

Crecimiento y absorción total nutrimental de lechuga romana tipo baby cultivada con iluminación led bajo sistema fábrica de plantas

V.H. Avendaño-Abarca¹, D.C. González-Sandoval¹, J.P. Munguía-López², R. Hernández-Cuevas¹, A.I. Luna-Maldonado¹, J.A. Vidales-Contreras¹, G. Niño-Medina¹ y H. Rodríguez-Fuentes^{1,*}

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Francisco Villa s/n, Col. Ex-Hacienda "El Canadá", C.P. 66050, General Escobedo, Nuevo León, México

² Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna N° 140, Col. San José de los Cerritos, C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México

Resumen

En esta investigación se evaluó la influencia de la calidad e intensidad de luz en el crecimiento y absorción total de nutrimentos en el cultivo de lechuga romana tipo baby. Las variables de crecimiento evaluadas fueron: peso fresco y seco de raíz y hojas, número de hojas y absorción total nutrimental (N, P, K, Ca, Mg, Cu y Zn). Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$), destacando un mayor crecimiento del cultivo bajo el tratamiento de luz roja + azul + suplemento de luz blanca, tanto en peso seco y fresco, número de hojas y absorción total de nutrimentos, demostrando así que, a mayor intensidad de luz, considerando su calidad (espectros electromagnéticos irradiados), se promueve un mayor crecimiento en el cultivo. La eficiencia energética en la producción de peso seco con respecto a la intensidad de luz acumulada se vio disminuida en el tratamiento 3 debido a que el suplemento de luz blanca proporcionó otros espectros electromagnéticos que no son tan eficientes en los procesos fotosintéticos comparados con el rojo y azul (tratamientos 1 y 2); requiriendo una intensidad de luz acumulada de $1,87 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ para producir 1,0 g de peso seco, valor superior al tratamiento 1 ($1,57 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$) y tratamiento 2 ($1,53 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$).

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., calidad de luz, intensidad lumínica, hidroponía.

Growth and total nutrimental absorption of baby romaine lettuce cultivated with led lighting under plant factory system

Abstract

In this research, the influence of the quality and intensity of light on the growth and total absorption of nutrients in the baby romaine lettuce crop was evaluated. The growth variables evaluated were: fresh and dry weight of root and leaves, number of leaves and total nutrient absorption (N, P, K, Ca, Mg, Cu

* Autor para correspondencia: humberto.rodriguezfn@uanl.edu.mx

Cita del artículo: Avendaño-Abarca VH, González-Sandoval DC, Munguía-López JP, Hernández-Cuevas R, Luna-Maldonado AI, Vidales-Contreras JA, Niño-Medina G, Rodríguez-Fuentes H (en prensa). Crecimiento y absorción total nutrimental de lechuga romana tipo baby cultivada con iluminación led bajo sistema fábrica de plantas. ITEA-Información Técnica Económica Agraria. Vol. xx: 1-14. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.011>

and Zn). The results showed significant differences between treatments ($p \leq 0.05$), highlighting a greater growth of the crop under the treatment of red + blue + white light supplement, both in dry and fresh weight, number of leaves and total absorption of nutrients, demonstrating that a higher intensity of light considering its quality (irradiated electromagnetic spectra) promotes greater growth in the crop. The energy efficiency in the production of dry weight with respect to the accumulated light intensity was diminished in treatment 3 because the white light supplement provided other electromagnetic spectra that are not as efficient in photosynthetic processes compared to red and blue (treatment 1 and treatment 2); requiring an accumulated light intensity equal to $1.87 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ to produce 1.0 g of dry weight, higher value than treatment 1 ($1.57 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$) and treatment 2 ($1.53 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$).

Keywords: *Lactuca sativa* L., light control, light intensity, hydroponics.

Introducción

El Sistema Fabrica de Plantas (Sistema Plant Factory, por sus siglas en inglés) (SPF) es el modelo de la horticultura protegida cuyo propósito es optimizar la producción de algunas especies vegetales a partir del conocimiento y control total de sus requerimientos climáticos, hídricos y nutrimentales (Ohyama et al., 2000; Yokoi et al., 2003; Yokoi et al., 2005; Kozai et al., 2015). Este sistema de producción está conformado por seis elementos principales (Kozai et al., 2006), de los cuales la iluminación artificial es el elemento que presenta uno de los mayores retos para la producción agrícola, debido a que la condición de la luz tiene un efecto importante sobre calidad nutricional de los cultivos (contenido mineral, antioxidantes, vitaminas, etc.) y el crecimiento (Savvas y Passam, 2002; Hunter y Burritt, 2004; Li y Kubota, 2009; Stutte et al., 2009; Johkan et al., 2010; Kang et al., 2013; Chen et al., 2014). Algunos estudios en el cultivo de lechuga demuestran que al incrementarse la intensidad de luz se promueve el crecimiento, acumulación de peso (debido a una mayor actividad fotosintética) y absorción mineral (Hunter y Burritt, 2004; Fu et al., 2012; Morewane, 2014); la magnitud de este efecto dependerá en parte de la especie vegetal y su variedad, además de aspectos como la calidad de luz incidente y el fotoperiodo; de ahí la importancia de inves-

tigar más al respecto (Hunter y Burritt, 2004; Li y Kubota, 2009; Fu et al., 2012; Kang et al., 2013; Sago, 2016).

La nutrición del cultivo en este tipo de sistemas de producción es aportada directamente por la solución nutritiva (SN), la cual debe ser formulada en base a los requerimientos nutrimentales de la especie vegetal para su óptimo crecimiento, permitiendo el uso eficiente de fertilizantes y reducción de costos de producción. En este sentido, una herramienta útil para estimar la demanda nutrimental de una especie vegetal es el concepto de balance de masa, el cual se basa en que la materia seca de una planta está conformada por 16 elementos químicos esenciales, de los cuales 13 son disueltos en la SN para ser absorbidos por la planta por medio de las raíces. Con la cantidad de materia seca producida por planta y su concentración de cada uno de los elementos se puede estimar la cantidad total de cada nutrimento que la planta absorbió (Rodas-Gaitán et al., 2012).

