



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Escuela Internacional de Doctorado
Departamento de Agronomía

Evaluación de algunos factores de calidad y cantidad de los espectros de radiación en las plantas

Cinthia Nájera Vázquez

2020





UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Escuela Internacional de Doctorado

Departamento de Agronomía

Doctorado en Tecnología de Invernaderos e Ingeniería
Industrial y Ambiental

TESIS DOCTORAL

**Evaluación de algunos factores de calidad y cantidad
de los espectros de radiación en las plantas**

Cinthia Nájera Vázquez

Almería, 2020



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Escuela Internacional de Doctorado

Departamento de Agronomía

Doctorado en Tecnología de Invernaderos e Ingeniería
Industrial y Ambiental

TESIS DOCTORAL

**Evaluación de algunos factores de calidad y cantidad de
los espectros de radiación en las plantas**

**Evaluation of certain quality and quantity factors
regarding solar radiation spectra in plants**

Memoria presentada por **Dña. Cinthia Nájera Vázquez** para aspirar al grado de **Doctor con Mención Internacional** por la Universidad de Almería.

Directores:

Catedrático Miguel Urrestarazu Gavilán
Departamento de Agronomía
Universidad de Almería, España

Dr. Juan Eugenio Álvaro Martínez-Carrasco
Escuela de Agronomía
Pontificia Universidad Católica de
Valparaíso, Chile

Almería, 2020



Universidad de Almería

Departamento de Agronomía

Carretera Sacramento s/n La Cañada de San Urbano 04120 Almería, España

Dr. D. Miguel Urrestarazu Gavilán, Catedrático de Producción Vegetal, del Departamento de Agronomía de la Universidad de Almería y el Dr. D. Juan Eugenio Álvaro Martínez-Carrasco, Profesor Investigador de Universidad, de la Escuela de Agronomía de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile

Informan que:

La presente Tesis Doctoral titulada “*Evaluación de algunos factores de calidad y cantidad de los espectros de radiación en las plantas*” (“*Evaluation of certain quality and quantity factors regarding solar radiation spectra in plants*”), presentada por Dña. **Cinthia Nájera Vázquez**, ha sido realizada bajo la dirección de ambos y cumple con las condiciones exigidas para optar al grado de **Doctor con Mención Internacional** por la Universidad de Almería, por lo que autorizan su presentación para que sea juzgada por el tribunal correspondiente

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firman el presente documento en Almería, a 10 de enero de 2020.

Fdo. Miguel Urrestarazu Gavilán

Fdo. Juan Eugenio Álvaro Martínez-Carrasco

Solo la ciencia, la tecnología y la productividad por hectárea podrán enfrentar el grandioso desafío que tiene por delante un planeta que se empobrece y cuya tierra agrícola y agua potable disminuyen año por año.

Fidel Castro

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) que me ha otorgado una beca para la realización de estudios de doctorado.

Muy especialmente a mi director, Dr. Miguel Urrestarazu por sus consejos y conocimientos transmitidos para la realización de este trabajo.

A mi codirector, Dr. Juan Eugenio Álvaro Martínez-Carrasco por todo el apoyo brindado para la realización de esta tesis doctoral.

Al Dr. Mario Reis y Luisa Cohelo de la Universidad do Algarve, Portugal, por haberme brindado la oportunidad de realizar una estancia de investigación en el área de Horticultura.

A mis compañeros de doctorado, Jesús y Victor, gracias por su apoyo, sin su ayuda los experimentos plasmados en esta tesis no hubieran sido posible.

A los profesores de la Universidad de Almería que de alguna manera me aportaron conocimientos para mi preparación investigadora y profesional, Diego Valera, Araceli Peña, Mila Santos, Fernando Diánez, María Teresa Lao, Juan Reca y José Luis Guil.

Dedicatoria

A Victor Manuel por todo el apoyo infinito, profesional y personal, que con cariño me ha dado.

A mi hija Ainhoa Maite, por ser mi inspiración para lograr mis metas y sueños, por cambiar mi vida, te amo. Y a ti, que vives aún dentro de mí. Son mi motor.

A mis padres Javier y Rosario, por haber formado mi persona tal cual soy; a mis hermanos: Francisco, Alejandro, Paulina y Wendy; a mis sobrinos Fernanda y Emilio; a Nayeli. A todos ellos, por soportar la distancia para la realización de mis sueños.

A mis suegros, que han sido parte fundamental en nuestra vida.

A mis abuelos que ya no están y que me entristece no poder contarles que he realizado mi tesis, sé que siempre estuvieron conmigo. Son mi ejemplo.

Reconocimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por otorgar una beca para la realización y obtención de los estudios de doctorado.

Publicaciones incluidas en la tesis y otras aportaciones científicas derivadas de esta tesis doctoral.

Esta Tesis se ha presentado como un compendio de publicaciones. A continuación, se detallan los artículos que la componen, así como las publicaciones que se han derivado directamente de la realización de esta Tesis Doctoral.

1. Artículos incluidos en la Tesis Doctoral

Urrestarazu, M., **Nájera, C.** and Gea, M. 2016. Effect of the Spectral Quality and Intensity of Light Emitting Diodes on Several Horticultural Crops. *HortScience* 51(3):268-271.

Nájera, C., Guil-Guerrero, J.L., Jarquín, L., Álvaro, J.E. and Urrestarazu, M. 2018. LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology* 145:151-156.

Nájera, C. and Urrestarazu, M. 2019. Effect of the intensity and spectral quality of light LED on yield and nitrate accumulation in vegetables. *HortScience* 54(10):1745-1750.

2. Otras publicaciones derivadas de la Tesis Doctoral

Nájera, C. y Urrestarazu, M. 2017. La revolución de la iluminación LED en la horticultura moderna. *Agricultura 2000, La Voz de Almería*, artículo de divulgación.

3. Participación en congresos

Nájera, C., Gallegos-Cedillo, V.M. y M. Urrestarazu. 2019. Efecto de la calidad de luz LED en plantas ornamentales en cultivo sin suelo. Presentación de póster y comunicación oral en el 1^{er} Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias. Celebrado el 20 de diciembre de 2018 en la Universidad de Almería, Almería, España.

4. Proyectos fin de carrera y Trabajos fin de máster derivados de la Tesis Doctoral

Efectos de las distintas longitudes de onda de luz sobre los parámetros de calidad del tomate cherry. Trabajo Fin de Grado. María José Tengo Noguera. Para obtener el título de Ingeniero Técnico Agrícola, Universidad de Almería, España. Septiembre 2018.

Efecto de la calidad de luz LED's en forraje verde hidropónico. Trabajo Fin de Grado. Juan Miguel Martínez. Para obtener el título de Ingeniero Técnico Agrícola, Universidad de Almería, España. Septiembre 2017.

Plantación y viabilidad del almendro "Prunus dulcis" en Almaciles, Granada. Fertirreigo y prácticas ecológicas como alternativa de producción. Trabajo Fin de Carrera. Antonio Román Salcedo. Para obtener el título de Ingeniero Técnico Agrícola, Industrias agrarias y alimentarias, Universidad de Almería, España. Febrero 2017.

Evaluación de la eficiencia energética de 3 tipos de plantas de interior en el uso de la luz artificial tipo led (light-emitting diode, "diodo emisor de luz"). Trabajo Fin de Carrera. José Manuel Arrebola Torres. Para obtener el título de Ingeniero Agrícola, Universidad de Almería, España. Diciembre 2016.

Efecto de la calidad de luz LED's en plantas de lechuga, tomate y pimiento en cultivo sin suelo. Trabajo Fin de Grado. Ma. Del Mar Gea Senés. Para obtener el título de Ingeniero Técnico Agrícola, Universidad de Almería, España. Mayo 2016.

Evaluación agronómica de crecimiento de plantas ornamentales en función de la intensidad y espectro de la luz. Trabajo Fin de Máster. María Teresa Galdeano Bejarano. Para obtener el título de Máster en Horticultura Mediterránea bajo Invernadero, Universidad de Almería, España. Septiembre 2016.

Resumen

En la actualidad, la agricultura se ha vuelto más exigente con las tecnologías aplicadas en ella, ya que constituyen un factor importante para la solución de problemas y de cambios con la producción, todo ello cubriendo las demandas de los consumidores. Las lámparas LED significan uno de los avances más importantes en tecnología de iluminación artificial para la horticultura. Estos sistemas, están irrumpiendo como técnica limpia y eficiente en la producción de alimentos en beneficio de la salud humana. El objetivo general de este trabajo fue evaluar el uso de iluminarias para aumentar su eficiencia y eficacia en la producción de hortalizas y ver su efecto en frutos o en hortalizas de hoja y raíz, tanto en calidad como en cantidad. Para el cumplimiento de este objetivo general planteado se realizaron cuatro objetivos específicos en experimentos diferentes: 1) Evaluar la eficiencia agronómica y energética de las lámparas de diodos emisores de luz (LED) fabricadas para uso hortícola utilizando un espectro continuo ajustado a una respuesta fotosintética máxima contra luces blancas convencionales a dos intensidades de luz diferentes. Los resultados demostraron que, las lámparas LED específicas para horticultura con un espectro mejorado de luz en comparación con las lámparas LED convencionales aumentaron la eficiencia energética de las hortalizas evaluadas en un 26%. En las dos intensidades de luz estudiadas, el crecimiento de las plantas estaba más relacionado con el ajuste espectral de la luz a la respuesta fotosintética. 2) Evaluar el espectro de iluminación de tres diferentes tipos de lámparas LED sobre los parámetros de calidad organoléptica, comercial y calidad dietética en postcosecha de seis variedades de frutos de tomate. Todas las variedades aumentaron la proporción del contenido de licopeno entre un 30% y un 60% frente a la oscuridad. Las iluminarias de mayores ratios R:FR favorecieron los parámetros de firmeza frente a otra iluminaria blanca LED, siendo la iluminaria LED de mayor ratio R:FR la que favoreció también a la acidez titulable. 3) Evaluar el efecto de espectros de LED usados en iluminación artificial en horticultura, sobre la acumulación de nitratos en hortalizas de hojas y raíz en comparación con iluminarias de LED blanca convencional. El contenido de nitrato disminuyó generalmente al incrementar la intensidad. Solo en un caso, la intensidad alta en el cultivo de remolacha, el tratamiento control mostró una reducción del contenido de nitratos frente al tratamiento de luz LED evaluado. Por lo que en general se registró una significativa e importante reducción del contenido de nitratos a favor del tratamiento LED evaluado. Las disminuciones de nitrato fueron entre un 10% y 35% en las hortalizas evaluadas. 4) Evaluar los efectos de la cantidad y calidad de la luz LED en la producción y calidad nutricional de forraje verde hidropónico en tres cereales comerciales y su efecto en la eficiencia energética y productiva en condiciones controladas. La utilización de iluminación LED con espectros específicos del T2 y T3 en la producción de forraje verde hidropónico beneficia la

productividad e incrementa la eficiencia del uso de agua y energía, y potencia la conversión de semillas a forraje en las tres especies forrajeras evaluadas. Como conclusión general de este trabajo se puede decir que, en el futuro, la cantidad y la homogeneidad de los nutraceúticos y la fisiología podrá ser determinada y elegida para los diferentes cultivares y una luminotecnia medioambientalmente sostenible nos permitirá modular la naturaleza y contenidos saludables de la producción agrícola sostenible.

Abstract

Nowadays, agriculture has become more demanding with regard to the use of technologies. This is because they play an important role in finding solutions to problems and changes in productions, all in response to consumer demand. Light-emitting diode (LED) lamps are one of the most important advances in artificial lighting for horticulture. These systems have established themselves as clean and efficient food production techniques that benefit human health. The general objective of this work is to evaluate the use of lighting in increasing the efficiency and effectiveness of horticultural production and to observe their effect on fruits, and leaf and root vegetables, both in terms of quality and quantity. In order to achieve this general goal, four specific objectives were set out in different experiments: 1) To evaluate the agronomic and energetic efficiency of LED lamps manufactured for horticultural use compared to conventional LED lamps, using a continuous spectrum adjusted to the maximum photosynthetic response at two different light intensities - the results showed that the horticultural LED lamps, which have an improved light spectrum, increased the energy efficiency of the tested vegetables by 26%. At both the light intensities studied, plant growth was more related to the light's spectral adjustment to the photosynthetic response. 2) To evaluate the light spectrum of three different types of LED lamps on the organoleptic, commercial and dietary qualities of the tomato fruit of six cultivars during the postharvest stage - all varieties increased their proportion of lycopene by 30 to 60% compared to being in the dark. The lights with the highest R:FR ratio favoured more the firmness parameters compared to other white LED lights; they also favoured titratable acidity. 3) To evaluate how the LED spectra used in artificial lighting for horticulture affect the accumulation of nitrates in leaf and root vegetables compared to the effect of white LED lighting - the nitrate content generally decreased with increased intensity. Only in one case (high intensity lighting on a beetroot crop), did the control treatment (T0) show a reduction in the nitrate content compared to the LED treatment evaluated (T1). Overall, there was a significant and important reduction in the nitrate content in favour of the LED treatment. Nitrate reductions were between 10% and 35% in the vegetables tested. 4) To evaluate the effects of the LED lighting's quantity and quality on the nutritional production and quality of hydroponically grown green fodder in three commercial cereals, and its effect on energy and production efficiency under controlled conditions - using LED lighting with the T2 and T3-specific spectra for the production of hydroponically grown green fodder benefitted productivity and increased water and energy-

use efficiency as well as enhancing the conversion of seeds to fodder in the three fodder species tested. As a general conclusion of this work, in future, the quantity and homogeneity of nutraceuticals along with the physiology can be determined and chosen for the different cultivars. Environmentally sustainable lighting technology will allow us to modulate the nature and healthy contents of sustainable agricultural products.

Índice general

Resumen	IV
Abstract.....	VI
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Importancia de la luz en los cultivos hortícolas	2
1.2 Iluminación LED en agricultura.....	4
1.3 Importancia del espectro en la iluminación	8
1.4 Literatura citada	9
2. OBJETIVO GENERAL.....	13
3. CAPÍTULO 1	14
Efecto de la calidad de luz LED en plantas de lechuga, tomate y pimiento en cultivo sin suelo.....	14
Resumen	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Materiales y métodos.....	16
3.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo.....	16
3.2.2 Tasa neta de fotosíntesis y EE.....	17
3.2.3 Tratamientos, dispositivos LED e intensidades de luz.....	18
3.2.4 Análisis estadístico.....	18
3.3 Resultados y discusión	21
3.3.1 Efectos de la calidad de la luz sobre los parámetros de luz	21
3.3.2 Efecto de la calidad de la luz en los parámetros de crecimiento de las plantas	21
3.3.3 Efecto de la calidad de la luz sobre P_n y de la EE.....	24
3.4 Literatura citada.....	25
4. CAPÍTULO 2.....	28
Mejora de las cualidades dietéticas y organolépticas por medio de lámparas LED en tomate en postcosecha	28
Resumen	29
4.1 Introducción.....	29
4.2 Materiales y métodos.....	31
4.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento	31
4.2.2 Tratamientos de espectros de luz LED.....	32
4.2.3 Calidad comercial.....	34
4.2.4 Calidad organoléptica	34
4.2.5 Determinación de licopeno	34
4.2.6 Diseño experimental y análisis estadístico.....	35
4.3 Resultados y discusión	35
4.3.1 Parámetros de irradiación de las iluminarias	35
4.3.2 Efectos sobre los parámetros de calidad comercial y propiedades organolépticas	35
4.3.3 Contenido de licopeno.....	39
4.3.4 Correlación iluminaria y licopeno.....	39
4.4 Literatura citada.....	42
5. CAPÍTULO 3.....	47
Efecto de la intensidad y calidad espectral de la luz LED sobre el rendimiento y la acumulación de nitratos en las hortalizas	47
Resumen	48
5.1 Introducción.....	48

5.2	Materiales y métodos.....	51
5.2.1	Tratamiento de LED.....	51
5.2.2	Experimentación y material vegetal.....	51
5.2.2.1	Experimento 1	51
5.2.2.2	Experimento 2	51
5.2.3	Cosecha	51
5.2.4	Análisis de nitrato	52
5.2.5	Análisis estadístico.....	52
5.3	Resultados y discusión	52
5.3.1	Peso fresco	52
5.3.2	Efecto en el contenido de nitratos	55
5.3.2.1	Efecto en especies vegetales	55
5.3.2.2	Efecto en variedades intraespecíficas de lechuga	58
5.4	Literatura citada.....	61
6.	CAPÍTULO 4.....	68
	Efecto del espectro de luz LED sobre el forraje verde hidropónico.....	68
	Resumen	69
6.1	Introducción.....	69
6.2	Materiales y métodos.....	72
6.3	Resultados y discusión	75
6.4	Literatura citada.....	91
7.	Conclusiones.....	98
7.1	Capítulo 1	98
7.2	Capítulo 2	98
7.3	Capítulo 3	99
7.4	Capítulo 4.....	100
7.5	Conclusiones Generales	100
8.	Conclusion	101
8.1	Chapter 1	101
8.2	Chapter 2	101
8.3	Chapter 3	102
8.4	Chapter 4	103
8.5	General Conclusion.....	103
9.	Apéndice	104
9.1	CHAPTER 1	105
9.1.1	Introduction	106
9.1.2	Materials and Methods	107
9.1.2.1	Plant material and growth conditions.....	107
9.1.2.2	Net photosynthesis rate (P_n) and energy efficiency.	107
9.1.2.3	Treatment, LED devices and light intensities.	108
9.1.2.4	Statistical analysis	109
9.1.3	Results and Discussion	111
9.1.3.1	Effect of light quality on light parameters	111
9.1.3.2	Effect of light quality on the parameter of plant growth.....	111
9.1.3.3	Effect of light quality on net photosynthetic rate and energy efficiency	114
9.1.4	Literature Cited.....	115
9.2	CHAPTER 2	118
9.2.1	Introduction	119
9.2.2	Materials and methods.....	120
9.2.2.1	Plant materials and growth conditions	120

