11	0.04	24.10	14.29	0.06	15.9	1.1	4.40
1	2	0.37	86.63	0.02	0.01	3.95	61.83	0.04	26.72	14.65	0.05	17.0	0.8	3.85
2	1	0.43	108.53	0.02	0.13	0.42	66.04	0.17	21.41	0.01	0.04	15.9	1.1	79.19
2	2	0.43	109.80	0.02	0.15	0.68	66.75	0.18	20.85	0.01	0.04	17.3	0.8	79.19
3	1	0.36	84.50	0.02	0.01	19.88	57.63	0.57	26.47	14.40	0.10	19.6	1.4	4.40
3	2	0.34	86.89	0.03	0.01	19.67	58.36	0.59	22.96	14.82	0.12	19.0	1.6	4.6
4	1	0.43	99.76	0.02	0.03	0.35	66.79	0.14	22.64	0.00	0.04	21.2	1.1	7.7
4	2	0.44	104.33	0.02	0.04	0.17	69.24	0.14	23.39	0.00	0.01	20.4	0.8	7.9
5	1	0.42	112.92	0.01	0.01	2.76	63.84	0.01	29.49	0.00	0.01	26.0	0.8	9.8
5	2	0.41	114.49	0.01	0.01	2.97	63.87	0.01	30.35	0.00	0.01	26.3	1.1	8.7
6	1	0.42	112.92	0.01	0.01	2.76	63.84	0.01	29.49	0.00	0.01	26.0	0.8	9.8
6	2	0.41	114.49	0.01	0.01	2.97	63.87	0.01	30.35	0.00	0.01	26.3	1.1	8.7
7	1	0.52	132.11	0.01	0.11	50.08	87.95	1.25	31.60	0.01	0.15	27.4	1.1	5.8
7	2	0.53	131.00	0.02	0.01	49.09	87.83	1.25	32.40	0.03	0.16	27.7	0.8	5.8
8	1	0.52	132.11	0.01	0.11	50.01	87.95	1.25	31.60	0.01	0.15	27.4	1.1	5.8
8	2	0.53	131.900	0.02	0.01	49.08	87.83	1.25	32.40	0.03	0.16	27.7	0.8	5.8

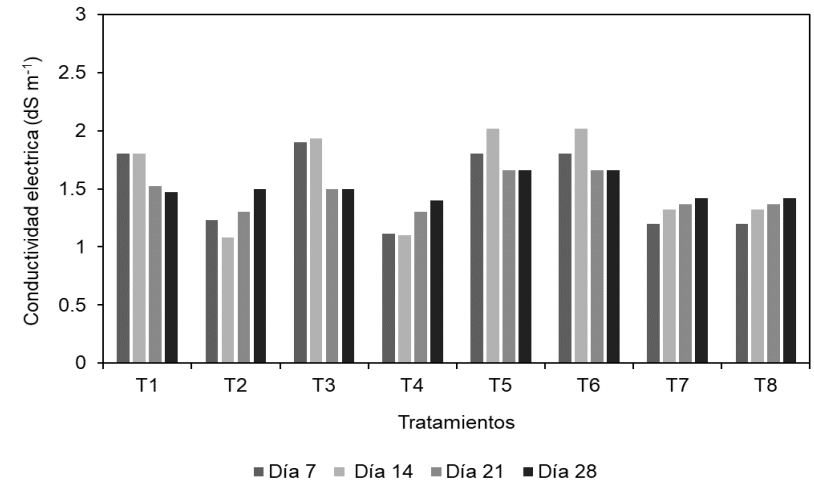
^z Trat= Tratamiento; Rep= Repetición

Apéndice 12: Mediciones de pH y conductividad eléctrica en dos ciclos de cultivo (otoño-invierno) durante la etapa de producción de lechuga italiana.