La iluminación a base de diodos emisores de luz (LEDs) es la tecnología más reciente en ingresar al campo de la agricultura en ambientes controlados como fuente principal de energía para las plantas. Estos dispositivos presentan la ventaja de emitir longitudes de onda electromagnética específicas, las cuales pueden ser ajustadas para proporcionar la energía adecuada para estimular los pig-

mentos fotosintéticos; principalmente espectros del color rojo (610-750 nm) y azul (400-520 nm), que implica una mayor acumulación de peso seco haciendo un uso más eficiente de la energía en comparación con dispositivos convencionales como lámparas de sodio de alta presión o fluorescentes, aumentando así el potencial productivo del SPF (Fang y Jao, 2000; Lefsrud et al., 2008; Mizuno et al., 2011; Žukauskas et al., 2011; Tarakanov et al., 2012).

El crecimiento de los cultivos está muy relacionado con la temperatura ambiental y, mediante el uso de un índice térmico denominado grados-día, pueden hacerse programaciones de ciclos de cultivos y pronósticos de fechas de cosecha (Almaguer-Sierra et al., 2014). Este principio puede ser aplicable en el SPF si consideramos emplear el concepto de intensidad de radiación fotosintética activa (PAR) acumulada, que estima los requerimientos de cantidad de energía lumínica necesaria para el crecimiento de un cultivo, permitiendo manipular la duración de los ciclos de producción a conveniencia.

La lechuga es una de las especies vegetales producidas con gran éxito en el SPF, siendo una hortaliza de gran importancia económica debido al aumento de su demanda en los mercados consumidores (Falovo et al., 2009). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue: estimar la influencia de la calidad-intensidad de luz acumulada en la producción de biomasa y en la absorción mineral en el cultivo de lechuga romana baby.

Material y métodos

Sitio experimental, material vegetal y condiciones de crecimiento

El trabajo experimental se realizó en el Laboratorio de Sistema de Producción en Ambiente Controlado de la Facultad de Agrono-

mía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FA-UANL), ubicada en el municipio de General Escobedo, Nuevo León, México.

Para este estudio se emplearon semillas de *Lactuca sativa* L. var. *longifolia* Lam cv. 'Parris Island' (lechuga "romana") sembradas en charolas de poliestireno expandido de 200 cavidades usando roca volcánica como sustrato previamente desinfectado. El trasplante al sistema de producción se llevó a cabo a los 20 días después de la siembra considerando una densidad de población de 201 plantas·m⁻³.

Las condiciones ambientales de crecimiento para la producción de plántula y de cultivo fueron: temperatura promedio ambiental de 26,21 ± 2,67 °C (Choi et al., 2000); humedad relativa de 37,43 ± 6,52 %; concentración de CO₂ ambiental promedio diaria de 510,78 ± 283,16 ppm (Park et al., 2012) y fotoperiodo de 24·h·d⁻¹ (Kozai et al., 2015). La intensidad de luz empleada para la producción de plántula fue de 154,21 μmol·m⁻²·s⁻¹ compuesta por 33,9 % del espectro electromagnético rojo; 35,2 % azul; 13,1 % violeta; 6,7 % verde; 2,6 % amarillo y 8,3 % naranja. Esta etapa concluyó a los 20 días. Las lecturas de las variables ambientales se monitorearon y almacenaron cada 30 min las 24 h del día con un sensor de concentración de CO₂ ambiental (Carbon Dioxide and Temperature Monitor de Telaire®, EUA) y un Data Logger con sensores de temperatura, humedad relativa e intensidad de luz (modelo U12-012, HOB0®, EUA). La temperatura y humedad relativa ambiental se controlaron con un Minisplit (modelo 53UPQ183A, Carrier, EUA.), un deshumificador (modelo DD50PE, De'Longhi America Inc, EUA) y un humidificador (modelo BUL7923-CN de Bionaire® Canadá).

Para la nutrición del cultivo se empleó la SN (Tabla 1) propuesta por Rodríguez-Fuentes et al. (2011), considerando la calidad del agua para su formulación. Los valores de pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto y temperatura de la SN fueron 5,69 ± 0,33; 2,1

Tabla 1. Solución nutritiva estándar y fuentes de nutrimentos empleados para su elaboración.

Table 1. Standard nutritive solution and nutrients sources used for its preparation.

Elemento	Concentración (mg L ⁻¹)	Fuente
Nitrógeno (N)	200	–
Fósforo (P)	60	NH ₄ H ₂ PO ₄
Potasio (K)	250	KNO ₃
Calcio (Ca)	200	Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O
Magnesio (Mg)	50	Mg(NO ₃) ₂
Azufre (S)	100	H ₂ SO ₄
Hierro (Fe)	0,5	FeSO ₄ 7H ₂ O
Manganeso (Mn)	0,25	MnSO ₄ H ₂ O
Boro (B)	0,25	H ₃ BO ₃
Cobre (Cu)	0,03	CuSO ₄ 5H ₂ O
Zinc (Zn)	0,25	ZnSO ₄ H ₂ O
Molibdeno (Mo)	0,01	Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O

Fuente: Rodríguez-Fuentes et al. (2011).

$\pm 0,15 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$; $6,35 \pm 0,85 \text{ ppm}$ y $25,81 \pm 0,71 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente (Magalhães, 2006; Rodríguez-Fuentes et al., 2016). Los parámetros de SN se monitorearon diariamente empleando sensores de pH (modelo HI98108, HANNA Instruments, UK), conductividad eléctrica (modelo HI98300, HANNA Instruments, UK), oxígeno disuelto y temperatura (modelo HI9143, HANNA Instruments, UK). Para asegurar una nutrición óptima la SN fue renovada cada 5 días.