9.2.2.2 Exposure to LED light	121
9.2.2.3 Commercial quality	122
9.2.2.4 Organoleptic quality	123
9.2.2.5 Dietary quality of fruit	123
9.2.2.6 Experimental design and statistical analysis	123
9.2.3 Results and discussion	124
9.2.3.1 Irradiation parameters for illumination	124
9.2.3.2 Effects on commercial quality parameters and organoleptic properties	124
9.2.3.3 Dietary quality: lycopene	127
9.2.3.4 Illumination and lycopene correlation	127
9.2.4 Literature cited.....	130
9.3 CHAPTER 3	135
9.3.1 Introduction	136
9.3.2 Materials and methods.....	138
9.3.2.1 LED treatments	138
9.3.2.2 Experiments and vegetable material	138
Experiment 1	138
Experiment 2	138
9.3.2.3 Harvest	138
9.3.2.4 Nitrate analysis.....	139
9.3.2.5 Statistical analysis	139
9.3.3 Results and discussion	139
9.3.3.1 Fresh weight	139
9.3.3.2 Effect in nitrate content.....	141
Effect on species vegetables.....	141
Effect in intraespecífic lettuce varieties	143
9.3.4 Literature cited.....	146

Índice de Figuras

Introducción

Fig. 1. Esquema de fotosíntesis de las plantas.....	2
Fig. 2. Media anual de energía solar a nivel mundial (1983-2005).....	3
Fig. 3. Producción y rendimiento de hortalizas frescas en el mundo.	5
Fig. 4. Mapa de distribución de producción de hortalizas frescas en el mundo, 2017.....	5
Fig. 5. Tendencia de investigación de iluminación LED en agricultura.	6
Fig. 6. Distribución del espectro visible.	8

Capítulo 1

Fig. 1. Espectros específicos iluminarias LED.....	20
----------------------------------------------------	----

Capítulo 2

Fig. 1. Espectro de luz LED.	33
Fig. 2. Color y contenido de licopeno en diferentes tratamientos de luz LED de seis distintas variedades de tomate en postcosecha.	38
Fig. 3. Relación entre la concentración de licopeno en tomate	41

Capítulo 3

Fig. 1. Contenido de nitratos acorde a la calidad espectral de dos intensidades de luz LED (L y H) de seis variedades de hortalizas.	58
Fig. 2. Contenido de nitratos acorde a la calidad espectral de dos intensidades de luz LED (L y H) de cuatro variedades intraespecíficas de lechuga.	61

Capítulo 4

Fig. 1. (A) Cámara de cultivo; (B) distribución de los tratamientos de LED en cada sección; y (C) detalle de la medida de la luz. Diseñado en Solidworks®.	73
Fig. 2. Tratamientos espectrales de luz LED usados. T0 = L18 T8 Roblan®; T1 = L18 NS1 Valoya®; T2 = L18 AP67 Valoya®; and T3 = L18 AP673L Valoya®.	76
Fig. 3. Parámetros de eficiencia del forraje en dos intensidades de luz LED [Bajo (L) y Alto (H)] de tres cereales.	87
Fig. 4. Parámetros nutricionales en tres especies de forrajes obtenidas con dos métodos analíticos a dos intensidades de iluminación [3(L) y 6(H) lámparas].	90

Índice de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1. Datos luz con dos lámparas de diodo emisor de luz (LED) e intensidades de luz [4 (L) y 6 (H), unidades m^{-2}] y gasto de energía eléctrica (kWh m^{-2}).	19
Tabla 2. Efecto de la intensidad de luz y composición espectral en parámetros de crecimiento de cuatro vegetales. T0 es luz LED blanca y T1 es la LED de espectro específico para cultivos hortícolas.	23
Tabla 3. Efecto de la intensidad de luz y la composición espectral en parámetros de área foliar de cuatro vegetales.	24
Tabla 4. Efecto de la intensidad de luz y la composición espectral en la fotosíntesis (P_n) y en la eficiencia energética (EE) de cuatro vegetales.	25

Capítulo 2

Tabla 1. Densidad del flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), iluminancia (lux) y ratio de los tratamientos de luz LED usados.	33
Tabla 2. Parámetros de calidad de seis variedades de tomate.	37

Capítulo 3

Tabla 1. Efecto de la intensidad lumínica y composición espectral en el peso total de la parte comestible (g planta^{-1} peso fresco) de seis vegetales.	54
Tabla 2. Efecto de la intensidad lumínica y composición espectral en el peso total de la parte comestible (g planta^{-1} peso fresco) de cuatro variedades de lechuga.	55

Capítulo 4

Tabla 1. Datos de lámparas LED e intensidades de las lámparas [3 (L) and 6 (H) lámparas m^{-2}], densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), iluminancia (lux) y ratios de los tratamientos LED.	76
Tabla 2. Efecto de la intensidad y espectro sobre los parámetros de crecimiento del forraje verde hidropónico.	79
Tabla 3. Efecto de la intensidad y espectro sobre el peso fresco (PF) y materia seca (MS) de tres especies de forraje verde hidropónico.	83

Abreviaturas en el texto

ANOVA	Análisis de la Varianza
AS	Asparagina Sintetasa
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades
ATSDR	Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria
°C	Grados centígrados
CIE	Comisión Internacional de Iluminación
cv	Cultivar
EC	Comisión Europea
EE	Eficiencia Energética
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FAOSTAT	Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
g	Gramos
GOGAT	Glutamato Sintasa
GS	Glutamina Sintetasa
H	Intensidad alta de iluminación
h	Horas
HPLC	Cromatografía de líquidos de alta resolución
kg	Kilogramos
kW	Kilovatios
kW h	Kilovatios hora
L	Intensidad baja de iluminación
L	Litros
LA	Área Foliar
LED	Diodo emisor de luz
lux	Iluminación
m	Metro
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
mg	Miligramos
mg NO ₃ ⁻ kg ⁻¹	Miligramos de nitrato por kilogramo de peso fresco
min	Minutos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
MSE	Eficiencia Espectral por McCree
n	Muestra de elementos analizados estadísticamente
NaOH	Hidróxido de Sodio
nm	Nanómetros
ns	No significativo
PAR	Radiación Fotosintéticamente Activa
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución
P _n	Tasa Neta de Fotosíntesis
PPF	Flujo de Fotones Fotosintéticos (μmol m ⁻² s ⁻¹)

PPFD	Densidad del Flujo de Fotones Fotosintéticos
PS	Peso Seco
R:FR	Ratio del Espectro de color rojo y rojo lejano
s	Segundo
SE	Eficiencia Espectral
SLA	Área Foliar Específica
TDW	Peso Seco Total
TSS	Sólidos Solubles Totales
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Micro mol metro cuadrado por segundo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL



1.1 Importancia de la luz en los cultivos hortícolas

Las plantas para poder producir compuestos orgánicos que emplean para su desarrollo y crecimiento utilizan CO_2 y H_2O mediante la fotosíntesis a través de la energía luminosa (Yepes y Silveira, 2011). Por lo que, la luz influye directamente en la naturaleza para producción de materia vegetal.

La fotosíntesis es, por lo tanto, un proceso fisicoquímico mediante el cual las plantas utilizan la energía luminosa para sintetizar compuestos orgánicos (Urria, 2009). En el esquema de la Fig.1 se muestra de manera gráfica el proceso de la fotosíntesis en las plantas.

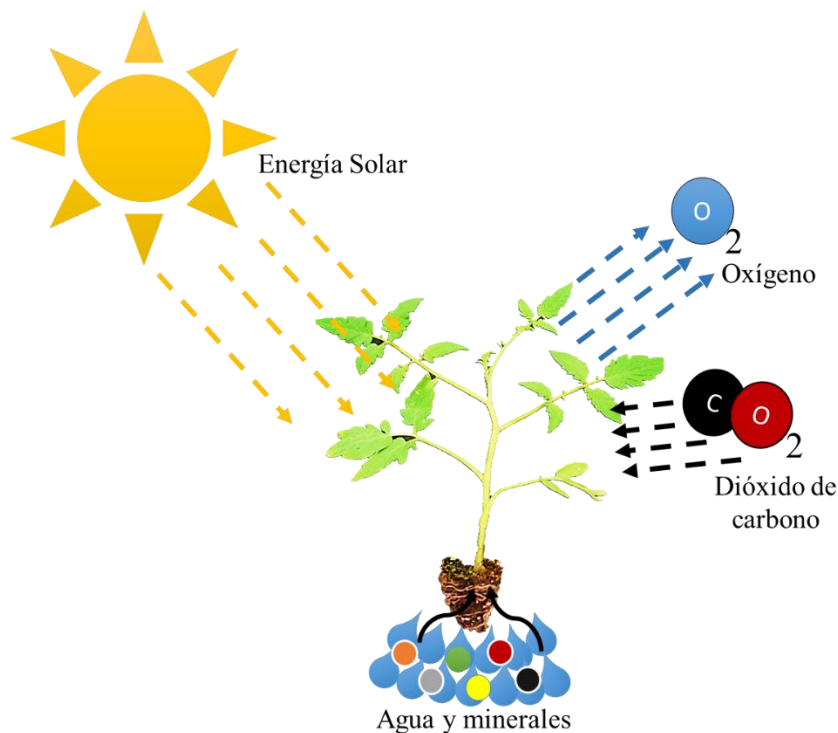


Fig. 1. Esquema de fotosíntesis de las plantas.

Así pues, la energía solar es, una herramienta indispensable para las plantas y su reproducción. Las plantas son capaces de reaccionar a la intensidad luminosa mediante sus fotorreceptores (fitocromos, criptocromos y fototropinas) que se activan con longitudes de onda específicas (Liu, 2012; Zhang y Folta, 2012; Paniagua-Pardo et al., 2015). Los fotorreceptores actúan de manera precisa para controlar las condiciones ambientales a las que se enfrentan las plantas (Chen et al., 2004).

La fotosíntesis además de ayudar al crecimiento vegetal y a la generación de biomasa, también ayuda a la germinación y a la floración, entre otras funciones, que también dependen de la luz, no tanto en su cantidad sino en la calidad (Burés et al., 2018).

Por lo tanto, las diferentes condiciones de luminosidad a la que nos enfrentamos en la realidad es un desequilibrio para la agricultura; ya que cada lugar del mundo tiene luminosidad e intensidad solar diferente, la Fig. 2 muestra la media anual de energía solar mundial obtenida en veinte años por la NASA (2008).

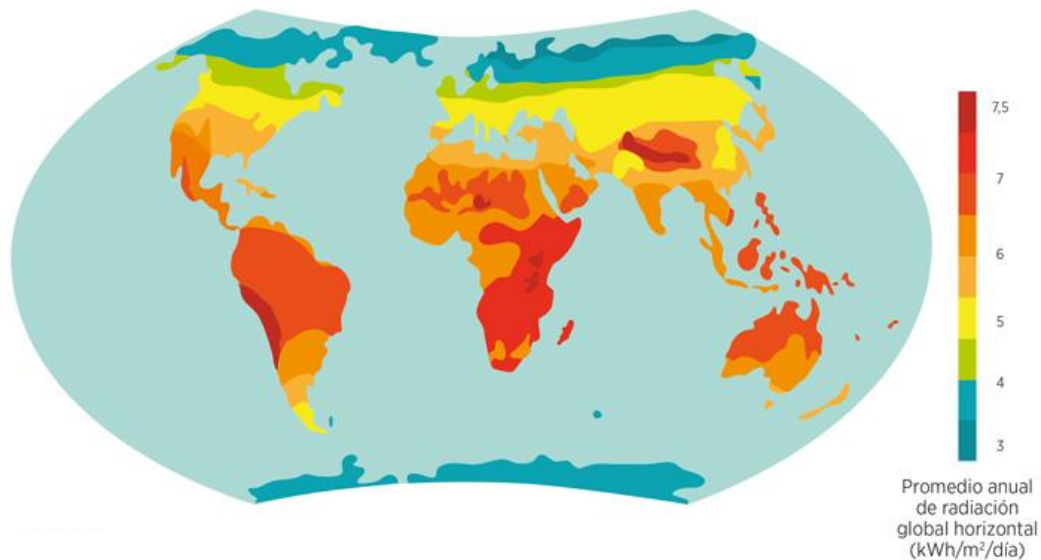


Fig. 2. Media anual de energía solar a nivel mundial (1983-2005). Fuente: NASA, 2008.

Se puede observar que, las condiciones de luz varían dependiendo la ubicación en la que se desee producir algún cultivo, así como también afectarán las condiciones de temperatura. El cambio climático también ha provocado cambios en la naturaleza como, por ejemplo: aumento de las temperaturas, sequías e inundaciones (Yepes y Silveira, 2011), y como consecuencia, cambios en las formas de producción de agricultura, llevando a la adaptación de las necesidades que se presente. Estas limitantes cada día vienen tomando importancia, por lo que se han desarrollado nuevos sistemas de producción con iluminación artificial, en las que los cultivos no necesitan exposición directa al sol, ni tampoco es un factor limitante las condiciones meteorológicas a las que se exponga el cultivo. Estas nuevas tecnologías definen una estrategia de producción segura y van cambiando los modelos de negocio de la agricultura tradicional, convirtiéndose en una importante herramienta para reducir espacio y tiempo, así como también reducir la cantidad de sustrato y agua a utilizar (Singh et al., 2015).

Estos sistemas nuevos son en lugares cerrados y controlados, aunque en algunos lugares son en invernaderos con iluminación complementaria a la natural, cuando la fuente de luz

natural no es suficiente, o bien, cuando el objetivo es alargar la duración del día, intentando sustituir la iluminación solar (Burés et al., 2018).

La iluminación se suministra con lámparas, en un principio de estos sistemas se usaban lámparas fluorescentes y/o lámparas de alta presión de sodio (HPS), para algunos agricultores e investigadores les resultaba costoso y con alto gasto energético, o bien, no correspondía a las necesidades de las plantas (Van der Velden y Smit, 2013; Singh et al., 2015), por lo que se ha optado por iluminación LED (diodos emisores de luz) que tiene un espectro específico, bajo consumo energético, emite menos calor, vida útil alta y son más nobles con el medio ambiente.

1.2 Iluminación LED en agricultura

Desde el inicio de las prácticas agrícolas en diferentes regiones del mundo, hace más de 12000 años (Stanghellini et al., 2019) se ha buscado mejorar las condiciones para aumentar la productividad en los cultivos, así como también se han buscado alternativas para que los alimentos que se produzcan sean cada vez más sanos, sin alterar su naturaleza.

En el caso de las técnicas agrícolas en Mesoamérica, se desarrollaron técnicas innovadoras para mejorar la productividad en los cultivos, debido a la escases de alimentos que se presentó por el incremento de la población (Duffetel, 2008). Esta técnica se realizó con chinampas, las cuales eran estructuras de suelo sobre lagos, buscando opciones agrícolas que fueran exitosas para diferentes cultivos hortícolas (Baca, 1983; Ebel, 2020). Las chinampas tuvieron tanta importancia en la mejora de técnicas agrícolas y en el abastecimiento de alimentos en México que se decidió integrarlas en el escudo nacional. El artículo 2do de la Ley sobre el escudo, la bandera y el himno nacional (DOF, 1984) describe a las chinampas como una peña que emerge sobre un lago, de donde nace un nopal (*Opuntia ficus-indica*), que es una hortaliza.

La agricultura en el mundo ha ido creciendo en los últimos años, la FAO (FAOSTAT, 2019) ha registrado un incremento de hortalizas frescas en cuanto a producción (t) y área cosechada (ha) del 11% para ambos casos, del año 2010 al 2017 a nivel mundial (Fig. 3). Datos que ponen de manifiesto que la oferta de cultivos se va adaptando a la creciente demanda de alimentos.

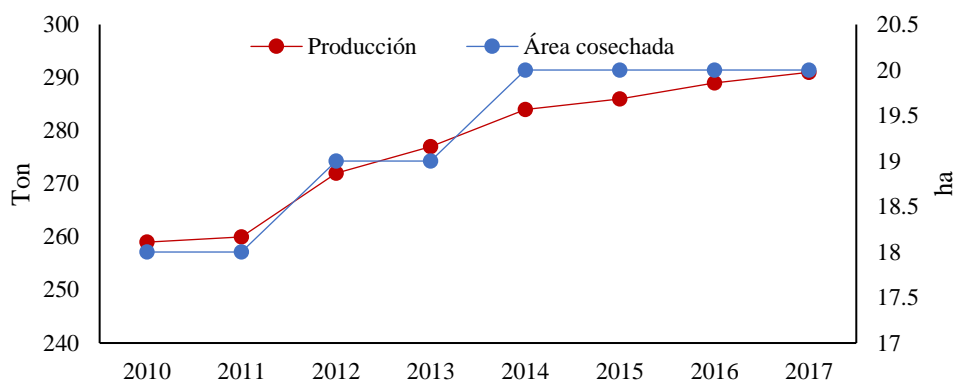


Fig. 3. Producción y rendimiento de hortalizas frescas en el mundo. Fuente: FAOSTAT, 2019.