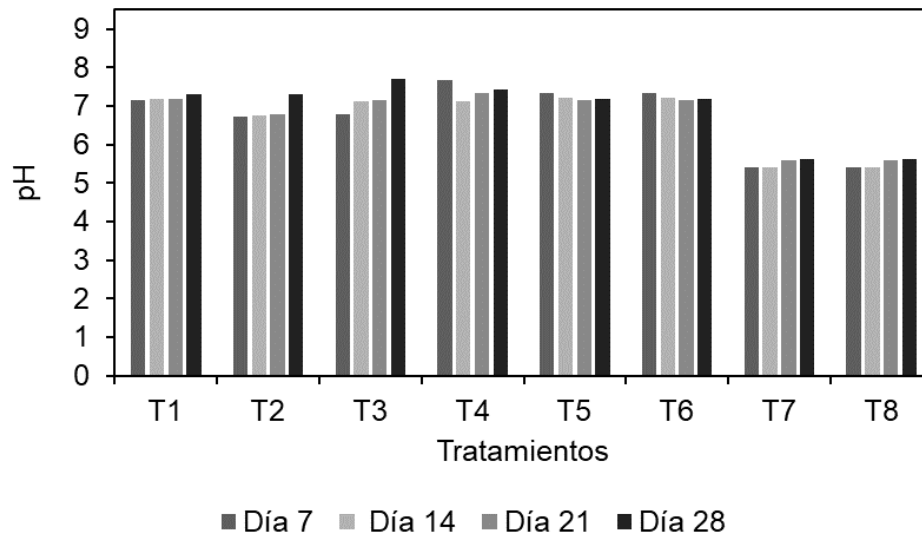
Ciclo 1



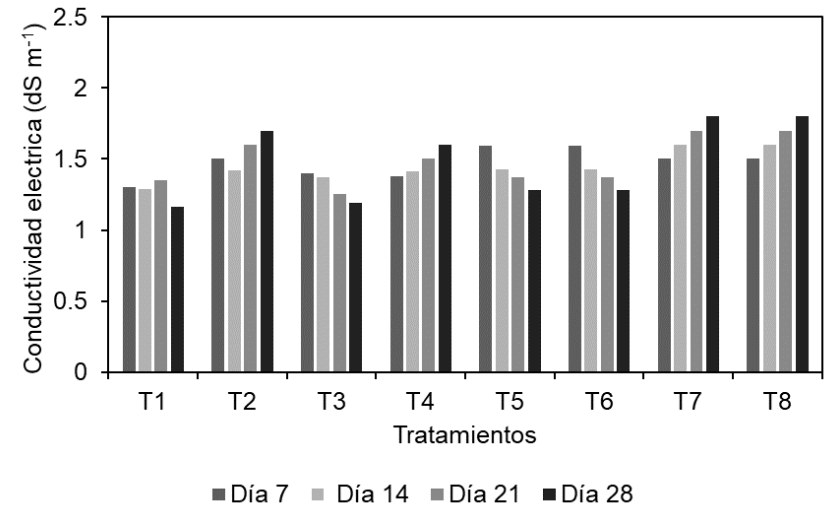
Ciclo 1



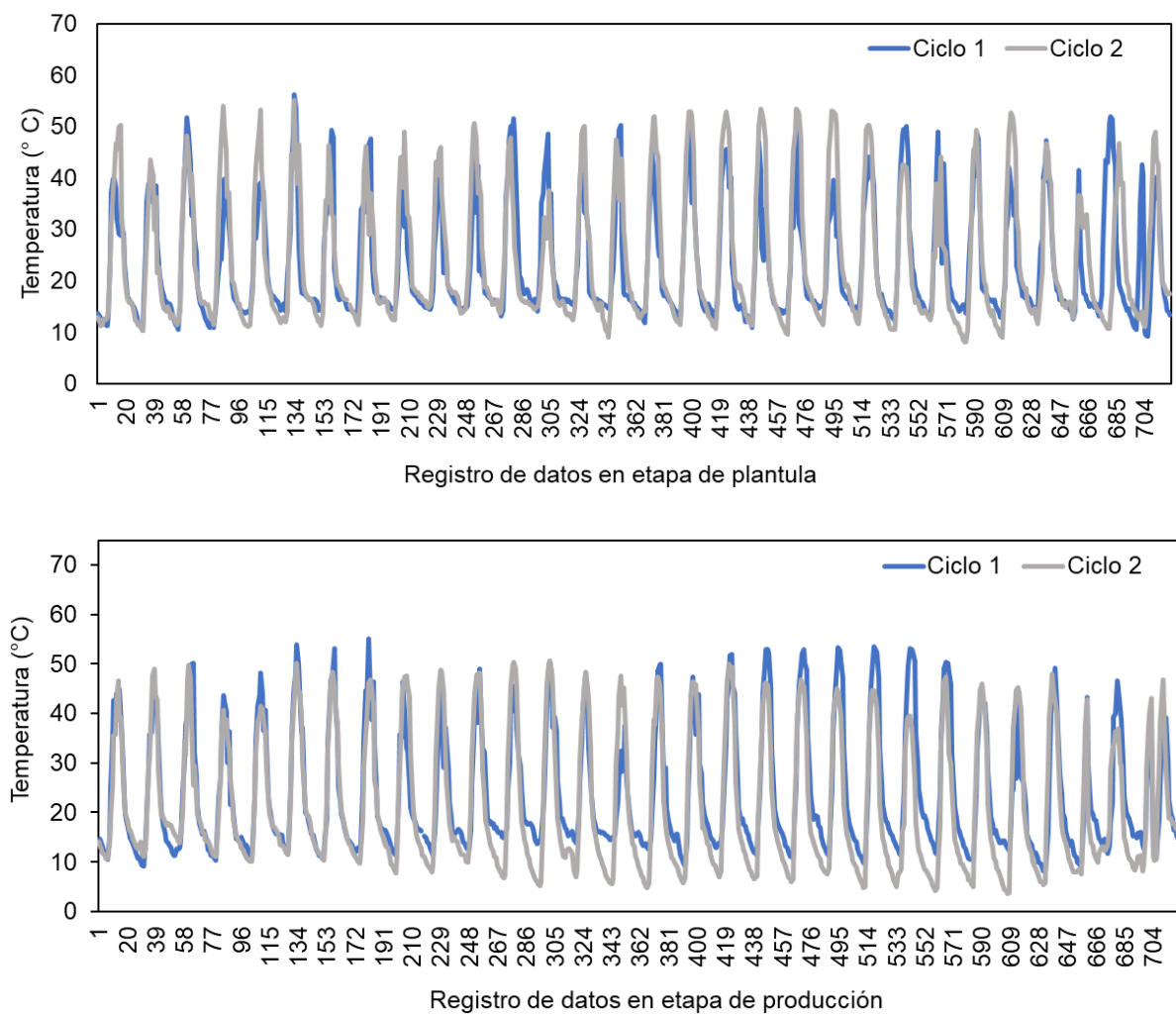
Ciclo 2