Tratamientos

Se evaluaron tres tratamientos de luces de fabricación comercial, dos tratamientos de color rojo y azul, ($t_1 = 127,49$ y $t_2 = 147,32 \text{ } \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) y un tercer tratamiento con luz roja, azul y suplementación de luz blanca (t_3

$= 235,69 \text{ } \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (Tabla 2). Para cada tratamiento se establecieron 14 repeticiones; cada una conformada por una unidad experimental de 9 plantas, haciendo un total de 126 plantas por tratamiento a una densidad de población de $201 \text{ plantas}\cdot\text{m}^{-3}$ bajo un diseño completamente al azar. Se estableció un fotoperiodo de $24 \text{ h luz}\cdot\text{d}^{-1}$ en los tres tratamientos para cumplir con la luz integral diaria requerida por el cultivo (Kozai et al., 2015). Como fuente de iluminación artificial se emplearon lámparas tubulares LED T8 color rojo, azul (modelo 21019, DUBAI) y blanco frío (modelo ML-TU-CR1 de DLM S de R. L. de C. V., México). Para determinar el número de lámparas requeridas para establecer los tres tratamientos de luz se usó un sensor de radiación PAR (modelo LightScout de Spectrum Technologies, Inc, EUA) y un espec-

Tabla 2. Caracterización de espectros electromagnéticos presentes en los tratamientos de luz establecidos para el crecimiento de lechuga romana tipo baby bajo el Sistema Plant Factory.

Table 2. Characterization of electromagnetic spectra present in the light treatments established for the growth of baby romaine lettuce under the Plant Factory System.

Color	Banda de espectro electromagnético (nm)	Intensidad ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
		t1	t2	t3
Violeta	380-450	33,68	29,78	50,93
Azul	450-495	18,97	25,19	30,36
Verde	495-570	0	0	31,31
Amarillo	570-590	0	0	10,58
Naranja	590-620	2,41	3,75	16,52
Rojo	620-750	72,43	88,6	95,99
Rojo + Azul	(620-750) + (620-750)	91,4	113,79	126,35
Relación rojo:azul (%)	(620-750):(620-750)	79,24:20,75	77,86:22,13	75,97:24,02
Intensidad total ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	380-750	127,49	147,32	235,69

troradiómetro (Apogge modelo PS-300 de Apogge Instruments, Inc, EUA) para la caracterización de los espectros electromagnéticos (calidad de la luz) presentes en cada tratamiento.

Para este experimento se utilizó un sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique, por sus siglas en inglés) multinivel, cubriendo los espacios con película reflejante para evitar contaminación de luz entre tratamientos.

Variables evaluadas

Determinación de concentración y absorción nutrimental

Al finalizar el ciclo de producción (21 días después de trasplante) se extrajeron dos plantas completas representativas de la unidad experimental. En cada una de ellas se midió el peso fresco y seco (en $\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$) y número de hojas. Para la determinación de la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Cu y Zn so-

bre base seca se usó una planta representativa de la población de cada unidad experimental (haciendo un total de 14 plantas por tratamiento).

Para obtener la concentración nutrimental, las muestras fueron secadas a temperatura de 60 °C hasta peso constante. Posteriormente al proceso de secado cada muestra fue molida y tamizada con malla de 0,05 mm. Las muestras para la determinación de concentración de P, K, Ca, Mg, Cu y Zn fueron previamente digeridas en una mufla a una temperatura de 450 a 500 °C por 4 h para posteriormente obtener tres extractos de cada muestra (cada extracto consistió de 0,5 g de biomasa seca diluida y aforada a 25 mL con ácido clorhídrico al 1,0 N). La determinación de la concentración de P se realizó mediante la técnica de espectrofotometría óptica y las determinaciones de K, Ca, Mg, Cu y Zn se realizaron por la técnica de espectroscopía de absorción atómica (Rodríguez-Fuentes y Rodríguez-Absi, 2015).

La determinación de la concentración de N total se hizo con el método Kjeldhal, empleando 0,1 g de biomasa seca de cada muestra, esta determinación se realizó (al igual que los elementos antes mencionados) por triplicado.

Para la obtención de la absorción nutrimental total por planta (N, P, K, Ca, Mg, Cu y Zn) se aplicó el concepto de balance de masa (Rodas-Gaitán et al., 2012).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos obtenidos de las variables evaluadas se realizó mediante un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar y prueba de comparación de medias Tukey ($p \leq 0,05$); haciendo una transformación de datos para las variables número de hojas (raíz cuadrada). Los análisis se realizaron usando el software InfoStat 2017 en su versión estudiantil de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Resultados y discusión

Peso fresco y seco

En los análisis de varianza y comparación de medias realizadas en las variables peso fresco y seco de planta (Tabla 3) se presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$) entre los tratamientos de luz, siendo el t3 ($235,69 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) el que acumuló la mayor cantidad de peso fresco y seco en raíz, hojas y total (raíz + hojas). Esto posiblemente fue promovido por una mayor actividad fotosintética (Fu et al., 2012) debido a una mayor cantidad de luz de los espectros electromagnéticos del color rojo, azul y blanco en t3, en comparación con el t1 y t2 (Tabla 2 y Tabla 4). En este sentido, Lin et al. (2013) reportan una mayor acumulación de peso fresco y seco en el cultivo de lechuga bajo la combinación de luz roja y azul más suple-

mento de luz blanca (que proporciona los espectros electromagnéticos violeta, verde, amarillo y naranja), lo que coincide con los resultados del presente trabajo. Kim et al. (2004) y Johkan et al. (2012), siendo más específicos, mencionan que la presencia simultánea (efecto sinérgico) de luz roja, azul y verde son muy importantes para lograr un crecimiento normal en el cultivo de lechuga, mejorando las características morfológicas de la planta, como un mayor número de hojas y mayor área foliar de estas permitiendo una mayor recepción de luz que se traduce en mayor actividad fotosintética. Sin embargo, estos resultados son el efecto combinado de las variables intensidad y calidad de luz, puesto que no fueron evaluadas por separado.