La Fig. 4 muestra la situación actual de la agricultura hortícola y la distribución de la producción total de hortalizas frescas en el mundo, se observa una homogeneidad de la producción sin importar la ubicación geográfica, excepto China, India y Nigeria que superaron al resto de países en el 2017 (FAOSTAT, 2019). Sin embargo, se observa que no existe una relación directa entre la radiación solar global (Fig. 2) con la producción de hortalizas frescas (Fig. 4), esto puede ser debido a que, países con baja radiación solar natural, consiguen igualar las producciones de hortalizas, posiblemente por la utilización de tecnologías que complementan la iluminación natural con el uso de luz artificial.

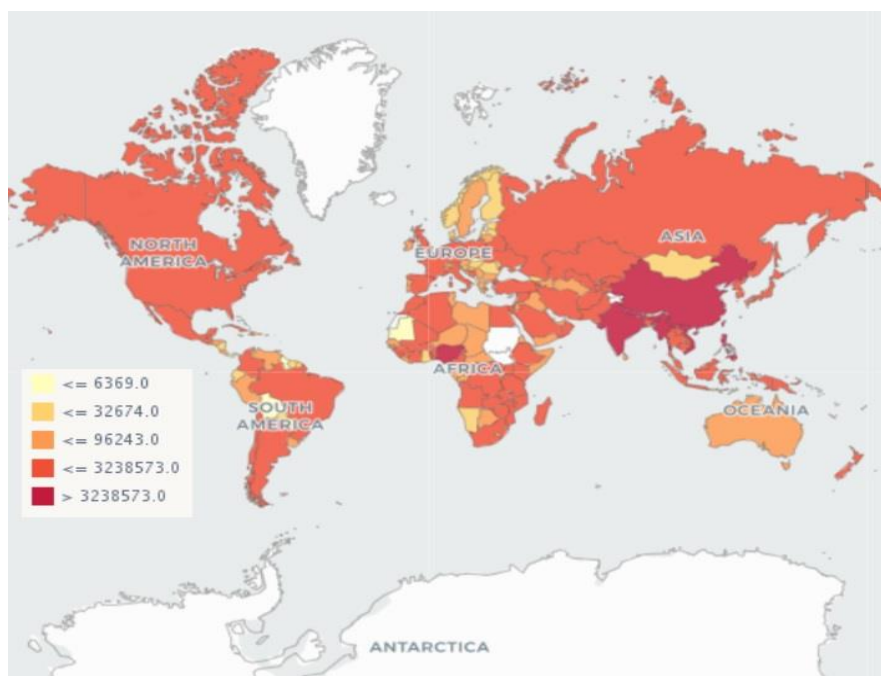


Fig. 4. Mapa de distribución de producción de hortalizas frescas en el mundo (t), 2017. Fuente: FAOSTAT, 2019.

Los sistemas con lámparas LED han permitido que las plantas se desarrollen de una manera controlada y sustentable, sin necesidad de utilizar fungicidas tóxicos para la salud

humana intentando reducir o eliminar plagas y enfermedades (Demotes-Mainarda et al., 2016).

Las lámparas LED han convertido a la agricultura en una actividad que no dependa de las condiciones medioambientales, por lo que, este desarrollo ha llevado a garantizar la alimentación humana o animal en cualquier época del año y en cualquier lugar, encontrando la solución al reto de la agricultura que en la actualidad tiene a la demanda de alimentos y a aumentar la seguridad alimentaria, con el futuro crecimiento demográfico (8,300 millones de personas para el 2030) y la escasez de los recursos hídricos (FAO, 2013).

En los últimos años la investigación ha tomado importancia al tema de estudio de este trabajo, se ha visto un aumento en el uso de las lámparas LED en investigaciones relacionadas con la agricultura (Fig. 5). Realizando una búsqueda con el título “light AND led AND agriculture” del 2000 al 2019, los trabajos (artículos científicos, resúmenes, artículo de conferencia, libros y capítulos de libros) registrados en la plataforma científica de búsqueda Scopus (limitando la búsqueda en ciencias agrícolas y biológicas) se ha registrado un incremento de investigaciones de luces LED a partir del año 2010, desde ese año las investigaciones sobre iluminación LED han alcanzado 30 publicaciones en 2016, mientras que del 2000 al 2008 la media de publicaciones al año era 1,8.

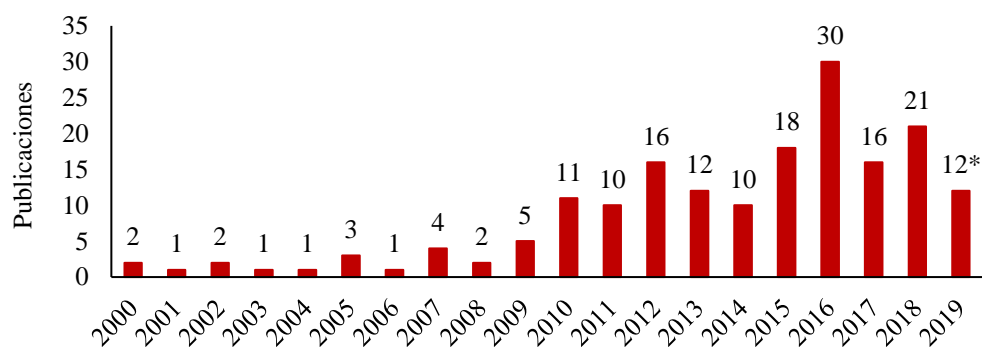


Fig. 5. Tendencia de investigación de iluminación LED en agricultura. Fuente: Elaboración propia con datos de Scopus, 2019. *Consultado el 09 de julio de 2019.

No solo en investigación ha aumentado el uso de luces LED, sino también en la práctica. En los Países Bajos, el establecimiento de luz LED en los invernaderos se inició en el 2012 con 4 ha de iluminación LED sólo como proyecto piloto (Van der Velden y Smit, 2013), pero en la actualidad, casi el 80% de la superficie invernada con iluminación complementaria usa lámparas LED (Van der Velden y Smit, 2016). Cabe señalar que el inicio de la agricultura con iluminación complementaria fue para el cultivo de *Cannabis sativa* en los años 70's en los Países Bajos (Marcelis, 2019).

En España el uso de la agricultura con iluminación complementaria se está desarrollando en condiciones específicas (invierno) para cultivos o técnicas concretas de agricultura en espacios cerrados, por ejemplo, en semilleros hortícolas para injertos. El Ministerio de Agricultura de España tiene registrados 1188 productores de plántula hortícola en todo el territorio nacional (MAPA, 2019). Del total de productores nacionales de plántula hortícola en España, casi el 15% se encuentra registrado en Andalucía y el 6% en la provincia de Almería, sin embargo, no se tiene contabilizado el porcentaje de semilleros que utilizan iluminación complementaria para sus técnicas agrícolas, a pesar de que algunos semilleros tienen más de diez años usando esta tecnología (según agricultores), empleando un fotoperiodo de 24 horas por cuatro a siete días en injertos. Algunos semilleros usan LED blanca en la totalidad y otros combinan LED roja y blanca.

El proceso de producción donde más se emplean las iluminarias LED son en la agricultura vertical o urbana (“vertical farming”) donde se establecen características específicas del sistema: producción de frutas, verduras y cereales dentro de un área limitada de espacio, producción en cualquier lugar, garantía de calidad y cantidad, costos dos o tres veces más altos que en agricultura convencional, sistema sostenible (aunque necesita suministro alto de electricidad) y control total del proceso de producción de manera robotizada (Al-Chalabi, 2015; Stanghellini et al., 2019).

La agricultura vertical no es un concepto nuevo, pero según Al-Chalabi (2015), la idea de cultivar dentro de un edificio y a gran escala, que pueda estar en medio de una ciudad, sí es nuevo, donde apenas en el año 2009 se ha estudiado un prototipo arquitectónico en el que se desarrolle de mejor manera este sistema de producción (Kurasek, 2009; Jan-Loman, 2016.). La agricultura vertical controlada es una técnica para ciudades futuristas, donde la agricultura juega un papel importante a la mano con la tecnología, en este sistema el uso de la iluminación complementaria es un requisito, porque cubre las necesidades fisiológicas de las plantas.

Este sistema puede ser hasta 15 veces más productivo que en fincas rurales, la cual está siendo desarrollada y practicada por 800 millones de personas en todo el mundo (FAO, 2019) ya sea para autoconsumo o para comercialización. Donde apenas un metro cuadrado puede suponer 20 kg de comida anuales (FAO, 2019).

Investigadores en los últimos años han enfocado sus investigaciones en las lámparas LEDs, no solo a la cantidad de iluminación necesaria, sino a calidad del espectro emitido.

1.3 Importancia del espectro en la iluminación

El espectro visible es una región del espectro electromagnético que el ojo humano logra percibir, también llamada luz visible. Se emite en una longitud de onda entre 380 a 750 nm, cada color visible se emite en un valor específico de la longitud de onda (Fig. 6).

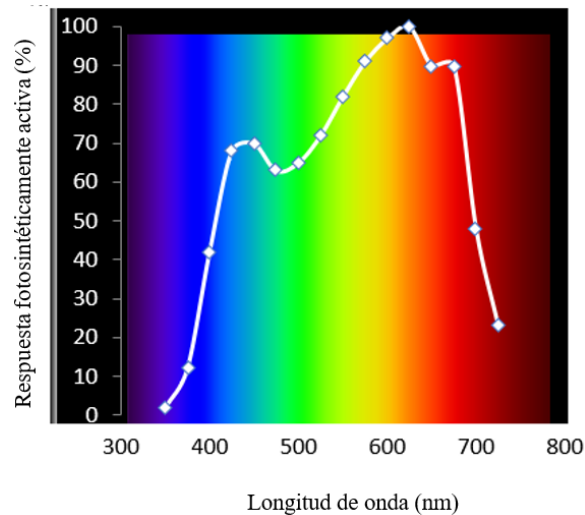


Fig. 6. Distribución del espectro visible.

El espectro es tan importante como la cantidad de luz a suministrar en las plantas (Burés et al., 2018). Gracias a los innumerables avances tecnológicos y comerciales, es posible modificar el espectro de la luz hasta conseguir tener el adecuado para cambiar el medio de crecimiento de las plantas, con ello, se consigue la adaptación de las plantas con lo que se refleja a su alrededor para que la energía sea aprovechada mediante la fotosíntesis (Burés et al., 2018; Stanghellini et al., 2019).

Las plantas controlan su morfología utilizando receptores (Ballare y Casal, 2000) y las iluminarias LED emiten luz casi monocromática (Massa et al., 2008), sin embargo, las condiciones de luz son diferentes entre las especies de plantas (Olle y Virsile, 2013), ya que el crecimiento y desarrollo de las plantas, va en función de la calidad de luz suministrada. Así pues, se han realizado investigaciones en los últimos años en los que se ha concluido que la luz azul es óptima para el alargamiento de tallo de algunas plantas como tomate, berenjena y girasol (Hirai et al., 2006; Li et al., 2017); la luz verde es óptima para el aumento del peso seco de las raíces (Johkan et al., 2012); y la luz roja mejoró la calidad organoléptica de los frutos (Nájera et al., 2018; Mochizuki et al., 2019).

Por todos los beneficios que se han encontrado en la literatura a través de la incorporación de iluminarias LED en la horticultura, se ha tenido gran interés en desarrollar esta tesis

doctoral, que está conformada por cuatro capítulos de investigaciones independientes. En el capítulo 1 se investigaron las ventajas y beneficios del uso de la iluminación LED en cultivos hortícolas; en el capítulo 2, el beneficio de la aplicación de la iluminación LED con espectros específicos que potencian la acumulación de compuestos benéficos en los frutos de tomate en postcosecha; en el capítulo 3, el efecto que ejercen el espectro y cantidad de iluminación LED en diferentes hortalizas de hoja respecto a la acumulación de nitratos en beneficio de la salud humana; y en el capítulo 4, se pusieron a prueba cuatro espectros diferentes para la producción de forraje verde hidroónico, así como también se comparó el efecto que ejercen los espectros en el nitrato del forraje para mejorar su calidad. Por todo ello, se ha planteado un objetivo general con objetivos específicos para cada investigación.

1.4 Literatura citada

- Al-Chalabi, M. 2015. Vertical farming: Skyscraper sustainability? *Sustain Cities Soc* 18:74-77.
- Baca, C.G.A. 1983. Efecto de la solución nutritiva, la frecuencia de los riegos, el sustrato y la densidad en cultivos hidropónicos al aire libre de pepino, melón y jitomate. Centro de Edafología. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Ballare, C.L., J.J. Casal. 2000. Light signals perceived by and weed plants. *Field Crops Res* 67:149–160.
- Burés, S., M. Urrestarazu, S. Kotiranta. 2018. Iluminación artificial en agricultura. Artículo técnico. Biblioteca horticultura. <http://www.bibliotecahorticultura.com>.
- Chen, M., J. Chory, C. Fankhauser. 2004. Light signal transduction in higher plants. *Annu Rev Genet* 38:87-117.
- Demotes-Mainard, S., T. Péron, A. Corot, J. Bertheloot, J.L. Gourrierc, S. Pelleschi-Travier, L. Crespel, P. Morel, L. Huché-Thélier, R. Boumaza, A. Vian, V. Guérin, N. Leduc, S. Sakr. 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environ Exp Bot* 121:4-21.
- DOF, 1984. Diario Oficial de la Federación. Ley sobre el escudo, la bandera y el himno nacionales. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. Pp. 41. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/213_301118.pdf.

- Duffetel, D. 2008. Panorama de México a Puebla. Mapa de Balbuena. Artes de México, Xochimilco, Secretaría de Cultura-INAH-Museo Nacional de Historia, 20.
- Ebel, R. 2020. Chinampas: An urban farming model of the aztecs and a potential solution for modern megalopolis. *HortTechnology* 30(1):13-19.
- FAO, 2013 Uso del agua en la agricultura. Notas generales http://fenixservices.fao.org/faostat/static/documents/EW/EW_Uso_del_agua_en_la_agricultura_s.pdf
- FAO, 2019. Agricultura urbana. <http://www.fao.org/urban-agriculture/es/>
- FAOSTAT, 2019. Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Producción y rendimiento de las hortalizas frescas a nivel mundial 2010 y 2017. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>.
- Hirai, T., W. Amaki, H. Watanabe. 2006. Effects of monochromatic light irradiation by LED on the internodal stem elongation of seedlings in eggplant, leaf lettuce and sunflower. *J Shita* 18:160–166. (In Japanese with English abstract).
- Jan-Loman, L. 2016. Vertical Farming: Can it change the global food production landscape?, Nuffield International Scholar, March 2018. file:///C:/Users/victo/Downloads/Luciano%20Loman%20Report_Vertical%20Farming%20FINAL.pdf
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, T. Yoshihara. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ Exp Bot* 75:128–133.
- Kurasek, B. 2009. The living skyscraper-Farming the urban skyline. <https://www.pinterest.es/pin/118993615124343764/>.
- Li, Y., G. Xin, M. Wei, Q. Shi, F. Yang, X. Wang. 2017. Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities. *Sci Hort* 225:490–497.
- Liu, W. 2012. Light environmental management for artificial protected horticulture. *Agrotechnol* 1:1-4.
- MAPA, 2019. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Registro de productores de semillas y de plantas de vivero. <https://www.mapa.gob.es/app/consultasprosemplan/productorconsulta.aspx>.

- Marcelis, L. 2019. Light in horticulture: from greenhouse to vertical farm. Apuntes de curso 2019. Wageningen UR, NL.
- Massa, G.D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Michell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. HortScience 43:1951–1956.
- Mochizuki, Y., S. Sekiguchi, N. Horiuchi, T. Aung, I. Ogiwara. 2019. Photosynthetic Characteristics of Individual Strawberry (*Fragaria xananassa* Duch.) Leaves under Short-distance Lightning with Blue, Green, and Red LED Lights. HortScience 54:452-458.
- Nájera, C., Guil-Guerrero, J.L., Jarquín, L., Álvaro, J.E. M. Urrestarazu. 2018. LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit. Postharvest Biol Technol 145:151-156.
- NASA, 2008. Energía solar anual, periodo 1983-2005. <https://power.larc.nasa.gov>.
- Olle, M., A. Virsile. 2013. The effects of light emitting diode lighting on green house plant growth and quality. Agr Food Sci 22:223–234.
- Paniagua-Pardo, G., A.C. Hernández, M.F. Rico, P.F. Domínguez, O.E. Martínez, G.C. Martínez. 2015. Efactor de la luz led de alta intensidad sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.). Polibotánica 40:199-212.
- Urria, C.E. 2009. Fotosíntesis: aspectos básicos. Reduca (biología). Serie Fisiología Vegetal 2: 1-47.
https://eprints.ucm.es/9233/1/Fisiologia_Vegetal_Aspectos_basicos.pdf.
- Scopus, 2019. Base de datos de investigaciones científicas. Light led and agriculture 2000 to 2019. <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>.
- Singh, D., C. Basu, M. Meinhardt, B. Roth. 2015. LED's for energy efficient greenhouse lighting. Adv Mater Res-Switz 49:139-147.
- Stanghellini, C., B. van 't Ooster, E. Heuvelink. 2019. Greenhouse horticulture. Technology for Optimal Crop Production. Wageningen Academic Publishers.
- Van der Velden, N., P. Smit. 2013. Groei elektriciteitsconsumptie glastuinbouw. Hoe verder? Projectcode 2275000507, LEI Wageningen UR, Den Haag.

- Van der Velden, N., P. Smit. 2016. Energiemonitor van de Nederlandse glastuinbouw 2015. (Rapport / Wageningen Economic Research; No. 2016-099). Wageningen: Wageningen Economic Research.
- Yepes, A., M. Silveira. 2011. Respuesta de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global. Revisión. Colombia Forestal 14:213-232.
- Zang, T., K.M. Folta. 2012. Green light signaling and adaptive response. Plant Signal Behav 7:1-4.