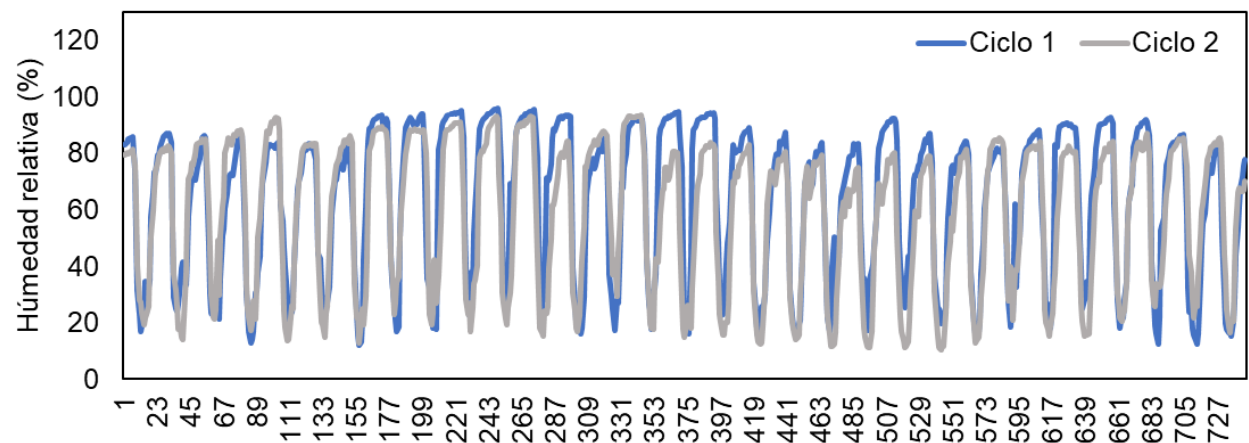
Ciclo 2



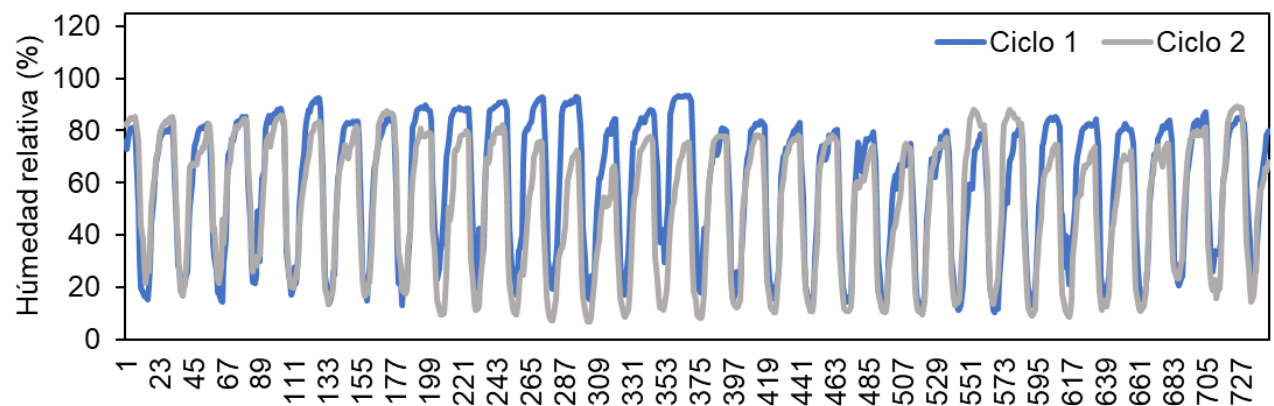
Apéndice 13. Temperatura dentro del invernadero en dos etapas de cultivo, durante dos ciclos de producción (otoño-invierno).



Apéndice 14. Humedad relativa dentro del invernadero en dos etapas de cultivo, durante dos ciclos de producción (otoño-invierno).