En el cultivo de la lechuga la biomasa aérea es comercialmente importante. Basados en los datos obtenidos (Tabla 3), la distribución (parte aérea-raíz en %) del peso seco total ($\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$) para los tratamientos fue de 81,8-18,2 % ($2,2 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$), 88-12 % ($2,5 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$) y 82,9-17,1 % ($3,5 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$) para t1, t2 y t3 respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Kang et al. (2013) en el que reporta porcentajes similares bajo una intensidad de $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ usando luz roja, azul y blanca.

Número de hojas

Los valores de la variable número de hoja observados en el t3 fueron superiores ($p \leq 0,05$) en comparación con el tratamiento t1 en un 25,19 % (Tabla 3) y numéricamente mayor que el tratamiento t2 en un 12,32 %. Esto concuerda con lo encontrado por Ohashi-Kaneko et al. (2007) bajo un suplemento de luz blanca. Yanagi et al. (1996) reportan que, al aumentar la intensidad de luz en el cultivo de lechuga, se promueve un mayor número de hojas, encontrando un incremento significativo del 8 % cuando la intensidad de luz se duplica (de $85 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ a $170 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Tabla 3. Número de hojas, peso fresco y seco de hojas, raíz y total (raíz + hojas) por planta (g) de lechuga romana tipo baby a los 21 días después de trasplante cultivada en un Sistema Plant Factory ($\bar{x} \pm DE$, n = 14) bajo tres tratamientos de intensidad de luz (t1 = 127,49 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; t2 = 147,32 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y t3 = 235,69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Table 3. Number of leaves, fresh and dry weight of leaves, root and total (root + leaves) per plant (g) of baby romaine lettuce 21 days after transplant, cultivated in a Plant Factory System ($\bar{x} \pm SD$, n =14) under three light intensity treatments (t1 = 127.49 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; t2 =147.32 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and t3 = 235.69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

	Nº. Hojas	Peso fresco (g·planta ⁻¹)			Peso seco (g·planta ⁻¹)		
		Hojas	Raíz	Total	Hojas	Raíz	Total
t1	13,1 ± 1,2 b	21,3 ± 7,5 c	4,0 ± 0,8 b	25,3 ± 7,9 c	1,8 ± 0,4 c	0,4 ± 0,1 b	2,2 ± 0,5 b
t2	14,6 ± 1,0 ab	33,8 ± 7,4 b	5,0 ± 1,1 b	38,8 ± 7,7 b	2,2 ± 0,4 b	0,3 ± 0,1 b	2,5 ± 0,4 b
t3	16,4 ± 2,8 a	47,4 ± 11,7 a	9,7 ± 9,7 a	57,1 ± 14,1 a	2,9 ± 0,4 a	0,6 ± 0,2 a	3,5 ± 0,5 a

Medias de columnas con una letra diferente son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

\bar{x} = media; DE = desviación estándar; n = tamaño de muestra.

Tabla 4. Intensidad de luz acumulada de cada banda del espectro electromagnético irradiada para la producción de lechuga romana tipo baby cultivada en un Sistema Plant Factory.

Table 4. Accumulated light intensity of each band of the electromagnetic spectrum radiated for the production of baby romaine lettuce grown in a Plant Factory System.

Color	Longitud de onda (nm)	t1 (mol·m ⁻³)	t2 (mol·m ⁻³)	t3 (mol·m ⁻³)
Violeta	380-450	183,3	162,1	277,2
Azul	450-495	103,3	137,1	165,3
Verde	495-570	0,0	0,0	170,4
Amarillo	570-590	0,0	0,0	57,6
Anaranjado	590-620	13,1	20,4	89,9
Rojo	620-750	394,3	482,3	522,5
Rojo + Azul	(620-750)+(620-750)	497,6	619,4	687,8
Total	380-750	694,0	801,9	1282,9
Proporción Rojo:Azul	3,8:1	3,5:1	3,2:1	

Acumulación total nutrimental del cultivo

Los tratamientos mostraron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0,05$) en la absorción total de nutrimentos por planta de lechuga (Figura 1 y 2), destacando el t3 con los mayores valores de N, P, K, Ca, Mg, Cu y Zn, en comparación a los observados en el t1 y t2; esto posiblemente fue debido a un mayor crecimiento radicular y parte aérea estimulado por el tipo y cantidad de luz irradiada al cultivo (Johkan et al., 2012). Shin et al. (2012) coinciden en que, en el cultivo de lechuga, la absorción de nutrimentos está influenciada por la calidad de luz, reportando una mayor acumulación de nutrimentos con espectros electromagnéticos específicos como: la presencia de luz blanca, luz monocromática roja y azul o su combinación, lo cual provocó el incremento de P, Ca, Mg y N, respectivamente.

La relación entre los espectros electromagnéticos rojo:azul (en base solo a la suma de sus intensidades) fue de 80:20 % aproximadamente en todos los tratamientos (Tabla 2). Chen et al., (2014) reporta que bajo esta relación se promueve una mayor acumulación de Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn y B; por lo que la mayor acumulación de nutrimentos en el tratamiento t3 (Figura 1 y 2) fue debido principalmente a la presencia de luz blanca y a una mayor intensidad de luz de los espectros electromagnéticos rojo y azul.