2. OBJETIVO GENERAL

En esta tesis se ha planteado el siguiente objetivo general:

- Evaluar el uso de las iluminarias para aumentar su eficiencia y eficacia en la producción de hortalizas y ver su efecto en frutos o en hortalizas de hoja y raíz, tanto en calidad como en cantidad.

Para el cumplimiento del objetivo general se plantearon cuatro objetivos específicos, que corresponden a cada uno de los capítulos descritos en la tesis:

1. Evaluar la eficiencia agronómica y energética de las lámparas con espectros de diodos emisores de luz (LED) fabricadas para uso hortícola utilizando un espectro continuo ajustado a una respuesta fotosintética máxima contra luces blancas convencionales a dos intensidades de luz diferentes.
2. Evaluar el espectro de iluminación de tres diferentes tipos de lámparas LED sobre los parámetros de calidad organoléptica, comercial y calidad dietética en postcosecha de seis variedades de tomate.
3. Evaluar el efecto de espectros de LED usados en iluminación artificial en horticultura, sobre la acumulación de nitratos en hortalizas de hojas y raíz en comparación con iluminarias de LED blanca.
4. Evaluar los efectos de la cantidad y calidad de la luz LED en la producción y calidad nutricional de forraje verde hidropónico en tres cereales comerciales y su efecto en la eficiencia energética y productiva en condiciones controladas

3. CAPÍTULO 1

Efecto de la calidad de luz LED en plantas de lechuga, tomate y pimiento en cultivo sin suelo

Miguel Urrestarazu^a, **Cinthia Nájera**^b, María del Mar Gea^c

^aDepartamento de Agronomía, Universidad de Almería, Almería, España; Universidad de Tarapacá, Arica, Chile

^bCentro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Almería, España

^cDepartamento de Agronomía. Universidad de Almería, Almería, España

Revista: HortScience

Factor de impacto (JCR, 2016): 0,848

Categoría: Horticultura

Posición de la revista dentro de la categoría 2017: (15/37)

Cuartil: Q2

Resumen

Las lámparas LED significan uno de los avances más importantes en la iluminación artificial para la horticultura en los últimos años. El objetivo de este estudio fue comparar el crecimiento de cuatro plantas hortícolas usando tubos de luz LED blanca convencional (T0) contra una con un de ajuste espectral máximo a la respuesta fotosintética máxima (T1) a dos intensidades diferentes. El experimento se llevó a cabo con dos tipos de plantas jóvenes de lechuga, tomate y pimiento morrón. En una cámara de ambiente controlado, se utilizaron cuatro y seis lámparas por metro cuadrado para conseguir un alta (H) y baja (L) intensidad, respectivamente. Se realizaron las medidas de los parámetros de iluminación, como iluminancia (Lux) y la intensidad de flujos de fotones fotosintéticos (PPF, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). El peso seco y fresco, área foliar y el índice específico para medir el crecimiento de las plantas fue medido. La actividad fotosintética y la eficiencia energética fueron registrados para cada especie a lo largo de 60 días de cultivo. Los resultados demuestran claramente que, las lámparas LED específicas para horticultura con un espectro mejorado de luz en comparación con las lámparas LED convencionales aumentaron la eficiencia energética de las hortalizas evaluadas en un 26%. En las dos intensidades de luz estudiadas, el crecimiento de las plantas estuvo claramente más relacionado con el ajuste espectral de la luz a la respuesta fotosintética registrada por McCree (1972) que con el PPF o la iluminancia (lux). Por lo tanto, sugerimos realizar un estudio específico y detallado de distribución espectral para predecir el efecto de la cantidad y calidad específica de luz usada en este estudio sobre un solo parámetro de crecimiento de las plantas.

Palabras clave: tomate, pimiento dulce, lechuga, fotosíntesis, LED, intensidad de luz, plántula

3.1 Introducción

Como fuente primaria de energía, la luz es uno de los factores ambientales más importantes para el crecimiento de las plantas (Naoya et al., 2008).

Las lámparas fluorescentes son ampliamente utilizadas en la horticultura, especialmente en los cultivos *in vitro*. Sin embargo, los sistemas de iluminación con diodos emisores de luz (LED) tienen varias propiedades beneficiosas incluyendo su composición espectral, durabilidad, larga vida útil, especificidad de longitud de onda y alta eficiencia energética. Por lo tanto, la iluminación LED es eficiente energéticamente beneficiosa para las plantas (Massa et al., 2008; Li et al., 2013; Huimin et al., 2013; Urrestarazu, 2013; Ouzounis et al.,

2015). Morrow (2008) menciona que las lámparas LED significan uno de los avances más importantes en la iluminación artificial para la horticultura en los últimos años.

La intensidad de luz es uno de los factores ambientales más importantes para el crecimiento de las plantas (Naoya et al., 2008). En contraste con la alta intensidad de luz, la intensidad baja de luz es frecuentemente registrada como un factor de fotoinhibición (Long et al., 1994). Asimismo, el efecto de los bajos niveles de luz sobre el crecimiento de las plantas y la morfogénesis es bien conocido; por ejemplo, puede llevar a un incremento del área foliar específica (SLA) y de la altura de la planta (Steinger et al., 2003; Fan et al., 2013).

En el flujo de fotones fotosintético (PPF), la luz azul y roja tienen aproximadamente 90% de absorción, y la luz verde tiene una absorción del 70 al 80% (Terashima et al., 2009). Las proporciones de PPF de luz roja y azul han sido estudiadas por varios autores (Li et al., 2013). Johkan et al. (2012) menciona que la luz LED verde de alta intensidad promueve el crecimiento de la lechuga y en particular, la luz verde de longitud de onda corta (510 nm) está disponible para el crecimiento activo de la planta.

Por otra parte, el uso de la iluminancia, una medida de radiación expresada como el flujo de fotones fotosintéticos de 380 a 780 nm (espectro de la radiación fotosintética, PAR), se utiliza con frecuencia en horticultura para determinar la intensidad de luz suficientemente adecuada para las plantas en un cultivo. Múltiples estudios se han realizado con luz azul y roja (e.g. Fan et al., 2013), con diferentes combinaciones entre ellos (e.g. Li et al., 2013) y también se ha usado una sección muy específica del espectro verde (Johnkan et al., 2012). Existe poca información sobre las lámparas LED de espectro continuo ajustado a un modelo teórico de la máxima respuesta fotosintética registrado en los experimentos de McCree (1972) en plantas cultivadas.

El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia agronómica y energética de las lámparas LED fabricadas para uso hortícola utilizando un espectro continuo ajustado a una respuesta fotosintética máxima contra luces blancas convencionales a dos intensidades de luz diferentes.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo

El experimento se llevó a cabo en una cámara de cultivo cerrada de dimensiones 1800 mm x 800 mm x 2200 mm ubicada en la Universidad de Almería. La cámara de cultivo

constaba de 4 secciones independientes unas de otras y distanciadas entre sí a 50 cm y las plantas fueron expuestas a un fotoperiodo de 16/8 (día/noche) a una temperatura de 28 a 18 °C (día/noche) y 85% a 80% la humedad relativa. Plantas de lechuga [cv. Astorga (Lechuga 1) y cv. Cervantes (Lechuga 2)], tomate (cv. Simona) y pimiento (cv. Dulce italiano) con seis hojas verdaderas fueron trasplantadas en macetas de 0,750 mL utilizando como sustrato fibra de coco. Las características físicas del sustrato han sido previamente descritas por Morales y Urrestarazu (2014). El riego se realizó cada vez que se agotaba el 10% del agua fácilmente disponible en el sustrato (Rodríguez et al., 2004; Urrestarazu, 2004). La solución nutritiva usada fue similar a la recomendada por Sonneveld y Straver (1994).

Se consideraron cinco plantas por especie y cinco cultivares por repetición después de 35 días de tratamiento. El área foliar total (LA) se determinó utilizando el medidor de área de hoja portátil AM350 (Limited BioScientific ADC, Hertfordshire, Reino Unido). Las plantas fueron separadas en hojas, tallos y raíces, inmediatamente se pesaron para determinar su peso fresco, para ello se secaron a 75 °C en una estufa de aire forzado durante 48 horas y se volvieron a pesar para determinar su peso seco.

Se midió el área foliar específica de cada plántula utilizando la siguiente ecuación:

$$SLA = \frac{LA}{\text{Peso seco de hoja}} \quad (1)$$

donde:

SLA = área foliar específica

LA = área foliar

3.2.2 Tasa neta de fotosíntesis y EE

La tasa neta de fotosíntesis (P_n) fue medida usando el sistema de fotosíntesis portátil LCi (Limited BioScientific ADC, Hertfordshire, Reino Unido). El objetivo fue monitorear el entorno y medir la actividad fotosintética de las plantas. El sistema LCi puede medir dentro de los intervalos de 0 a 2000 ppm (CO₂) y de 0 a 75 mbar (H₂O) con una precisión de $\pm 2\%$. El experimento se repitió a los 12 y 33 días después del tratamiento. Se realizaron cinco mediciones por tratamiento, midiendo las láminas foliares completamente expandidas.

El parámetro de eficiencia energética se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia energía eléctrica (EE)} = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Energía eléctrica consumida por LEDs}} \quad (2)$$

3.2.3 Tratamientos, dispositivos LED e intensidades de luz

Dos intensidades de PPF, baja (L) y alta (H), fueron probadas usando dos tipos de lámparas LED. Las intensidades L y H consistieron en cuatro y seis lámparas por metro cuadrado, respectivamente. Los datos de luz resultantes se muestran en la Tabla 1. Se tomaron tres mediciones idénticas de luz LED mediante el escaneo espectral a 20 cm por debajo del panel donde se cultivaron las plantas. El fotómetro HD 2302.0 (Delta OHM®, Véneto, Italia) se utilizó para medir la luz cuantitativa. Las sondas radiométricas cuánticas de LP 471 PAR y LP 471 PHOT se utilizaron para medir la densidad de intensidad de flujo de fotones ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y la iluminancia (lux), respectivamente.

Dos tipos de tubos de luz LED de 18 W fueron usados. L18 T8 Roblan® (Toledo, España) fue utilizado como control (T0) y L18 EU AP67 Valoya® (Helsinki, Finlandia), un tubo de LED agronómico (T1) fabricado para el crecimiento hortícola, fue evaluado como el grupo de lámparas a comparar. Los espectros de luz de T0 y T1 se muestran en la Fig. 1A y B, y fueron obtenidos con el medidor UPRtek MK350S LED Meter (Miaoli Country, Taiwán).

Para calcular el porcentaje de los fotones disponibles útiles para la fotosíntesis, se estableció una integral entre 350 y 725 nm. Los valores aportados por McCree (1972) (Fig. 1D) se utilizaron como valores óptimos de eficiencia espectral fotosintética (MSE), y consideramos que los valores de McCree serían máximos e iguales a 100% usando la siguiente fórmula:

$$MSE = \int_{350}^{725} f(x) dx \quad (3)$$

$$SE \cong \sum_{i=1}^n \frac{h(f(x_{i+1}) + f(x_i))}{2} \quad (4)$$

donde $n = 15$, de los datos experimentales de McCree (1972), $h = 25$, la gama del nanómetro de los datos experimentales de McCree, $x_1 = 350 \text{ nm}$ y $x_n = 725 \text{ nm}$.

3.2.4 Análisis estadístico

Se realizó un diseño de bloques completos al azar. Para cada tratamiento, especie y cultivar, se construyeron cuatro bloques con cinco plantas por bloque. Los datos medios se analizaron a diferentes niveles de significancia. Los datos fueron sometidos a análisis de

varianza, y sus medias se compararon mediante la prueba de Tukey y *t-student* utilizando Statgraphics Centurion® 16.1.15 (Warrenton, VA) y Microsoft Office® 2010.

Tabla 1. Datos luz con dos lámparas de diodo emisor de luz (LED) e intensidades de luz [4 (L) y 6 (H), unidades m^{-2}] y gasto de energía eléctrica (kWh m^{-2}).

Tratamiento de luz	Tipo de lámpara LED	PPF ($\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$)	Iluminancia (lux)
T0	L	L18 T8 Roblan	$85 \pm 5^*$
	H	L18 T8 Roblan	117 ± 9
T1	L	L18 AP67 Valoya	52 ± 3
	H	L18 AP67 Valoya	95 ± 7

L = baja intensidad; H = alta intensidad; PPF = flujo de fotones fotosintéticos.

*Valores que representan la media de tres repeticiones en todos los casos.

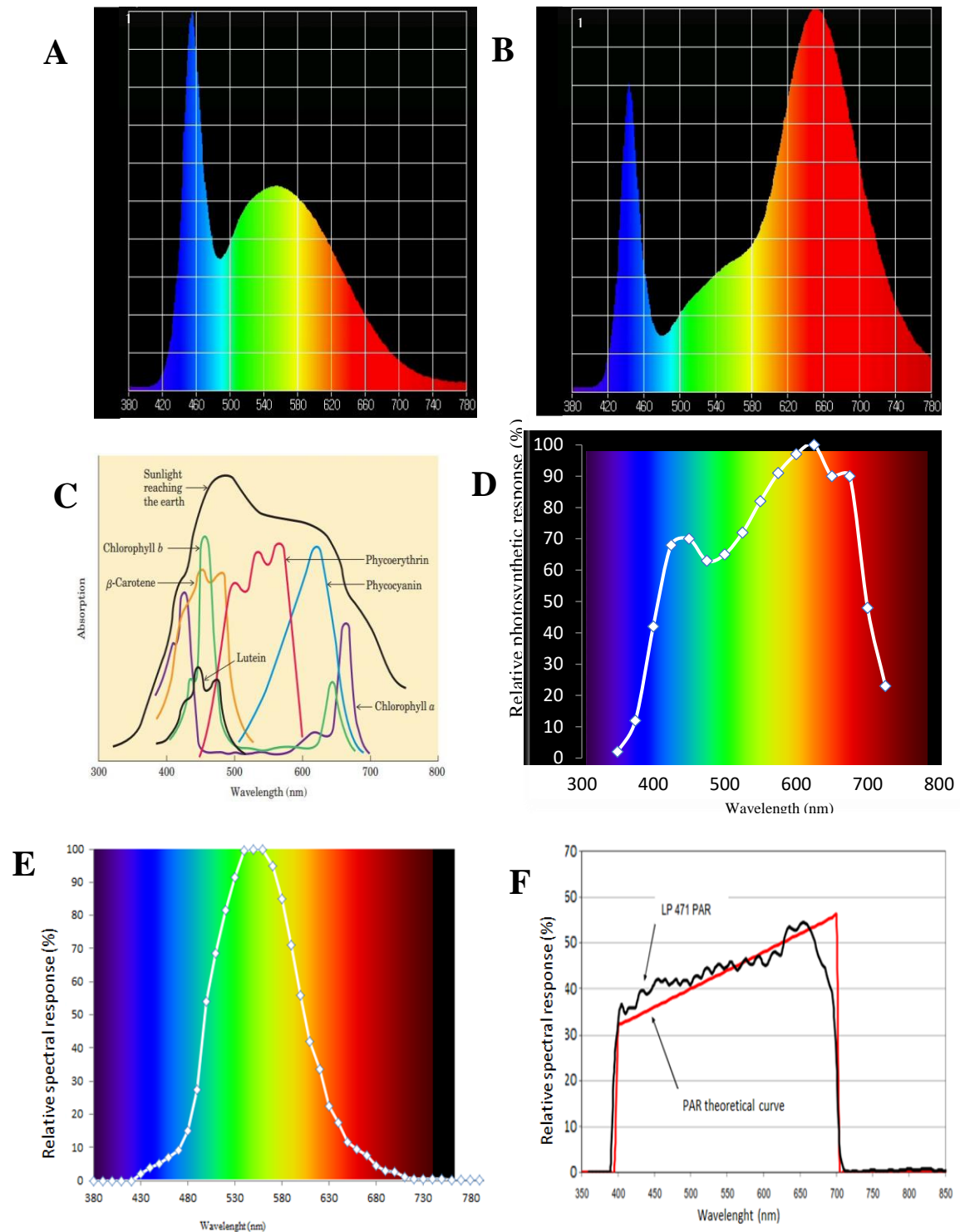


Fig. 1. Espectros específicos iluminarias LED. (A) Distribuciones espectrales del flujo de fotones de 380 a 780 nm para el tratamiento de iluminación de las lámparas LED blanco utilizadas como control y (B) los LED diseñados específicamente para uso agrícola. (C) La absorbancia de diferentes pigmentos por Nelson y Cox (2013). (D) La respuesta fotosintética relativa de McCree (1972). (E) Sensibilidad espectral relativa medida con el LP 471 PHOT por Delta Ohm[®]. (F) La sensibilidad espectral relativa medida con el LP 471 PAR por Delta Ohm[®].

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Efectos de la calidad de la luz sobre los parámetros de luz

Teniendo en cuenta consumos idénticos y un número equivalente de lámparas LED por área, hubo una variación sustancial en la iluminación (lux) y flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Tabla 1). En comparación con las plantas de T0, las plantas de T1 mostraron una disminución significativa del 37% y 39% en iluminancia y flujo de fotones fotosintéticos (PAR), respectivamente.

La Fig. 1 muestra la distribución del flujo de fotones espectrales para los tratamientos de luz de 380 a 780 nm. Las lámparas T1 mostraron un ajuste más cercano a la curva de eficiencia fotosintética. Se obtuvieron valores de MSE de 1, 0,47 y 0,64 McCree (1972), T0 y T1, respectivamente.