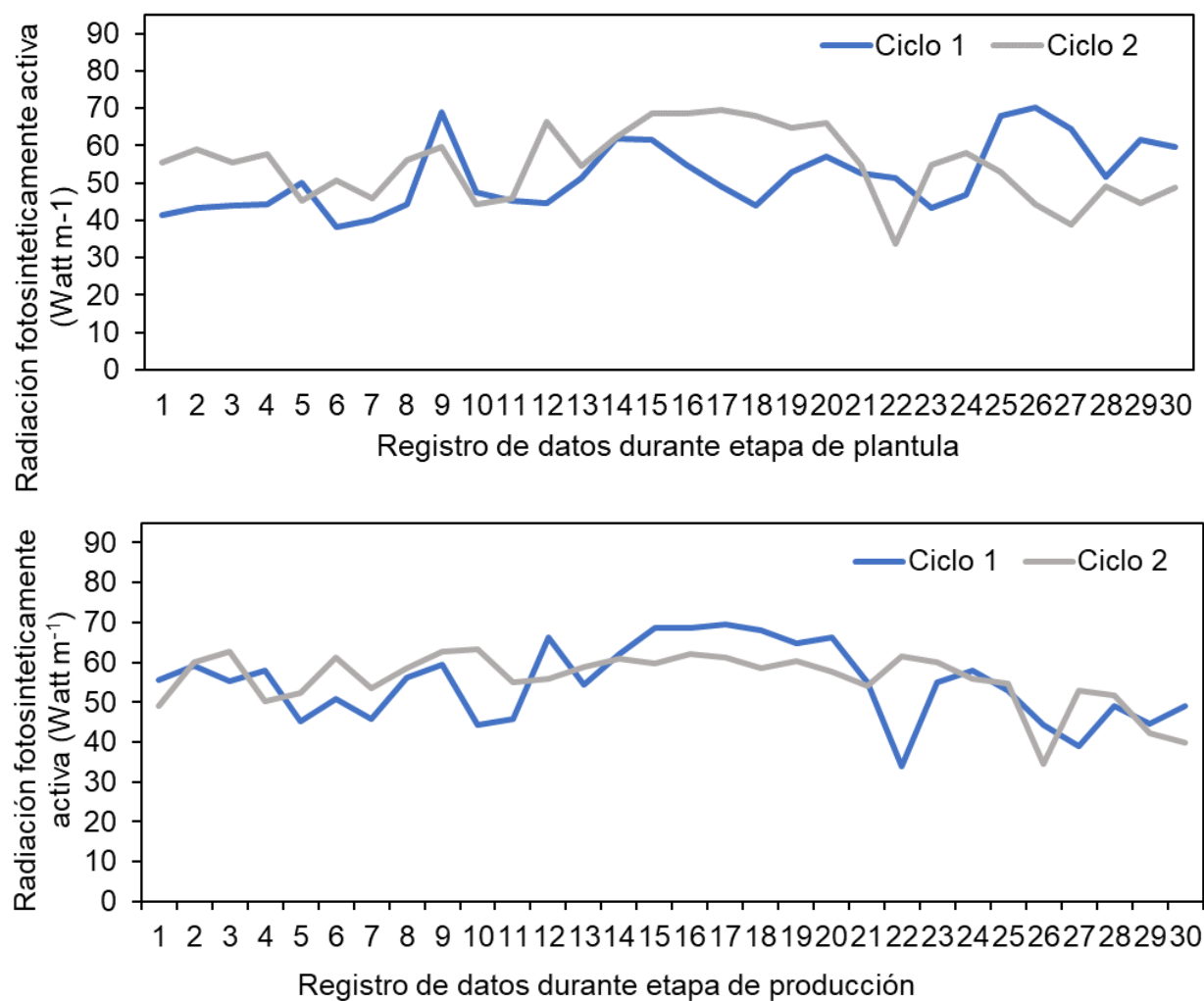


Registro de datos en etapa de plantula



Registro de datos en etapa de producción

Apéndice 15. Radiación fotosintéticamente activa dentro del invernadero en dos etapas de cultivo, durante dos ciclos de producción (otoño-invierno). Datos obtenidos de la plataforma de la NASA y modificados al 35% según el % de sombra del invernadero.



Apéndice 16. Fertilizantes utilizados en la solución nutritiva, steiner

Fertilizante	g · 1000 L
Macronutrimentos	
Nitrato de calcio	921.3
Nitrato de magnesio	218.2
Sulfato de magnesio	224.5
Ácido fosfórico	66 (mL)
Sulfato de potasio	640.5
Micronutrimentos	
Sulfato ferroso	14.8
Sulfato de manganeso	4.24
Sulfato de cobre	0.39
Sulfato de zinc	0.44
Ácido bórico	2.82