Por otra parte, desde el punto de vista de calidad nutrimental para consumo humano, la ingesta de productos hortícolas con un mayor contenido mineral promueve una mejor condición para cumplir con la cantidad diaria recomendada; principalmente microelementos como el Fe y Zn que en las plantas están deficientes y que su ingesta es de gran importancia para la salud humana (Dibb et al., 2005). En la Figura 2 se puede observar que el t3 ($0,35 \text{ mg}\cdot\text{planta}^{-1}$) presentó una mayor absorción de Zn ($p \leq 0,05$), incrementando hasta 84,21 y 40 % más con respecto a los valores obtenidos por t1 ($0,19 \text{ mg}\cdot\text{planta}^{-1}$) y t2 ($0,25 \text{ mg}\cdot\text{planta}^{-1}$) respectivamente.

Intensidad de luz acumulada y requerimiento nutrimental

En este estudio las cantidades obtenidas de peso seco total (raíz + hojas) producido fueron: t1 = $442,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, t2 = $502,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ y t3 = $703,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (considerando una densidad de población de 201 plantas cultivadas en un volumen de 1 m^3) con un total de luz acumulada (del trasplante a la cosecha) de 694,0; 801,9 y 1282,9 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente (Tabla 5). El desglose de la intensidad de luz PAR acumulada en cada uno de los espectros electromagnéticos se presenta en la Tabla 4.

Considerando los valores de intensidad total acumulada (Tabla 4) y peso seco de hojas (parte comercial) producido (Tabla 3), empleando como criterio la eficiencia energética, se puede inferir que para la producción de 1,0 g de materia seca después de plántula se requirió una intensidad de luz acumulada de 1,92; 1,81 y 2,20 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$ para el t1, t2 y t3, respectivamente, observándose que las plantas del t2, seguidas de las del t1, requirieron menor cantidad de luz para la producción del mismo peso seco (1,0 g), esto debido a que las plantas fueron irradiadas con luz roja y azul principalmente, lo que generó una mayor eficiencia en la producción de materia seca a causa de que estos espectros electromagnéticos son las principales fuentes de energía que las plantas usan para el proceso de fotosíntesis (Kasajima et al., 2008). Por otra parte, la luz blanca como suplemento (t3) proporcionó otros espectros electromagnéticos que no son aprovechados en el proceso de fotosíntesis (ya que pueden ser reflejados, transmitidos o poco absorbidos); pero que influyen en el crecimiento indirectamente, como, por ejemplo, un mayor crecimiento radicular, mayor área foliar y mayor peso fresco (Kim et al., 2004; Johkan et al., 2012; Lin et al., 2013). Este último se evidencia si se consideran los valores de peso fresco de hojas (Tabla 3), el cual requiere de una intensi-