3.3.2 Efecto de la calidad de la luz en los parámetros de crecimiento de las plantas

En todos los casos, con excepción de las raíces de los cultivos de lechuga 1 y 2, se encontró de manera significativa un mayor crecimiento vegetativo con mayor intensidad de luz (Tabla 2).

El espectro de las lámparas LED causó un efecto importante y significativo en la mayoría de los parámetros de crecimiento de las cuatro especies: en el tratamiento de luz con un ajuste espectral más estrecho la respuesta fotosintética más alta (T1) era más propicio para el crecimiento. Sólo en las raíces de las plantas no hubo ningún efecto claro y significativo en este sentido. Aunque la iluminancia y PPF fueron notablemente superiores en T0 que en T1, los valores de los parámetros de crecimiento de las plantas en T0 no fueron superiores a T1 en cualquiera de las cuatro especies. La lechuga 1 tuvo la media más alta significativamente incrementando en el total de la biomasa (peso fresco y seco, superior al 100%), y el aumento en biomasa seca tuvo un valor medio de 57%.

La correlación entre el crecimiento vegetativo y la iluminación y el PAR (Tabla 1) fue clara y coincide con las conclusiones de Barnes et al. (1993), que informó sobre dos medidas necesarias de radiación fotosintéticamente activa: 1) PPF, que asigna valores a los fotones entre 400 y 700 nm, y 2) rendimiento de flujo de fotones, con pesos de fotones en el rango aproximado de 360 a 760 nm según la respuesta fotosintética de la planta.

La media de la respuesta fotosintética de cultivos registrados por McCree en 1972 (incluyendo tomate y lechuga) se muestran en la Fig. 1D. El ajuste espectral más cercano a

T1, particularmente entre 580 y 710 nm (Fig. 1B), podría explicar su mejoría en los resultados por encima de T0, por ejemplo, una reducción significativa en PPF después de 580 nm. Sin embargo, los valores de la MSE de 47% y 65%, asociado con los espectros de T0 y T1 con el mejor ajuste a la respuesta fotosintética máxima, se ajustan mejor al mayor crecimiento de T1 que T0. En lechuga, incluso con pequeños cambios espectrales (de 500 a 530 nm) en lámparas LED varía el comportamiento del crecimiento vegetativo en comparación con las lámparas fluorescentes blancas (Johkan et al., 2012).

A excepción del pimiento en T1, el LA incrementa de manera significativa o muy significativa cuando se aumenta la intensidad de la luz (Tabla 3). Sin embargo, mientras que el incremento medio significativo fue de 36% para T0, para T1 fue del 113%. El mayor aumento en el LA debido al aumento de la intensidad de la luz que se produjo durante el T1 con plantas de tomate (170%). A excepción del cultivo de tomate sometido a intensidad de luz baja, el efecto del espectro de las lámparas LED en T1 en LA aumentó en promedio 57% y 63% para baja y alta intensidad de luz, respectivamente.

Los estudios de Johkan et al. (2012) encontraron diferencias importantes en LA de las plantas de tomate jóvenes empleando espectros diferentes utilizando PPF de $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, considerando que registramos un considerable efecto espectral en T1 contra T0 (con excepción de tomate en tratamiento de baja intensidad). Esto pudo ser debido al ajuste espectral más cercano entre 580 y 710 nm o al ajuste general más cercano a alguno de los espectros de la respuesta fotosintética máxima. Cabe destacar que Li et al. (2013) obtuvo mejores resultados utilizando una combinación de lámparas LEDs rojos y azules sobre lámparas fluorescentes blancos.

A excepción de los cultivos de tomate de T1, hay una clara y significativa disminución en SLA, asociada con un aumento en la intensidad de la luz. Esta disminución de SLA también fue obtenida por Fan et al. (2013) en el rango de 50 a $550 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en plantas jóvenes de tomate, donde utilizó LEDs azules y rojas; además sugirieron que SLA siempre disminuía con la absorción de la energía de luz. En el presente estudio, el efecto del espectro en SLA no mostró una clara tendencia: incremento de SLA en lechuga 2 y pimiento, disminución de SLA en tomate a baja intensidad de luz, y no tuvo efecto en lechuga 1 y tomate bajo condiciones de alta iluminación.

Tabla 2. Efecto de la intensidad de luz y composición espectral en parámetros de crecimiento de cuatro vegetales. T0 es luz LED blanca y T1 es la LED de espectro específico para cultivos hortícolas.

		Peso fresco (g planta ⁻¹)											
		Total			Raíz			Tallo			Hojas		
		T0	T1	<i>P</i>	T0	T1	<i>P</i>	T0	T1	<i>P</i>	T0	T1	<i>P</i>
Lechuga 1	L	4,52	5,53	ns	0,70	0,76	ns				3,82	4,77	***
	H	5,20	10,43	***	0,55	0,69	***				4,65	9,74	***
<i>P</i>		**	*		*	ns					***	***	
Lechuga 2	L	7,62	9,42	***	0,40	0,32	ns				7,22	9,15	***
	H	17,92	19,07	ns	0,81	0,83	ns				17,11	18,24	ns
<i>P</i>		***	***		***	***					***	***	
Tomate	L	4,24	4,71	ns	0,72	0,74	ns	1,34	1,57	***	2,18	2,40	ns
	H	8,61	14,41	***	1,54	2,33	***	3,05	5,94	***	4,01	6,14	***
<i>P</i>		***	***		***	***		***	***		***	***	
Pimiento	L	5,69	7,86	***	0,37	0,88	***	1,63	2,11	***	3,69	4,88	***
	H	11,72	12,87	ns	1,42	1,23	ns	2,71	3,68	***	7,58	7,96	ns
<i>P</i>		***	***		***	**		***	***		***	***	
		Peso seco (g planta ⁻¹)											
Lechuga 1	L	1,33	1,95	**	0,28	0,32	*				1,05	1,63	***
	H	2,13	3,27	**	0,51	0,42	ns				1,62	2,89	**
<i>P</i>		**	*		***	ns					*	***	
Lechuga 2	L	2,18	1,65	ns	0,34	0,26	ns				1,84	1,52	ns
	H	3,60	3,93	ns	0,25	0,36	ns				3,34	3,58	ns
<i>P</i>		**	*		ns	*					**	**	
Tomate	L	2,05	2,50	*	0,51	0,64	ns	0,38	0,55	**	1,16	1,31	*
	H	4,15	6,88	**	0,79	1,32	**	1,12	2,26	***	2,24	3,30	***
<i>P</i>		***	***		***	***		***	***		***	***	
Pimiento	L	2,55	3,23	*	0,34	0,48	ns	0,55	0,73	*	1,65	2,02	*
	H	5,00	6,30	*	0,67	0,88	ns	1,00	1,53	*	3,34	3,89	*
<i>P</i>		*	**		*	**		*	**		**	**	

*, **, ***, y ns indican diferencias significativas para filas y columnas en $P \leq 0,05$; $P \leq 0,01$; $P \leq 0,001$ y no significativo, respectivamente. n=4.

L = baja intensidad de iluminación; H = alta intensidad de iluminación.

Tabla 3. Efecto de la intensidad de luz y la composición espectral en parámetros de área foliar de cuatro vegetales. T0 es luz LED blanca y T1 es la LED de espectro específico para cultivos hortícolas.

		Área Foliar (cm ² planta ⁻¹)			Área Foliar Específica (cm ² g ⁻¹ PS)		
		T0	T1	P	T0	T1	P
Lechuga 1	L	30.44	41.72	**	22.89	21.40	ns
	H	38.00	70.45	***	14.27	11.27	ns
<i>P</i>		**	***		***	***	
Lechuga 2	L	30.36	36.88	*	17.41	42.82	***
	H	46.54	71.55	***	12.94	18.20	**
<i>P</i>		**	***		**	***	
Tomate	L	33.14	26.62	ns	16.21	10.67	*
	H	46.79	73.42	***	11.29	10.68	ns
<i>P</i>		***	***		**	ns	
Pimiento	L	34.91	74.50	***	13.70	23.16	***
	H	44.14	68.73	***	8.83	10.92	*
<i>P</i>		***	ns		***	***	

*, **, ***, y ns indican diferencias significativas para filas y columnas en $P \leq 0,05$; $P \leq 0,01$; $P \leq 0,001$ y no significativo, respectivamente. n=4.

L = baja intensidad de iluminación; H = alta intensidad de iluminación.

3.3.3 Efecto de la calidad de la luz sobre P_n y de la EE

Todas las mediciones de P_n se incrementaron significativamente en T1 incrementando la intensidad de luz; sin embargo, este efecto no fue tan claro para las lámparas LED blancas (T0) (Tabla 4). En T0 los cultivos de lechuga 1 y pimiento, no se encontraron diferencias en P_n en comparación con el cultivo lechuga 2. Del mismo modo, en la intensidad luminosa más alta, todos los valores de P_n aumentaron con los tratamientos de T1 en comparación con T0, con excepción de lechuga 2. En cambio, en la menor intensidad de luz, sólo las plantas jóvenes de tomate fueron afectadas por los tratamientos de T1. Fan et al. (2013) también publicaron un aumento del P_n en el rango de 50 a 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Una vez más, las mejoras asociadas con los espectros en T1 y T0 podrían justificarse por la distribución de los espectros de T1, lo que lleva a una mayor respuesta fotosintética.

A excepción de T0 y lechuga 1, aumentando la intensidad de luz con lámparas LED siempre aumentó de manera significativa o altamente significativa la EE. Aunque varió proporcionalmente para cada especie, el valor medio de EE de las cuatro especies hortícolas para T1 fue 4 g mayor en la materia seca por kW de energía consumida que T0, lo que representa un aumento medio significativo del 26% en la eficiencia.

Los incrementos medios significativos de EE de las cuatro especies con mayor intensidad de luz fueron 67% y 76% para T0 y T1, respectivamente, mientras que en las intensidades L y H, los aumentos comparables de EE fueron 28% y 44%, respectivamente. Las mejoras de

las LED sobre los espectros convencionales se deben probablemente al mayor ajuste de su espectro PAR con el espectro de la respuesta fotosintética máxima registrada por McCree (1972).

Nuestros resultados concuerdan con los de Fan et al. (2013), que encontraron que la EE aumentó en un 50% de 50 a 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, pero disminuyó por encima de 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Tabla 4. Efecto de la intensidad de luz y la composición espectral en la fotosíntesis (P_n) y en la eficiencia energética (EE) de cuatro vegetales. T0 es luz LED blanca y T1 es la LED de espectro específico para cultivos hortícolas.

		P_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			EE (g kW^{-1})		
		T0	T1	P	T0	T1	P
Lechuga 1	Low	0.90	0.94	ns	10.63	13.27	*
	High	0.89	1.15	*	10.34	21.68	***
P		ns	*		ns	***	
Lechuga 2	Low	1.39	1.58	ns	20.08	25.47	*
	High	2.36	2.45	ns	38.08	40.61	ns
P		***	**		**	***	
Tomate	Low	0.48	1.07	***	6.06	6.68	ns
	High	1.08	1.27	*	8.92	13.67	***
P		**	*		**	***	
Pimiento	Low	1.97	1.63	ns	10.26	13.57	*
	High	1.56	2.74	***	16.88	17.72	ns
P		ns	***		**	**	

*, **, ***, y ns indican diferencias significativas para la fila y columnas en $P \leq 0,05$; $P \leq 0,01$; $P \leq 0,001$, y no significativas, respectivamente. n=4.

3.4 Literatura citada

- Barnes, C., T. Tibbitts, J. Sager, G. Deitzer, D. Bubenheim, G. Koerner, B. Bugbee. 1993. Accuracy of Quantum Sensors Measuring Yield Photon Flux and Photosynthetic Photon Flux. HortScience 28:1197-1200.
- Fan, X.X., Z.G. Xu, X.Y. Liu, C.M. Tang, L.W. Wang, X.I. Han. 2013. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. Sci Hortic 153:50-55.
- Huimin, L., T. Canming, X. Zhigang. 2013. The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis *in vitro*. Sci Hortic 150: 117-124.

- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, T. Yoshihara. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ Exp Bot* 75:128-133.
- Li, H., C. Tang, Z. Xu. 2013. The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis in vitro. *Sci Hortic* 150:117-124.
- Long, S.P., S. Humphries, P.G. Falkowski. 1994. Photoinhibition of photosynthesis in nature. *J. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol Biol* 45:633-662.
- Massa, G. D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43:1951-1956.
- McCree, K.J. 1972. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol* 9:191-216.
- Morales, I. y M. Urrestarazu. 2014. Effect of a passive mixing device on the electrical conductivity and pH values of a nutrient solution. *J Irrig Drain E-Asce* 140: 04013022.
- Morrow, R.C. 2008. LED lighting in horticulture. *HortScience* 43:1947-1950.
- Naoya, F., F. Mitsuko, O. Yoshitaka, S. Sadanori, N. Shigeo, E. Hiroshi. 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *J Sci Hortic* 115:176-182.
- Nelson, D.L., M.M. Cox. 2013. *Lehninger, principles of biochemistry*. 6th ed. W.H. Freeman y Co., New York.
- Ouzounis, T., E. Rosenqvist, C.O. Ottosen. 2015. Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *HortScience* 50:1128-1135.
- Rodríguez, E., J. Reça, J. Martínez, M.T. Lao, M. Urrestarazu. 2014. Effect of controlling the leaching fraction on the fertigation and production of a tomato crop under soilless culture. *Sci Hortic* 179:153-157.
- Sonneveld, C., N. Straver. 1994. *Voedingsoplossingen voor groenten en bloemen geteeld in water of substraten [Nutrient solutions for vegetables and flower grown in water or substrates]*. 10th ed. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, Netherlands.
- Statgraphics Centurion X.V.I.I. Statgraphics Net for Windows 7 2018.

- Steinger, T., B.A. Roy, M.L. Stanton. 2003. Evolution in stressful environments II: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis*. *J Evol Biol* 16:313-323.
- Terashima, I., T. Fujita, T. Inoue, W.S. Chow, R. Oguchi. 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *J. Plant Cell Physiol* 50:684-697.
- Urrestarazu, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Urrestarazu, M. 2013. Infrared thermography used to diagnose the effects of salinity in a soilless culture. *Quantitative InfraRed Thermography* 10:1-8.

4. CAPÍTULO 2

Mejora de las cualidades dietéticas y organolépticas por medio de lámparas LED en tomate en postcosecha

Cinthia Nájera^a, José Luis Guil-Guerrero^b, Lorenzo Jarquín Enríquez^c, Juan Eugenio Álvaro^d, Miguel Urrestarazu^b

^aCentro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Almería, España

^bDepartamento de Agronomía. Universidad de Almería, Almería, España

^cDepartamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Politécnica de Guanajuato, México

^dPontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Agronomía, Quillota, Chile

Revista: *Postharvest Biology and Technology*

Factor de impacto (JCR, 2017): 3.112

Categoría: *Food Science & Technology*

Posición de la revista dentro de la categoría 2017: (26/133)

Cuartil: Q1

Resumen

El tomate es un fruto con altas concentraciones de licopeno y se incrementa después de su estado de madurez breaker, existe información sobre el efecto de la luz sobre los parámetros comerciales, organolépticos y calidad dietética. Los sistemas de luz LED están irrumpiendo como técnica limpia y eficiente en la iluminación artificial en horticultura. El objetivo de este trabajo fue ver el efecto de las iluminarias LED sobre el incremento de parámetros de calidad postcosecha y licopeno. El efecto sobre los parámetros de calidad fue significativamente diferente en función del tipo de variedad de frutos de tomate. La firmeza y la acidez titulable fueron los parámetros de calidad comercial y organoléptico más afectados. Todas las variedades aumentaron la proporción de licopenos entre un 30% y un 60% frente a la oscuridad. La iluminación de una hora diaria en la fase de postcosecha de los frutos de tomate favorecía los parámetros comerciales, organolépticos y la proporción de licopeno. Las iluminarias de mayores R:FR ratios favorecieron los parámetros de firmeza frente a otra iluminaria blanca LED, siendo la iluminaria LED de mayor R:FR ratio la que favoreció también a la acidez titulable. En general la luz LED de mayor proporción de R:FR ejerce una mayor inducción de la síntesis de licopeno en una proporción de 41% con relación a la oscuridad y un 24% con relación a otras iluminarias LEDs.

Palabras clave: tomate cherry, tomate redondo, espectro de luz, licopeno, color, rojo lejano

4.1 Introducción

En las últimas décadas la preocupación sobre alimentación y salud humana va en aumento, especialmente las hortalizas consumidas con el valor añadido anticancerígenos como antioxidantes, carotenoides y vitaminas (Dhandevi y Rajesh, 2015). Los carotenoides son parte importante de la dieta humana (Krinsky y Johnson, 2005), proporcionando recursos para la formación de vitamina A, convirtiéndose en un componente esencial y precursor del sabor volátil en plantas (Vogel et al., 2010); proveen de un color distintivo al fruto maduro, además de incrementar su calidad nutricional, al mismo tiempo de sus propiedades benéficas para la salud por su función como antioxidantes (Shao et al., 2015). Estudios epidemiológicos han mostrado que el consumo de alimentos ricos en licopeno, ayudan a prevenir enfermedades cardiovasculares (Müller et al., 2016) y algunos tipos de cáncer (Giovannucci, 1999; Sandmann et al., 2006; Ford y Erdman, 2012).