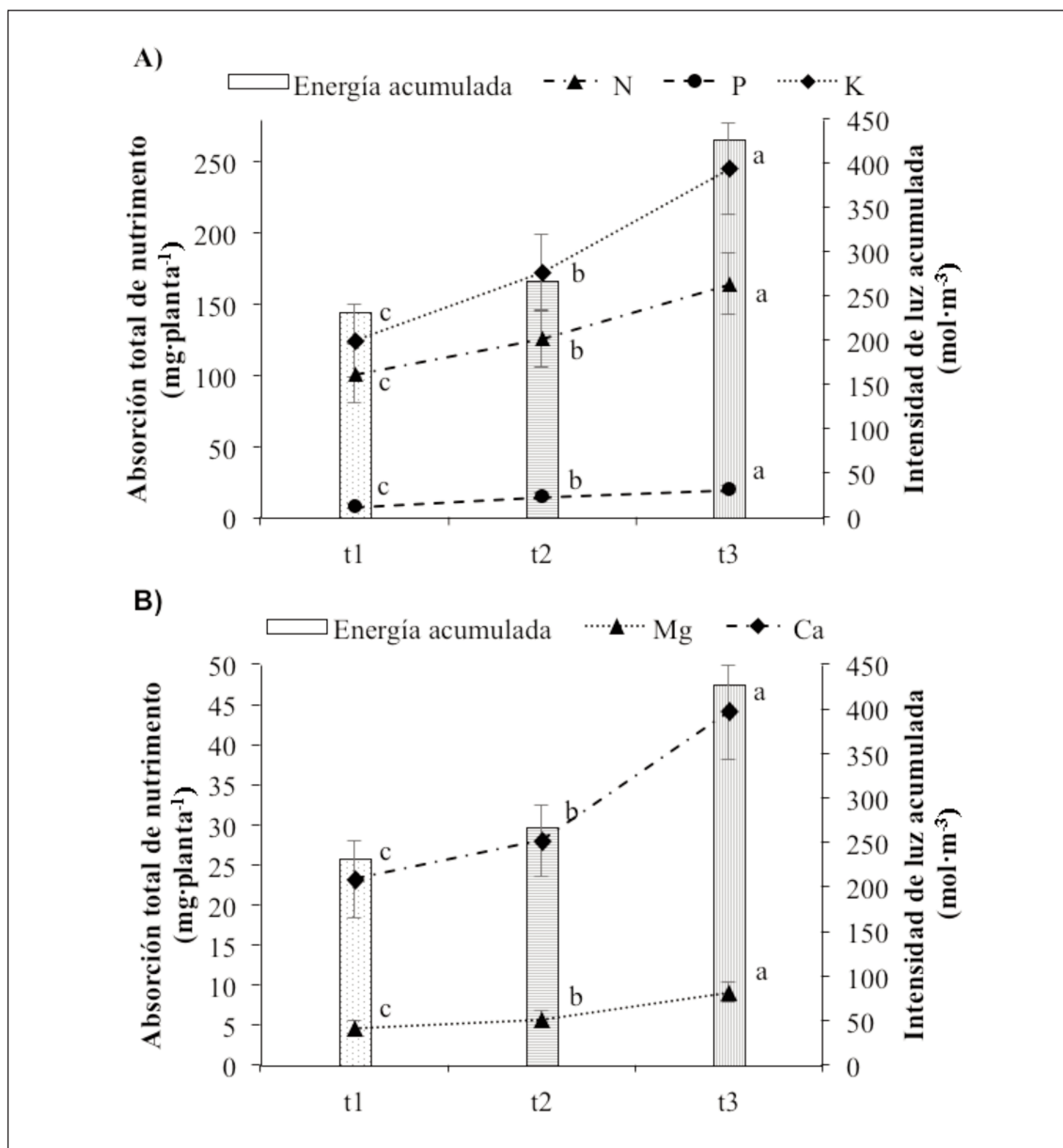


Figura 1. Absorción total de nutrientes por planta, A) N, P y K y B) Ca y Mg, en el cultivo de lechuga romana tipo baby en base a peso seco (raíz + hojas) a los 21 días después de trasplante bajo tres tratamientos de intensidad de luz (t1 = 127,49 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; t2 = 147,32 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y t3 = 235,69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) cultivada en un Sistema Plant Factory ($\bar{x} \pm \text{DE}$, n = 14).

Figure 1. Total absorption of nutrients per plant, A) N, P and K and B) Ca and Mg, in the cultivation of baby romaine lettuce based on dry biomass (root + leaves) at 21 days after transplantation under three light intensity treatments (t1 = 127.49 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; t2 = 147.32 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and t3 = 235.69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) grown in a Plant Factory System ($\bar{x} \pm \text{SD}$, n = 14).

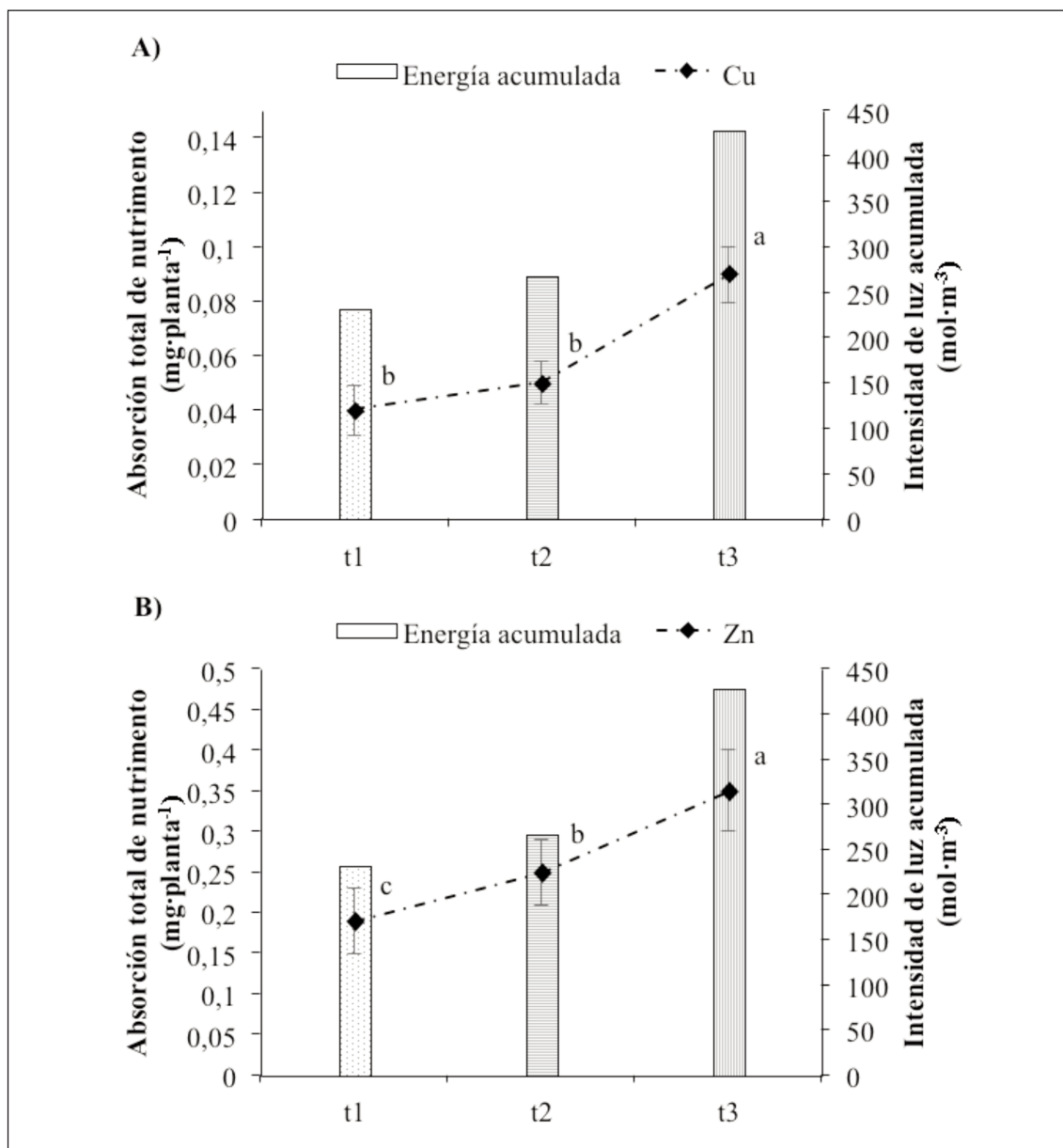


Figura 2. Absorción total de nutrimentos por planta, A) Cu y B) Zn, en el cultivo de lechuga romana tipo baby en base a peso seco (raíz + hojas) a los 21 días después de trasplante bajo tres tratamientos de intensidad de luz ($t1 = 127,49 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; $t2 = 147,32 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y $t3 = 235,69 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) cultivada en un Sistema Plant Factory ($\bar{x} \pm \text{DE}$, $n = 14$).