El tomate (*Solanum lycopersicon* L.) es un fruto climatérico y continua su proceso de maduración después de ser cosechado, durante este proceso la clorofila es degradada y los carotenoides son sintetizados (Liu et al., 2009), particularmente la concentración de licopeno, principal antioxidante del tomate, incrementa después de su estado de madurez rompiente (Liu et al., 2009) o del estado de madurez cambiante de su proceso de maduración (Davies y Hobson, 1981) en la escala de madurez de la USDA (2005) lo cual quiere decir que la luz tendrá un efecto significativo sobre la síntesis de licopeno.

Es bien conocido que la luz ejerce un papel sobre la evolución del color de los frutos de tomate en postcosecha determinada sobre el metabolismo de los pigmentos. Particularidades del espectro de luz ejercen papel decisivo en los pigmentos sintetizados en la vida en anaquel de los frutos de tomate. Se ha descrito que la relación entre luz roja y luz azul tienen un efecto significativo en la pigmentación de frutos de tomate (Azari et al., 2010; Toledo-Ortiz et al., 2010; Li et al., 2013). En la actualidad (Moya et al., 2017) se está trabajando en postcosecha con tres líneas básicas 1) mantener la calidad comercial de los frutos (firmeza, calibre, color, etc.), 2) calidad nutricional y funcional alta (licopeno, ácido ascórbico, actividad antioxidante, contenido de fenoles totales, etc.) y 3) propiedades organolépticas (acidez titulable, pH, conductividad eléctrica, sólidos solubles totales, etc.) muy relacionadas con la aceptación en mercado. Las condiciones óptimas para lograrlo incluyen: temperatura y humedad relativa, y las concentraciones óptimas de oxígeno, dióxido de carbono y en algunos casos etileno (Kader y Rolle, 2004; D'Souza et al., 2015).

Tradicionalmente la postcosecha se realiza en la oscuridad, donde el licopeno sigue incrementado por efecto de los fitocromos localizados en el pericarpio del tomate (Alba et al., 2000; Demotes-Mainard et al., 2016) y los criptocromos (Gilberto et al., 2005). La temperatura de almacenamiento del fruto es otro factor importante (Toledo-Ortiz et al., 2010), Toor y Savage (2006) obtuvieron 3 veces más contenido de licopeno en un rango de temperatura de almacenamiento de 15 a 25 °C en comparación con los frutos almacenados a temperaturas de 7 °C comúnmente utilizada y recomendada en el periodo de almacenamiento por el Centro de Postcosecha de la Universidad de California (1997).

Por otro lado, autores como Toledo-Ortiz et al. (2010) y Toor y Savage (2006) encontraron que la luz y la temperatura son factores que afectan, además de la síntesis de licopeno, otros parámetros de calidad postcosecha como: color, sólidos solubles, acidez titulable y textura, por ello es posible diseñar un sistema de crecimiento artificial y eficiente para alimentar a una población en constante crecimiento (Darko et al., 2014) y que a la vez

demanda alimentos de mayor calidad nutricional y que proporcionen beneficios a la salud. La intensidad de luz también es uno de los elementos ambientales más importante para el crecimiento de las plantas (Naoya et al., 2008).

La integración de diodos emisores de luz (LED) en los sistemas de iluminación en horticultura ha ido en aumento en la última década (Morrow, 2008; Urrestarazu et al., 2016). A diferencia de otros sistemas de iluminación convencional, las LED se están desarrollando como una tecnología que permite el diseño de espectros específicos, dirección e intensidad de la luz (Massa et al., 2008), además de ser un sistema de iluminación con una buena relación de eficiencia energética y beneficio a las plantas (Toledo-Ortiz et al., 2010; Urrestarazu et al., 2016; Massa et al., 2008; Ouzounis et al., 2015).

Existe poca información sobre el efecto del uso de las lámparas LED en determinados aspectos de la horticultura (Urrestarazu et al., 2016) sobre todo en la influencia del espectro sobre el incremento de la calidad funcional. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar el espectro de iluminación de tres diferentes tipos de lámparas LED sobre los parámetros de calidad organoléptica, comercial y calidad dietética en postcosecha de seis variedades de tomate.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

Los experimentos se llevaron a cabo en la Universidad de Almería. Frutos de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) de seis distintas variedades de tomate: A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Bronco, E = Cherry cv. Angelle and F = Cherry cv. Santa West. Los frutos fueron obtenidos de invernaderos comerciales de la comarca de Almería en estado de madurez turning (USDA, 2005). En el caso de los tomates rama se recolectaron de la parte central de la rama. La unidad experimental fue de cuatro frutos de cada variedad por repetición, teniendo cuatro repeticiones. Los muestreos se hicieron a los seis días, cuando los frutos alcanzaron su estado de madurez rojo maduro (USDA, 2005). Para el caso de los cherry, se utilizaron 20 tomates de cada variedad por cuatro repeticiones en cada tratamiento. Los frutos fueron colocados con la parte apical sobre la base. La temperatura se mantuvo constante a 19 °C y 85% de humedad relativa (Tiwari et al., 2013). Los tratamientos de iluminación los frutos fueron realizados durante una hora por día.

Al inicio y al final del experimento se homogenizaron los frutos para medir el color, la textura, los sólidos solubles totales (TSS), la acidez titulable y el contenido de licopeno mediante espectrometría de masas por HPLC (Guil-Guerrero y Reboloso-Fuentes, 2009).

4.2.2 Tratamientos de espectros de luz LED

Los tratamientos consistieron en colocar los tomates bajo luz LED, excepto el tratamiento control (T0) que se mantuvo en oscuridad; los tratamientos de iluminación LED fueron: L18 T8 Roblan[®] = T1; L18 AP67 Valoya[®] = T2 y L18 AP673L Valoya[®] = T3, con 4 lámparas m⁻² cada tratamiento.

El espectro de los tratamientos de iluminación (Fig. 1) se midió con un UPRTek MK350S LED meter (Miaoli County, Taiwan), los parámetros cuantitativos de intensidad de luz se obtuvieron con un HD 2302.0 lightmeter (Delta OHM[®], Veneto, Italy). Los sensores radiométricos utilizados fueron LP 471 PAR y LP 471 PHOT para medir la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) obteniendo los valores en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e iluminancia (lux), respectivamente (Tabla 1). La ratio de R:FR se calculó con los valores facilitados por las casas comerciales de las iluminarias.

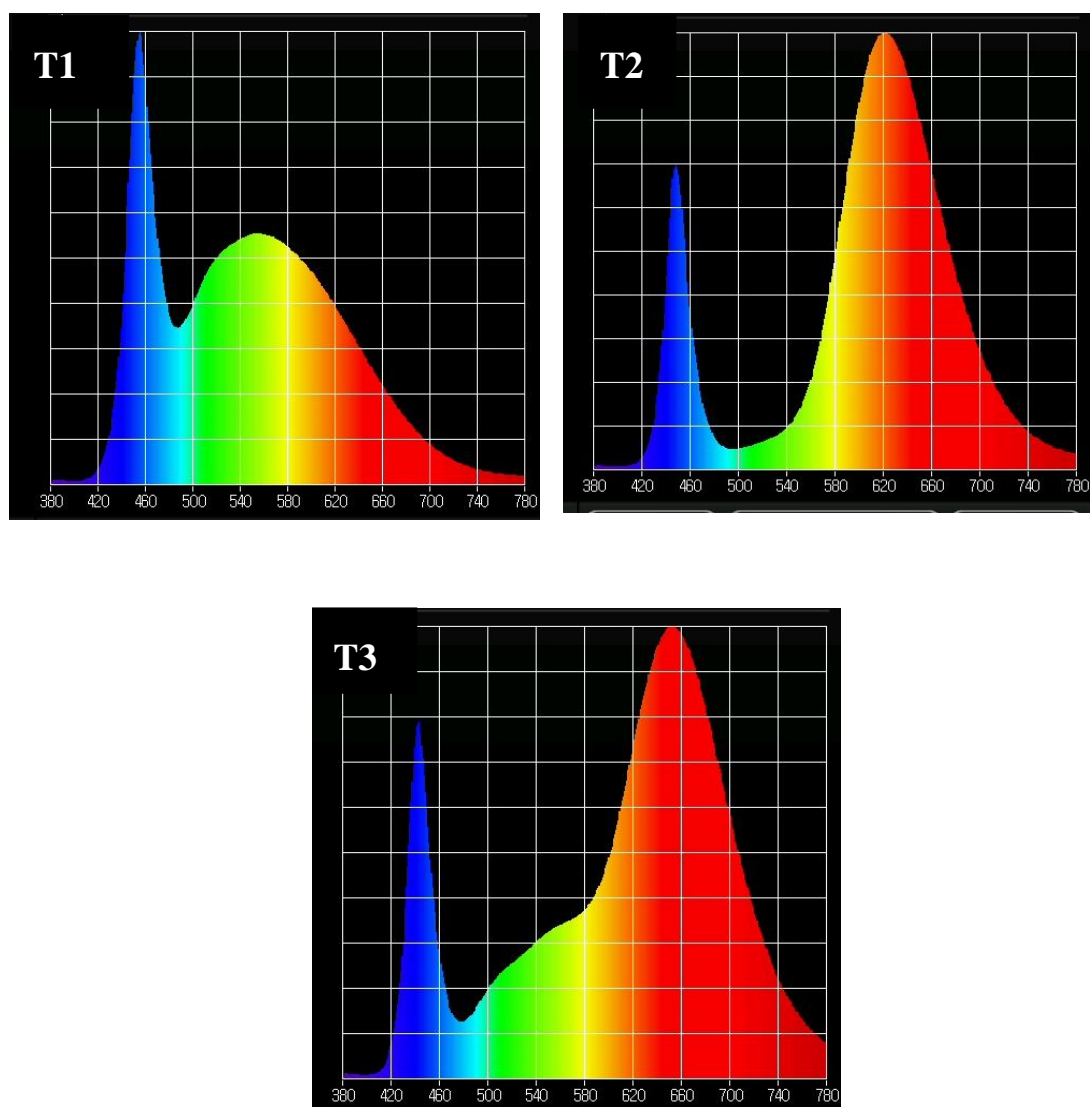


Fig. 1. Espectro de luz LED. T1 = L18 T8 Roblan[®], T2 = L18 AP67 Valoya[®] y T3 = L18 AP673L Valoya[®].

Tabla 1. Densidad del flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), iluminancia (lux) y ratio de los tratamientos de luz LED usados.

Tratamiento de luz	Tipo de lámpara LED	PPFD	Lux	Ratio R:FR
T0*	Obscuridad	-	-	-
T1	L18 T8 Roblan [®]	92,60	4181	2,10
T2	L18 AP67 Valoya [®]	64,05	2250	3,11
T3	L18 AP673L Valoya [®]	84,48	2900	7,60

*Control.

PPFD = Densidad del flujo de fotones fotosintéticos.

R:FR = Ratio rojo:rojo lejano.

n=4.

4.2.3 Calidad comercial

El color fue medido con un colorímetro (Espectrofotómetro CM-3500D, Konica Minolta®, Madrid, España) equipado con un observador a 10° y el iluminante D65. Se determinaron las coordenadas del espacio de color CIE, con valores L*, a* y b*. Se hizo la media de 6 mediciones de cada fruto (dos en la zona peduncular, tres en la zona ecuatorial y dos en la zona distal). Los valores a* y b* fueron utilizados para estimar el índice de color (a*/b*) como lo recomendaron varios autores (López Camelo y Gómez, 2004; Hyman et al., 2004; Brandt et al., 2006; Helyes y Lugasi, 2006). Se utilizó un medidor de presión de frutas FT327 (Bertuzzi, Italia) para las medidas de firmeza.

4.2.4 Calidad organoléptica

Se obtuvo el jugo del fruto utilizando un extractor. El contenido total de los sólidos solubles (TSS) se midió con un refractómetro de mano (ATAGO, Japón). Para la acidez titulable se tomaron 20 mL del jugo filtrado al vacío para su titulación con NaOH 0.1 N.

4.2.5 Determinación de licopeno

La extracción de carotenoides se realizó con el método descrito por Wills et al. (1988). A 25 g de la muestra fresca se agregaron 50 mL de éter dietílico y se agitó durante 60 minutos, el sobrenadante fue separado y se repitió el proceso con 25 mL y 30 minutos de agitación. Se agregaron 5 mL de solución metanólica de hidróxido potásico al 10% (m/v) y la mezcla se mantuvo 1 hora a 4 °C en oscuridad. Posteriormente se hicieron lavados con agua del extracto hasta eliminar los jabones formados, se evaporó el disolvente en rotavapor y se recuperaron los carotenoides con 3 mL de metil-terbutil-éter.

La separación y cuantificación de licopeno fue llevada a cabo en un equipo HPLC Cromatógrafo Finningan Surveyor (Thermo Electron, UK) equipado con una columna de fase reversa (Hypersil Gold, 250 x 4.6 mm d.i., 5 mm de tamaño de partícula) y un detector UV. Para la separación se utilizó un sistema binario de disolvente en elución isocrática (acetonitrilo-metanol 85:15 v/v). El flujo de la fase móvil fue de 1 mL por minuto, la temperatura de la columna fue de 32 °C y la longitud de onda de detección fue de 476 nm. La cantidad de licopeno en cada muestra fue calculada utilizando una curva patrón con cantidades de licopeno conocidas (Ishida et al., 2001).

4.2.6 Diseño experimental y análisis estadístico

Se realizó un diseño experimental en bloques completamente al azar (Montgomery, 2004). Los resultados se sometieron a un análisis de la varianza (ANOVA), comparación de medias con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$) y correlaciones lineales y cuadráticas utilizando el paquete estadístico Statgraphics Centurion® XVI. II.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Parámetros de irradiación de las iluminarias

Con un mismo consumo eléctrico (18 watts por iluminaria) se registra una importante diferencia, de un 31 y 46% de PPF_D ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e iluminancia (lux) en los tratamientos de light LED a favor de la iluminaria T1 en comparación con los tratamientos T2 y T3, respectivamente. Similares resultados fueron recogidos por Urrestarazu et al. (2016) cuando usaron iluminarias de uso hortícola frente a otras de uso convencional (Tabla 1).

4.3.2 Efectos sobre los parámetros de calidad comercial y propiedades organolépticas

A excepción de los TSS y en la variedad de Cherry cv. Santa West, la luz ejerció un efecto significativo en todos los parámetros de calidad medidos (Tabla 2). Estos resultados de un incremento de los TSS solo en cherry coinciden con los de Lei et al. (2016) Al aplicar luz se registró una diferencia significativa en la firmeza en las variedades de tomate redondo A, y dos de las variedades tipo cherry (D y F). A excepción de la variedad del tomate redondo tratado en oscuridad, las iluminarias de mayor proporción R y FR (T2 y T3) mantuvieron una mayor firmeza con relación a la iluminaria T1 o la oscuridad (T0). Arias et al. (2000) tampoco encontraron en condiciones similares, 23 °C y tratamiento de luz roja en variedades de tomate redondo y pera, así como Gergoff et al. (2016) que no encontraron algún cambio en la firmeza de tomate cv. “Elpida”, en la acidez, en los TSS ni en el pH, aportando pulsos de luz con radiaciones de luz blanca. Otros autores (Lee et al., 1997; Liu et al., 2009) encontraron resultados contrarios con pérdidas de firmeza en almacenamiento a 22 °C por 6 días y 12-14 °C por 21 días. A excepción del tomate rama (C), la acidez titulable mostró diferencias significativas en función del tipo de variedad, pero solo las medias mostraron diferencias significativas claras a favor de la lámpara de mayor ratio R:FR (T3). Gergoff et al. (2016) no encontró algún cambio en la acidez titulable con pulso de radiaciones de luz blanca, en las medias de acidez titulables nuestros datos tampoco registraron diferencia con la luz blanca (T1) respecto a la oscuridad (T0).

La relación de color (a^*/b^*) de los tomates aumentó en todos los casos tras los 6 días de postcosecha (Fig. 2). Los valores finales de la relación de color (a^*/b^*) de los tomates tipo cherry (D, E y F) fue mucho menor (en un 50%) respecto a los tomates de las variedades redondo (A), pera (B) y rama (C).

Tabla 2. Parámetros de calidad de seis variedades de tomate.

Luz	Firmeza (kg)							Sólidos Solubles Totales (%)							Acidez Titulable (% ácido cítrico)						
	A	B	C	D	E	F	Media	A	B	C	D	E	F	Media	A	B	C	D	E	F	Media
T0	9,3a*	7,5a	5,3b	4,9c	4,8a	5,1b	6,2b	4,0a	4,0a	5,0a	6,8a	6,1a	4,0b	5,0a	0,191b	0,151b	0,142a	0,081b	0,031c	0,061b	0,110b
T1	6,2b	8,6a	5,5ab	4,8c	5,1a	4,2c	5,8c	3,5a	3,5a	4,9a	6,2a	6,6a	4,2b	4,8a	0,172bc	0,151b	0,132a	0,070c	0,048a	0,075a	0,108b
T2	8,8a	6,7a	7,9a	6,7a	5,4a	4,3c	6,6a	4,0a	4,2a	4,0a	6,6a	6,5a	4,1b	4,9a	0,132c	0,113b	0,156a	0,099a	0,051a	0,078a	0,105c
T3	6,8b	8,0a	5,8a	6,0b	5,4a	6,4a	6,4a	4,0a	3,5a	4,0a	6,5a	6,7a	4,5a	4,9a	0,243a	0,261a	0,143a	0,094ab	0,041b	0,058b	0,140a

Valores realizados después de seis días en los que: T0 = obscuridad, T1 = L18 T8 Roblan[®], T2 = L18 AP67 Valoya[®] y T3 = L18 AP673L Valoya[®].

A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Bronco, E = Cherry cv. Angelle y F = Cherry cv. Santa West.

*Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento al $P \leq 0,05$ usando una prueba Tukey. n=4.

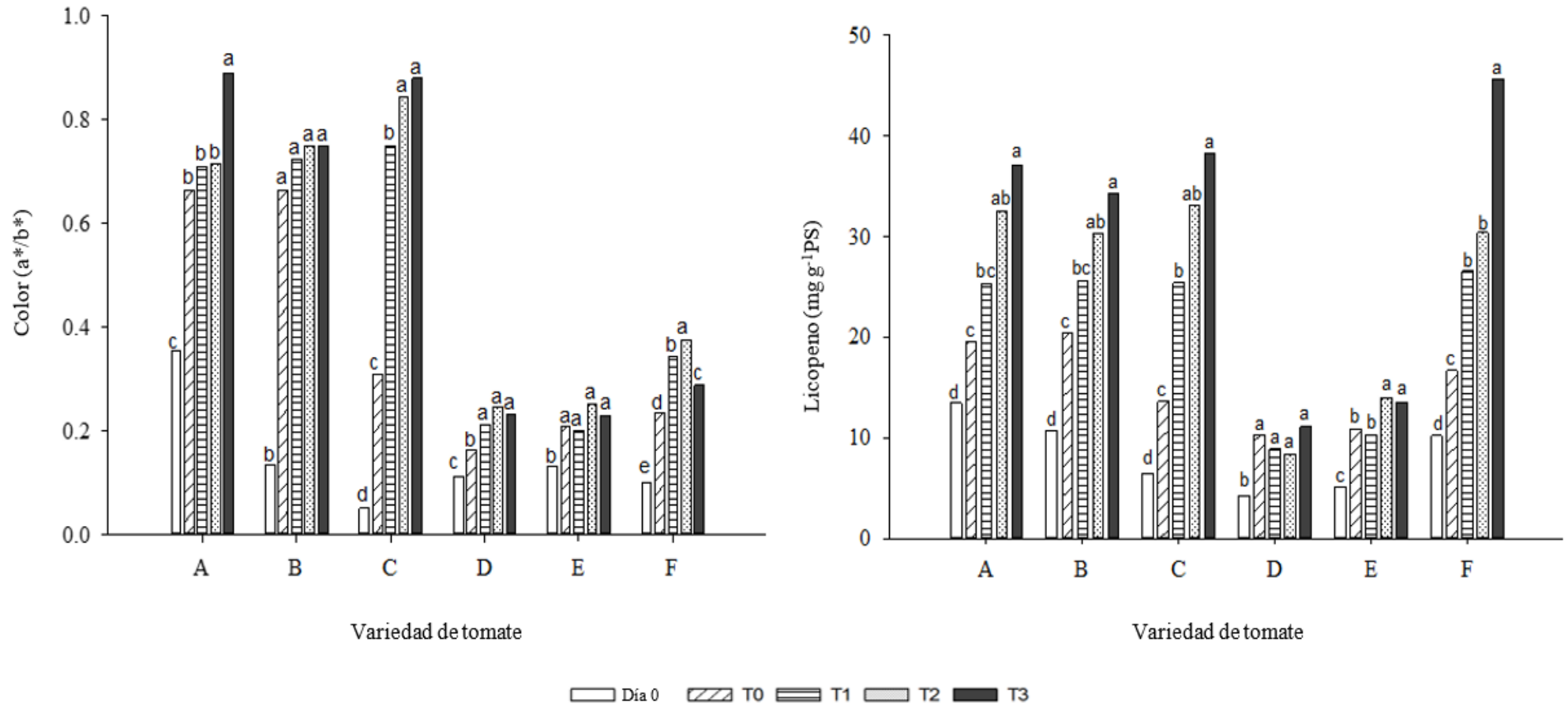


Fig. 2. Color y contenido de licopeno en diferentes tratamientos de luz LED de seis distintas variedades de tomate en postcosecha. Punto inicial (Day 0) y después de seis días con T0 = obscuridad, T1 = L18 T8 Roblan[®], T2 = L18 AP67 Valoya[®] y T3 = L18 AP673L Valoya[®]. A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Bronco, E = Cherry cv. Angelle y F = Cherry cv. Santa West. Letra distinta indican una diferencia significativa entre los tratamientos de cada variedad al $P \leq 0,05$ por una prueba Tukey. n = 4.

4.3.3 Contenido de licopeno

El contenido de licopeno aumentó para todas las variedades y tratamientos desde el día 0 al 6. Después de los seis días en la cámara de postcosecha, las variedades F y C fueron las que mayor contenido de licopeno obtuvieron respecto al tratamiento control (más de 60%). Ha sido descrita la correlación entre el aumento de licopeno y el del valor de la ratio de color (a^*/b^*) (Thomas y Jen, 1975; Alba et al., 2000; Dumas et al., 2002; Gergoff et al., 2016; Lei et al., 2016). Sin embargo, la variedad F fue la única que no mostró una correlación positiva entre ambos. A excepción de la variedad D, todos los tratamientos de luz provocaron un incremento significativo del contenido de licopeno (entre 30% y 45% en función de la variedad). Datos similares obtuvieron autores como D'Souza et al. (1992) y Liu et al. (2009) que hacen referencia a la correlación poco positiva de la relación de color a^*/b^* respecto a la concentración del licopeno, pero no hacen la correlación de los tratamientos de luz como es nuestro caso. Ramos-Bueno et al. (2016) con frutos de tomate "Raf", obtuvieron una correlación entre cantidad de licopeno obtenido con el color (menor relación de color (a^*/b^*), menor cantidad de licopeno).

Estos datos de aumento de los licopenos con la presencia de luz son coincidentes a los mostrados por Dumas et al. (2002) que encontraron un aumento del contenido de licopeno con la luz, mientras que Gergoff et al. (2016) también encontraron un aumento del contenido de licopeno con pulsos de luz nocturna.

El espectro de las iluminarias con mayor proporción de R:FR (T2 y T3) produjeron una mayor proporción de licopeno que la otra lámpara LED (T1). Thomas y Jenn (1975) y Alba et al. (2000) usando lámparas LED rojas durante la primera semana de almacenamiento obtuvieron una acumulación de carotenoides en frutos de tomate con LED roja y Lei et al. (2016) aumentaron el licopeno en tomate cherry hasta los 20 días.

La iluminaria de mayor R:FR (T3) siempre incrementó la presencia de licopeno más que la iluminaria LED blanca (T1); mientras que, en más de la mitad de los tipos de frutos de tomate utilizados, T2 mostró un comportamiento intermedio entre T3 y T1. Similares resultados obtuvieron Schwend et al. (2016) usando la misma iluminaria T3 en albahaca y borraja aumentando el contenido de antioxidantes.

4.3.4 Correlación iluminaria y licopeno

Existe poca información en relación con la calidad de la luz y la proporción de licopeno. Nuestros resultados de los tres parámetros de luz evaluados encontraron que la ratio R:FR

registraron las mayores correlaciones significativas (Fig. 3). Las variedades de mayor calibre (A, B y C) mostraron las correlaciones más bajas, donde la mayor ratio R:FR supuso un incremento del 29% respecto a la ratio R:FR menor. El efecto que producía la ratio R:FR de los cherry no fue tan clara. Sin embargo, para la variedad F, que fue la que obtuvo la mayor correlación significativa (mayor del 99,9) se producía un incremento significativo del 44% a favor de la iluminaria de mayor ratio R:FR (T3 frente a T1).

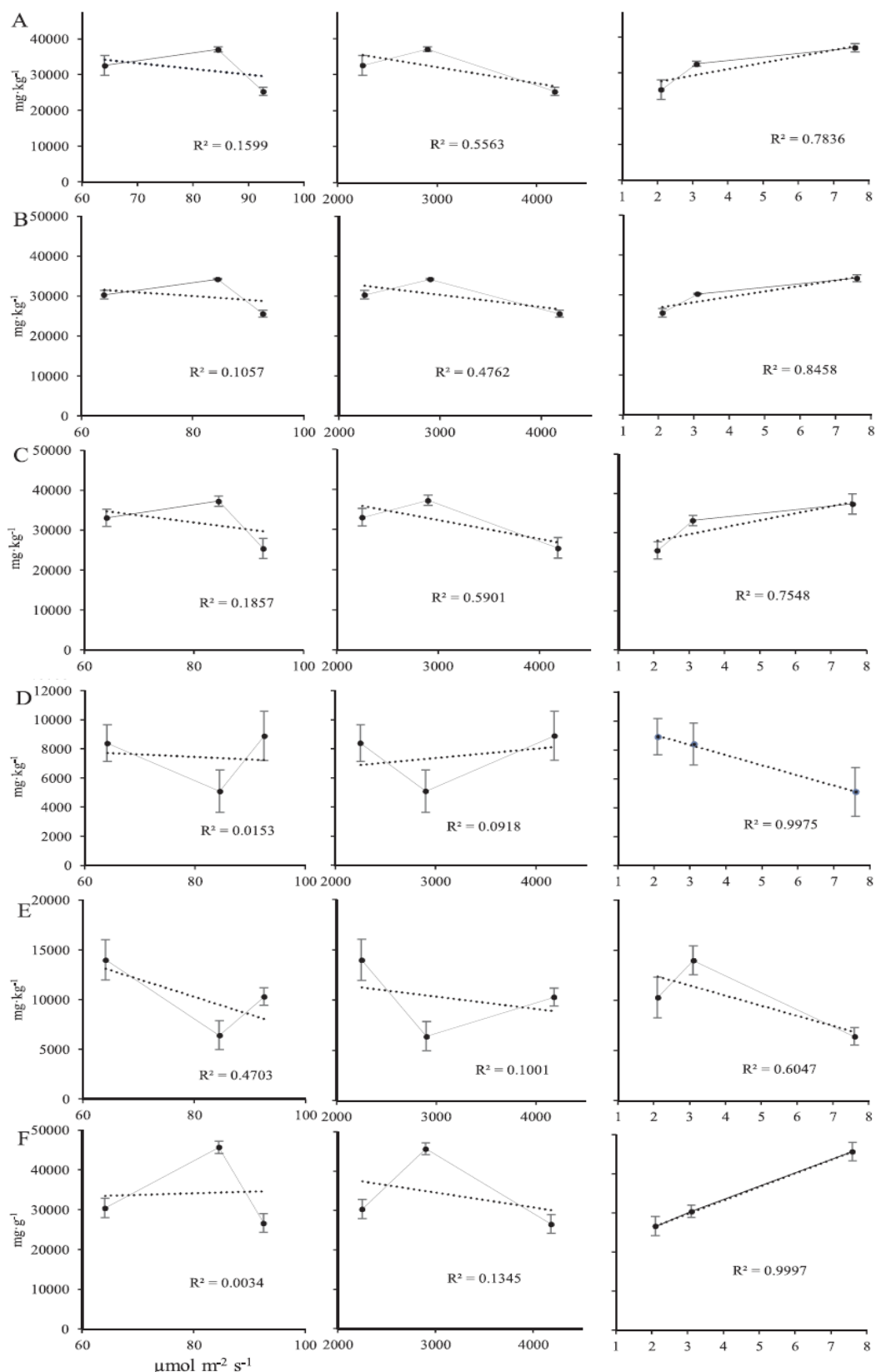


Fig. 3. Relación entre la concentración de licopeno en tomate y los siguientes parámetros de radiación: densidad del flujo de fotones fotosintético (PPFD), iluminancia (lux) y ratio rojo:rojo lejano (R:FR). A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Bronco, E = Cherry cv. Angelle y F = Cherry cv. Santa West. n=4.

4.4 Literatura citada

- Alba, R., M.M. Codonnier-Pratt, L.H. Pratt. 2000. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato. *Plant Physiol* 123:363-370.
- Arias, R., T.C. Lee, D. Specca, H. Janes. 2000. Quality comparison of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) ripened on and off vine. *J Food Sci* 65:545-548.
- Azari, R., Y. Tadmor, A. Meir, M. Reuveni, D. Evenor, S. Nahon, I. Levin. 2010. Light signaling genes and their manipulation towards modulation of phytonutrient content in tomato fruits. *Biotechnol Adv* 28:108-118.
- Brandt, S., Z. Pék, E. Barna, A. Lugasi, H. Lajos. 2006. Lycopene content and color of ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *J Sci Food Agr* 86:568-572.
- Darko, E., P. Heydarizadeh, B. Schoefs, M.R. Sabzalian. 2014. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 3:369.
- Davies, J.N., G.E. Hobson. 1981. The constituents of tomato fruit. The influence of environment, nutrition and genotype. *Crit Rev Food Sci* 15:205-280.
- Demotes-Mainard, S., T. Péron, A. Corot, J. Bertheloot, J.L. Gourrierc, S. Pelleschi-Travier, L. Crespel, P. Morel, L. Huché-Thélier, R. Boumaza, A. Vian, V. Guérin, N. Leduc, S. Sakr. 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environ Exp Bot* 121:4-21.
- Dhandevi, P., J. Rajesh. 2015. Fruit and vegetable intake: Benefits and progress of nutrition education interventions - Narrative Review Article. *Iran J Public Health* 44:1309-1321.
- D'Souza, M.C., S. Singha, M. Ingle. 1992. Lycopene concentration of tomato fruit can be estimated from chromaticity values. *HortScience* 27:465-466.
- D'Souza, C., H.G. Yuk, G.H. Khoo, W. Zhou. 2015. Application of Light-Emitting Diodes in Food Production, Postharvest Preservation, and Microbiological Food Safety. *Compr Rev Food Sci F* 14:719-740.

- Dumas, Y., M. Dadomo, G. Di Lucca, P. Grolier. 2002. Review of the influence of major environmental and agronomic factors on the lycopene content of tomato fruit. *Acta Hort* 579:595-601.
- Ford, N.A., J.W. Erdman. 2012. Jr, Are lycopene metabolites metabolically active? *Acta Biochim Pol* 59:1-4.
- Gergoff, G.E., M.E. Sen, M.L. Alegre, A.R. Chaves, C.G. Bartoli. 2016. Nocturnal low irradiance pulses improve fruit yield and lycopene concentration in tomato. *Sci Hort* 203:47-52.
- Giliberto, L., G. Perrotta, P. Pallara, J.L. Weller, P.D. Fraser, P.M. Bramley, A. Fiore, M. Tavazza, G. Giuliano. 2005. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiol* 137:199-208.
- Giovannucci, E.1999. Tomatoes, tomato-based products, lycopene, and cancer: review of the epidemiologic literature. *J Natl Cancer I* 91:317-331.
- Guil-Guerrero, J.L., M.M. Reboloso-Fuentes. 2009. Nutrient composition and antioxidant activity of eight tomato (*Lycopersicon esculentum*) varieties. *J Food Compos Anal* 22:123-129.
- Helyes, L., A. Lugasi. 2006. Formation of certain compounds having technological y nutritional importance in tomato fruits during maturation. *Acta Aliment Hung* 35:183-193.
- Hyman, J., J. Gaus, M.R. Foolad. 2004. A rapid and accurate method for estimating tomato lycopene content by measuring chromaticity values of fruit purée. *J Am Soc Hort Sci* 129:717-723.
- Ishida, B.K., M. Jason, B. Chan. 2001. A simple, rapid method for HPLC analysis of lycopene isomers. *Pytochemical Analysis* 12:194-198.
- Kader, A.A., R.S. Rolle. 2004. The role of post-harvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce, *FAO Agricultural Services Bulletin* 152, Rome, Italy.
- Krinsky, N.I., E.J. Johnson. 2005. Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Mol Aspects Med* 26:459-516.

- Lee, G.H., J.M. Bunn, Y.J. Han, G.D. Christenbury. 1997. Ripening characteristics of light irradiation tomatoes. *J Food Sci* 62:138-140.
- Lei, J., N. Zhang, R. Yan, L. Xu, Y. Li, W. Guan. 2016. Red and blue LED weak light irradiation maintaining quality of cherry tomatoes during cold storage. *Chinese Society of Agricultural Engineering* 32:248-254.
- Li, H., C. Tang, Z. Xu. 2013. The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis *in vitro*. *Sci Hort* 150:117-124.
- Liu, L.H., D. Zabaraz, L.E. Benett, P. Aguas, B.W. Woonton. 2009. Effects of UV-C, red light and sun light on the carotenoid content and physical qualities of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chem* 115:495-500.
- López Camelo, A.F., P.A. Gómez. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Hortic Bras* 22:534-537.
- Massa, G.D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43:1951-1956.
- Montgomery, D.C. 2004. *Diseño y análisis de experimentos*. Segunda edición, ed. Limusa Wiley, Arizona State University, USA.
- Morrow, R.C. 2008. LED lighting in horticulture. *HortScience* 43:1947-1950.
- Moya, C., E. Oyanedel, G. Verdugo, M.F. Flores, M. Urrestarazu, J.E. Álvaro. 2017. Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato. *HortScience* 52:868-872.
- Müller, L., C. Caris-Veyrat, G. Lowe, V. Böhm. 2016. Lycopene and its antioxidant role in the prevention of cardiovascular diseases-a critical review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 56:1868-1879.
- Naoya, F., F. Mitsuko, O. Yoshitaka, S. Sadanori, N. Shigeo, E. Hiroshi. 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *J Sci Hort* 115:176-182.
- Ouzounis, T., B. Razi Parjikolaei, X. Fretté, E. Rosenqvist, C.O. Ottosen. 2015. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield

of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa*. *Front Plant Sci* 6:19.

Centro de Postcosecha Universidad de California, 1997. Recomendaciones para el mantenimiento de la calidad postcosecha del tomate. http://postharvest.ucdavis.edu/Commodity_Resources/Fact_Sheets/Datastores/Vegetables_English/?uid=36&ds=799 (Acceso el 24 de febrero de 2018).