Figure 2. Total absorption of nutrients per plant, A) Cu and B) Zn, in the cultivation of baby romaine lettuce based on dry biomass (root + leaves) at 21 days after transplantation under three light intensity treatments ($t1 = 127.49 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; $t2 = 147.32 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $t3 = 235.69 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) grown in a Plant Factory System ($\bar{x} \pm \text{SD}$, $n = 14$).

dad de luz acumulada para la producción del mismo peso fresco (1,0 g) igual a 0,16; 0,12 y 0,13 mol·m⁻³ para el t1, t2 y t3, respectivamente.

En base a la producción de peso seco se establecieron los requerimientos de intensidad de luz acumulada y nutrientes requeridos (Tabla 5) para la producción de 201 plantas de lechuga romana tipo baby cultivadas en un volumen de 1 m³ en un periodo de 21 días

bajo el SPF. Esta información sirve para estimar la cantidad de biomasa que se producirá y los nutrientes requeridos, como por ejemplo, en un volumen de 10 m³ de producción en un Sistema Plant Factory (se producirán 114,771 kg de biomasa fresca equivalentes a 7,035 kg de biomasa seca bajo las condiciones de manejo de t3) se requerirán agregar 335 g de N, 39 g de P, 501 g de K, 90 g de Ca, 18 g de Mg, 0,2 g de Cu y 0,7 g de Zn.

Tabla 5. Requerimiento de intensidad de luz acumulada y nutrientes para la producción de 201 plantas de lechuga romana tipo baby cultivadas en un espacio de 1 m³ bajo el Sistema Plant Factory en un periodo de 21 días.

Table 5. Requirement of accumulated light intensity and nutrients for the production of 201 baby romaine lettuce plants grown in a space of 1 m³ under the Plant Factory System in a period of 21 days.

Tratamiento	Intensidad de luz acumulada (mol·m ⁻³)	N (g)	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)	Cu (g)	Zn (g)
t1	694,0	20,5	1,4	25,2	4,7	0,9	0,01	0,04
t2	801,9	24,6	2,9	33,7	5,5	1,1	0,01	0,05
t3	1282,9	33,5	3,9	50,1	9,0	1,8	0,02	0,07

Conclusiones

Una intensidad total de 235,69 μmol·m⁻²·s⁻¹ (t3 = rojo + azul + blanco) compuesta principalmente por los rangos 450-495, 495-570 y 620-750 nm del espectro electromagnético incrementaron ($p \leq 0,05$) de 40 a 59,09 % la producción de peso seco, de 47,16 a 125,69 % del peso fresco y de 12,32 a 25,19 % el número hojas con respecto a una intensidad total de 147,32 (t2 = rojo + azul) y 127,49 (t1 = rojo + azul) μmol·m⁻²·s⁻¹ (rangos de longitud de onda de 450-495 y 620-750 nm respectivamente). Así mismo en el t3 la absorción mineral de todos los elementos considerados presentó un aumento ($p \leq 0,05$) con base en t1 de 62,56 % N; 170,42 % P; 97,65 % K; 90,47 % Ca; 95,65 % Mg; 125 % Cu y 84,21 %

Zn y de 30,54 % N; 31,50 % P; 42,63 % K; 57,70 % Ca; 57,89 % Mg; 80 % Cu y 40 % Zn con respecto a t2.

Agradecimientos

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica (PAICYT) de la Dirección General de Investigación de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el financiamiento otorgado para el desarrollo de este proyecto de investigación y al Centro de Investigación en Química Aplicada por el apoyo en la caracterización del espectro electromagnético emitido por la fuente de iluminación artificial.

Referencias bibliográficas

- Almaguer-Sierra P, Rodríguez-Fuentes H, Barrientos-Lozano L, Mora-Ravelo SG, Vidales-Contreras JA (2014). Relación entre grados-día y la producción de *Opuntia ficus-indica* para consumo humano en Marín, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5: 1055-1065.
- Chen XL, Guo WZ, Xue XZ, Morewane MB (2014). Effects of LED spectrum combinations on the absorption of mineral elements of hydroponic lettuce. *Spectroscopy and Spectral Analysis* 34: 1394-1397. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2014\)05-1394-04](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2014)05-1394-04)
- Choi KY, Paek KY, Lee YB (2000). Effect of air temperature on tipburn incidence of butterhead and leaf lettuce in a plant factory. En: *Transplant Production in the 21st Century* (Eds. Kubota C, Chun C), pp. 166-171. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9371-7_27
- Dibb DW, Roberts TL, Welch RM (2005). De la cantidad a la calidad: la importancia de los fertilizantes en la alimentación humana. *Informaciones Agronómicas* 28: 1-8.
- Falovo C, Roupheal Y, Cardarelli M, Rea E, Battistelli A, Colla G (2009). Yield and quality of leafy lettuce in response to nutrient solution composition and growing season. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7: 456-462.
- Fang W, Jao RC (2000). A review on artificial lighting of tissue cultures and transplants. En: *Transplant Production in the 21st Century* (Eds. Kubota C, Chun C), pp. 108-113. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9371-7_17
- Fu W, Li P, Wu Y, Tang J (2012). Effects of different light intensities on anti-oxidative enzyme activity, quality and biomass in lettuce. *Horticultural Science* 39:129-134. <https://doi.org/10.17221/192/2011-HORTSCI>
- Hunter DC, Burritt DJ (2004). Light quality influences adventitious shoot production from cotyledon explants of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant* 40: 215-220. <https://doi.org/10.1079/IVP.2003492>
- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida SN, Yoshihara T (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience* 45: 1809-1814. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.12.1809>
- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hahida SN, Yoshihara T (2012). Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany* 75: 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.010>
- Kang JH, KrishnaKumar S, Atulba SLS, Jeong BR, Hwang SJ (2013). Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture, Environment and Biotechnology* 54: 501-509. <https://doi.org/10.1007/s13580-013-0109-8>
- Kasajima, SY, Inoue N, Mahmud R, Kato M (2008). Developmental responses of wheat cv. Norin 61 to fluence rate of green light. *Plant Production Science* 11: 76-81. <https://doi.org/10.1626/pp.s.11.76>
- Kim HH, Goins GD, Wheeler RM, Sager JC (2004). Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red-and blue-light-emitting diodes. *HortScience* 39: 1617-1622. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.7.1617>
- Kozai T, Ohshima K, Chun C (2006). Commercialized closed systems with artificial lighting for plant production. *Acta Horticulturae* 711: 61-70. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.5>
- Kozai T, Niu G, Takagaki M (2015). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Ed. Academic Press, London, Reino Unido. 405 pp.
- Lefsrud MG, Kopsell DA, Sams CE (2008). Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *HortScience* 43: 2243-2244. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.2243>
- Li Q, Kubota C (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental*

- Botany 67: 59-64. <https://doi.org/10.1016/j.enxpb.2009.06.011>
- Lin KH, Huang MY, Huang WD, Hsu MH, Yang ZW, Yang CM (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. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.10.002>
- Magalhães AG (2006). Caracterização de genótipos de alface (*Lactuca sativa* L.) em cultivo hidropônico sob diferentes valores de condutividade elétrica da solução nutritiva. Tesis Doctoral. Universidad Federal Rural de Pernambuco, Brasil. 96 pp.
- Mizuno T, Amaki W, Watanabe H (2011). Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings. *Acta Horticulturae* 907: 179-184. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.25>
- Ohashi-Kaneko K, Takase M, Kon N, Fujiwara K, Kurata K (2007). Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environmental Control in Biology* 45: 189-198. <https://doi.org/10.2525/ecb.45.189>
- Ohyama K, Yoshinaga K, Kozai T (2000). Energy and mass balance of a closed-type transplant production system (part 2). Water balance. *Journal of Society of High Technology in Agriculture* 12: 217-224. <https://doi.org/10.2525/jshita.12.217>
- Park YG, Park JE, Hwang SJ, Jeong BR (2012). Light source and CO₂ concentration affect growth and anthocyanin content of lettuce under controlled environment. *Journal Horticulture, Environment and Biotechnology* 53: 460-466. <https://doi.org/10.1007/s13580-012-0821-9>
- Rodas-Gaitán HA, Rodríguez-Fuentes H, Ojeda-Zacarías MC, Vidales-Contreras JA, Luna-Maldonado AI (2012). Curvas de absorción de macronutrientes en calabacita italiana (*Cucurbita pepo* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 35: 57-60.
- Rodríguez-Fuentes H, Rodríguez-Absi J, Almaguer-Sierra P, Rodríguez-Ortiz JC (2011). Cultivo hidropónico del Nopal. Ed. Trillas S.A. de C.V., México, D. F. 62 pp.
- Rodríguez-Fuentes H, Rodríguez-Absi J (2015). Métodos de análisis de suelo y plantas Criterios de interpretación. Ed. Trillas S. A. de C. V., México, D. F. 239 pp.
- Rodríguez-Fuentes H, Rodríguez-Ortiz JC, Vidales-Contreras JA, Luna-Maldonado AI (2016). Cultivo hidropónico de *Lilium* (Azucena): para flor de corte y en maceta. Ed. Trillas S. A. de C. V., México, D. F. 109 pp.
- Sago Y (2016). Effects of light intensity and growth rate on tipburn development and leaf calcium concentration in butterhead lettuce. *HortScience* 51: 1087-1091. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI10668-16>
- Savvas D, Passam HC (2002). Hydroponic production of vegetable and ornamentals. Ed. Embryo Publications, Greece, Egaleo. 463 pp.
- Shin YS, Lee MJ, Lee ES, Ahn JH, Lim JH, Kim HJ, Park HW, Um YG, Park SD, Chai JH (2012). Effect of LEDs (light emitting diodes) irradiation on growth and mineral absorption of lettuce (*Lactuca sativa* L. 'Lollo Rosa'). *Korean Journal of Bio-Environmental Control* 21: 180-185.
- Stutte GW, Edney S, Skerritt T (2009). Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes. *HortScience* 44: 79-82. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.1.79>
- Tarakanov I, Yakovleva O, Konovalova I, Paliutina G, Anisimov A (2012). Light-emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production. *Acta Horticulturae* 956: 171-178. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.17>
- Yanagi T, Okamoto K, Takita S (1996). Effect of blue and red light intensity on photosynthetic rate of strawberry leaves. *Acta Horticulturae* 440: 371-376. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1996.440.65>
- Yokoi S, Kozai T, Ohyama K, Hasegawa T, Chun C, Kubota C (2003). Effects of leaf area index of tomato seedling populations on energy utilization efficiencies in a closed transplant production system. *Journal of Society of High Technology in Agriculture* 15: 231-238.

Yokoi S, Kozai T, Hasegawa T, Chun C, Kubota C (2005). CO₂ and water Utilization efficiencies of a closed transplant production system as affected by leaf area index of tomato [*Lycopersicon esculentum*] seedling populations and the number of air exchanges. Journal of Society of High Technology in Agriculture 18:182-181.

Žukauskas A, Bliznikas Z, Breivė K, Novičkovas A, Samuolienė G, Urbonavičiūtė A, Brazaitytė A,

Jankauskienė J, Duchovskis P (2011). Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant properties of lettuce cultivars. Acta Horticulturae 907: 87-90. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.8>

(Aceptado para publicación el 5 de mayo de 2020)