Ramos-Bueno, R.P., R. Romero-González, M.J. González-Fernández, J.L. Guil-Guerrero. 2016. Phytochemical composition and in vitro anti-tumour activities of selected tomato varieties. *J Sci Food Agric* 97:488-496.

Sandmann, G., S. Romer, P.D. Fraser. 2006. Understanding carotenoid metabolism as a necessity for genetic engineering of crop plants. *Metab Eng* 8:291-302.

Schwend, T., D. Prucker, S. Peisl, A. Nitsopoulos, H. Mempe. 2016. The rosmarinic acid content of basil and borage correlates with the ratio of red and far-red light. *J Hort Sci* 81:243-247.

Shao, G.C., S. Deng, N. Liu, M.H. Wang, D.L. She. 2015. Fruit quality and yield of tomato as influenced by rain shelters and deficit irrigation. *J Agr Sci Tech* 17:691-704.

Statgraphics Centurion XVII, 2018. Statgraphics Net for Windows 7, Madrid, España.

Thomas, R.L., J.J. Jen. 1975. Red light intensity y carotenoids biosynthesis in ripening tomatoes. *J Food Sci* 40:566-568.

Tiwari, G., D.C. Slaughter, M. Cantwell. 2013. Nondestructive maturity determination in green tomatoes using a handheld visible and near infrared instrument. *Postharvest Biol Technol* 86:221-229.

Toledo-Ortiz, G., E. Huq, M. Rodríguez-Concepción. 2010. Direct regulation of phytoene synthase gene expression and carotenoid biosynthesis by photochrome-interacting factors. *Proc Natl Acad Sci USA* 107:1626-11631.

Toor, R.K., G.P. Savage. 2006. Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chem* 99:724-727.

Urrestarazu, M., C. Nájera, M. Gea. 2016. Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience* 51:268-271.

- USDA, Shipping Point and Market Inspection Instructions, 2005. USDA Agricultural Marketing Service, Washington, DC.
- Vogel, J.T., D.M. Tieman, C.A. Sims, A.Z. Odabasi, D.G. Clark, H.J. Klee. 2010. Carotenoid content impacts flavor acceptability in tomato (*Solanum lycopersicum*). *J Sci Food Agr* 90:2233-2240.
- Wills, R.B.H., H. Nurdin, M. Wootton. 1988. Separation of carotenes and xanthophylls in fruit and vegetables by HPLC. *J Micronutr Anal* 4:87-98.

5. CAPÍTULO 3

Efecto de la intensidad y calidad espectral de la luz LED sobre el rendimiento y la acumulación de nitratos en las hortalizas

Cinthia Nájera^a, Miguel Urrestarazu^a

^aCentro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Almería, España

Revista: HortScience

Factor de impacto (JCR, 2018): 0,906

Categoría: Horticultura

Posición de la revista dentro de la categoría 2018: (17/36)

Cuartil: Q2

Resumen

En la actualidad existen tendencias en la producción de alimentos en beneficio de la salud humana. Es bien conocido el efecto negativo de la ingesta excesiva de nitratos acumulados en vegetales, causando preocupación a nivel mundial. La luz juega un papel importante en la acumulación de este ion. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de espectros de diodos emisores de luz (LED) usados en iluminación artificial en horticultura, sobre la acumulación de nitratos en hortalizas de hojas y raíz en comparación con iluminarias de LED blanca. Se realizaron dos experimentos independientes en cámara de cultivo. En el experimento 1 se utilizaron seis especies de plantas acumuladoras de nitrato, 4 de ellas hortalizas de hoja (rúcula, espinaca, lechuga y escarola) y dos de raíz (rábano y remolacha); y en el experimento 2 se utilizaron cuatro cvs. de lechuga. En ambos experimentos los tratamientos fueron dos espectros: T1 = AP67 Valoya® y el testigo T0 = blanca Roblan® a dos intensidades de iluminación alta (H) y baja (L) con 16/8 h (día/noche) de fotoperiodo. Se midió la biomasa fresca y la concentración de nitratos a los 35 días de tratamiento después del trasplante. Se obtuvo un importante y significativo incremento del 50% del peso fresco medio en todas las especies al aumentar la intensidad luminosa. A excepción de la espinaca en el tratamiento de baja intensidad, todos los valores del contenido en nitratos estuvieron por debajo de los límites máximos de la regulación europea. El contenido de nitrato disminuyó generalmente al incrementar la intensidad, este beneficio fue mayor en el tratamiento T1. Solo en un caso, H en remolacha, T0 mostró una reducción del contenido de nitratos frente a T1. Por lo que en general se registró una significativa e importante reducción del contenido de nitratos a favor de T1. En el experimento 1 L la disminución de nitrato fue del 18%, mientras que en H fue del 35%. En el experimento 2 el descenso de contenido de nitratos fue del 10% para L y del 21% en H. Un beneficio mayor en la disminución de nitratos se obtiene con un espectro adecuado a la fotosíntesis a una baja intensidad lumínica.

Palabras clave: eficiencia de iluminación, cubierto, interior, hortaliza de hoja, dieta saludable, fotosíntesis, regulación

5.1 Introducción

La concentración de nitrato acumulado en las plantas depende de la variedad o cultivar (cv) (Urrestarazu et al., 1998; EFSA 2008; Álvaro et al., 2016), de la época del año en que se cultiva (Carrasco et al., 2006), de la radiación que recibe (Roorda, 1984; Blom-Zandstra, 1989), del sistema de cultivo empleado (Carrasco et al., 2006; Nicola et al., 2007), de las

buenas prácticas de manejo y los iones nutritivos aplicados (Urrestarazu et al., 1998; Fontana y Nicola, 2009). El nitrato se encuentra en vegetales, frutas, carnes, pescados, cereales y en varios productos que forman parte de la dieta básica de los seres humanos (Gürkan y Altunay, 2018). Según la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR, 2015), el nitrato es una fuente de nitrosaminas cancerígenas mediante los nitritos (Addiscott, 2006; Cometti y Furlani, 2009), comprometiendo seriamente sus características sanitarias sobre todo, ha preocupado el consumo de hortalizas acumuladoras de nitratos en niños menores de 6 años según la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2010), porque el 75% de los nitratos que consumen son suministrados por verduras (Hill, 1990).

Rúcula, espinaca, lechuga y escarola son vegetales que se consumen en crudo, son especies con tendencia a alcanzar altas concentraciones en hojas y nervaduras, y sin restricción a la ingesta diaria (Cometti et al., 2011; Gent, 2016); la remolacha y rábano también son considerados hortalizas de raíz fuente de nitratos (EFSA, 2008).

Las especies consideradas en este trabajo son ampliamente cultivadas en España, según datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) y del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España (MAPA), estos cultivos han convertido España como uno de los cinco países con mayor producción durante 20 años (1993 al 2013); la superficie de cultivo es 3686, 34862, 33168, 2200 y 282 ha para espinaca, lechuga, remolacha, escarola y rábano, respectivamente; con producciones en t de 67 mil, 930 mil, 3 millones 240 mil, 59 mil y 5 mil, respectivamente (FAOSTAT, 2016; MAPA, 2016).

Es bien conocido desde hace décadas (p.ej. Corré y Breimer, 1979; Sanchez et al., 2005; Santamaria, 2006; Carrasco et al., 2006; Hsu et al., 2009; Chan, 2011), hasta la actualidad (Wojciechowska, et al., 2015; Colla et al., 2018; Bantis et al., 2018), de los altos niveles de nitrato encontrados en vegetales, especialmente en las hojas y raíces. En consecuencia, desde el 2002, la Unión Europea estableció niveles máximos para determinados contaminantes en los alimentos, en 2011 actualizaron los niveles máximos: 5000 y 4000 mg NO₃⁻ kg⁻¹ de peso fresco para lechugas cosechadas en invierno y primavera, respectivamente; la espinaca tiene como contenido máximo 3500 y 2000 mg NO₃⁻ kg⁻¹ de peso fresco cosechadas en invierno y primavera, respectivamente; la rúcula, es quien presenta los niveles de contenido de nitrato más altos: 7000 y 6000 mg NO₃⁻ kg⁻¹ de peso fresco cosechados en invierno y verano, respectivamente; 2500 mg NO₃⁻ kg⁻¹ de peso fresco para lechuga Iceberg por el Reglamento

de la Comisión Europea (EC, 2002; EC, 2006; EC, 2011). Para el caso de cultivos como remolacha, rábano y escarola, en 2008 EFSA, ha realizado un informe de referencia de los nitratos en algunas hortalizas como: escarola con una media de 523 mg NO₃⁻ kg⁻¹ de peso fresco, rábano 967 mg NO₃⁻ kg⁻¹ de peso fresco y remolacha 1379 mg NO₃⁻ kg⁻¹ de peso fresco (EFSA, 2008).

Las plantas cultivadas en sistemas hidropónicos muestran niveles de nitratos más altos en comparación con las que se cultivan en los sistemas convencionales (Beninni et al., 2002), aún a pesar de ser cultivadas con un sistema controlado de luz suplementaria (Lin et al., 2013). Pese a las prácticas de cultivo mejoradas y las tecnologías actuales, asociadas con una estricta aplicación de éstas, en determinadas regiones de la Unión Europea no es posible conseguir un contenido de nitratos en lechugas y en espinacas inferior a los límites máximos actuales (EC, 2011).

Autores coinciden en una estrecha relación entre la acumulación de nitrato en hortalizas y la intensidad de luz (Steingröver et al., 1986; Chadjaa et al., 1995; Fukuda et al., 1999; Ohashi et al., 2007; Cometti et al., 2011; He et al., 2015), ya que la fotosíntesis es la que ocasiona captación y asimilación de los nitratos en las hortalizas (Cavaiuolo y Ferrante, 2014).

En los últimos años, existen técnicas eficaces para el crecimiento y desarrollo morfológico de las plantas, sobre todo en las cultivadas bajo sistema sin suelo y en estructuras cerradas y controladas bajo luces LED (Johkan et al., 2012; Urrestarazu et al., 2016). Este avance en la agricultura puede ser beneficioso para la disminución de nitrato en plantas que más acumulan y, sobre todo, que son de las más consumidas en el mundo. Existen algunos trabajos que relacionan los contenidos de nitratos y la calidad de lámparas fluorescentes en hojas (p.ej. Deng et al., 2000; Ohashi et al., 2007; Seifu, 2017), pero pocos sobre la calidad de espectros LED como un instrumento beneficioso para hacer alimentos más sanos (Lin et al., 2013; Wojciechowska et al., 2015; Nájera et al., 2018), sobre todo para cultivos hidropónicos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de espectros de diodos emisores de luz (LED) usados en iluminación artificial en horticultura, sobre la acumulación de nitratos en hortalizas de hojas y raíz en comparación con iluminarias de LED blanca.

5.2 Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad de Almería (sur de España, 36° 49' 38.1" N, 2° 24' 19.3" W), en una cámara de cultivo controlada de 10 m x 2.5 m.

5.2.1 Tratamiento de LED

Se usaron lámparas LED blancas L18 T8 Roblan[®] (Toledo, Spain) como control (T0) y L18 T8 AP67 de Valoya[®] (Helsinki, Finland) como el espectro a evaluar (T1). Cada tratamiento tenía dos intensidades de luz: T0 = 85 y 117 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, baja (L) y alta (H) intensidad con cuatro y seis lámparas por metro cuadrado, respectivamente; y T1 = 52 y 95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, baja y alta intensidad, respectivamente. Las lámparas tuvieron una longitud de 120 cm. Las especificaciones espectrales, los valores de luz cuantitativa, densidad de intensidad de flujo de fotones ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y la iluminancia (lux), son descritos en un trabajo anterior por Urrestarazu et al. (2016). El fotoperiodo consistió en 16/8 h (día/noche) a una temperatura de 28 a 18 °C (día/noche) y de 85 a 80% de humedad relativa.

5.2.2 Experimentación y material vegetal

El trabajo se dividió en dos experimentos con diferentes especies vegetales:

5.2.2.1 Experimento 1

Se utilizaron seis especies: rúcula (*Eruca sativa* Mill. cv. Enza), espinaca (*Spinacia oleracea* L. cv. Esmer), lechuga (*Lactuca sativa* L. cv. Maravilla de verano), escarola (*Cichorium intybus* L. cv. Cabello de ángel), rábano (*Raphanus sativus* L. cv. Redondo rojo) y remolacha (*Beta vulgaris* L. cv. Detroit 2).

5.2.2.2 Experimento 2

Se utilizaron cuatro variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.): Batavia (cv. Maravilla de verano), Cogollo (cv Astorga), Romana (cv. Cervantes) e Iceberg (cv. California).

En estado de cuatro hojas verdaderas fueron trasplantadas en macetas de 0,6 L rellenas con fibra de coco, posteriormente colocadas en la cámara de cultivo y fertirrigadas con una solución estándar recomendada por Sonneveld y Straver (1994).

5.2.3 Cosecha

La biomasa vegetal se midió a los 35 días después de trasplante, conservadas en frío hasta su análisis para ser llevadas a laboratorio en bolsas de plástico ziploc dentro de un contenedor

isotérmico a temperatura controlada. Se utilizaron solo las partes comestibles para ser analizados. El peso fresco se determinó usando una balanza analítica de precisión OHAUS Adventurer® con cuatro décimas de gramo de precisión.

5.2.4 Análisis de nitrato

El contenido de nitratos se realizó por el método descrito por Urrestarazu et al. (1998) mediante cromatografía iónica y con un medidor digital de respuesta rápida de nitrato (NO_3^-) LAQUA Twin (LAQUA Twin Nitrate Meter, Spectrum Technologies, Inc.) descrito por Chang y Chang (2014). Las medidas de rúcula, espinaca, lechuga y escarola se obtuvieron de la savia de las hojas, para el caso del rábano y remolacha se trituró el bulbo o raíz, la savia y zumo obtenidos se almacenaron en tubos de microcentrífuga de 2 mL hasta su análisis.

5.2.5 Análisis estadístico

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con 4 repeticiones por 4 tratamiento y 5 plantas por repetición, más bordes (Montgomery, 2004). La media de los datos se analizó a diferentes niveles de significancia. Los datos fueron sometidos a un análisis de la varianza, y las medias fueron comparados con una prueba Tukey usando el programa estadístico Statgraphics Centurion® 16.1.15 (Warrenton, VA) (2018). Algunos datos fueron analizados mediante una prueba *t-Student* en Excel 2016 Microsoft Office 2010.

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Peso fresco

El incremento medio al aumentar la intensidad lumínica fue del 50% en todas las especies evaluadas en cualquiera de los espectros (Tabla 1). La rúcula fue la que obtuvo un mayor porcentaje de crecimiento en peso fresco (66%) al incrementar la intensidad lumínica y usar LED blanca; la escarola y rábano fueron las especies que obtuvieron mayor beneficio (ambas 65%) al ser cultivadas a alta intensidad con el T1 correspondiente al espectro específico a la fotosíntesis. Sin embargo, las plantas cultivadas en el tratamiento T1 fue 6% superior que las cultivadas en T0. Una mejora de productividad se mostró con el T1 a baja intensidad respecto al T0, incrementando el peso fresco de las especies entre un 6 y 58%, donde la rúcula fue la que mayor crecimiento vegetativo obtuvo. En el caso de las plantas cultivadas con alta intensidad lumínica en T1, se obtuvo un incremento medio de 20% más que las cultivadas con T0, donde el rábano aumentó un 45% su peso fresco. Ya se había encontrado que un cambio de espectro e intensidad mejora los parámetros de crecimiento vegetativo:

Yang y Park (2015) y Samuolienè et al. (2011) en rábano, Urrestarazu et al. (2016) en lechuga, tomate y pimiento y Burattini et al. (2017) en espinaca. El T1 produjo un aumento significativo de peso fresco que varió entre el 12% para lechuga y el 45% para rábano. Trabajando en similares condiciones Urrestarazu et al. (2016) el crecimiento vegetativo se duplica, o en algunos casos es mayor hasta del 200% y Samuolienè et al. (2011) han obtenido un crecimiento significativo (90% más) en rábano.

El comportamiento de las variedades de lechuga (Tabla 2), para la intensidad (baja y alta) y el espectro específico (T0 vs T1) tuvo un comportamiento muy similar al registrado en el resto de las hortalizas. El cv. California mostró un mayor crecimiento que el resto de los cvs. al ser cultivada con LED blanca (82%) y con LED T1 (72%) incrementando la intensidad lumínica, así como en el T1 el cv. Maravilla de verano incrementó el peso fresco de un 72% con alta intensidad lumínica. Al comparar los espectros de luz, se mostró que el cv. Astorga fue el que incrementó más que el resto de los cvs., tanto en baja como en alta intensidad lumínica al ser cultivadas con T1, de 60 y 46%, respectivamente.

Tabla 1. Efecto de la intensidad lumínica y composición espectral en el peso total de la parte comestible (g planta⁻¹ peso fresco) de seis vegetales.

Cultivo	Intensidad	T0	T1	<i>P</i>
Rúcula cv. Enza	L	5,5	13,4	***
	H	16,5	28,1	***
	<i>P</i>	***	***	
Espinaca cv. Esmer	L	7,1	8,8	**
	H	12,3	14,7	***
	<i>P</i>	***	***	
Lechuga cv. Maravilla de verano	L	29,6	33,2	**
	H	38,7	50,2	**
	<i>P</i>	*	***	
Escarola cv. Cabello de ángel	L	11,3	12,1	ns
	H	26,8	34,7	*
	<i>P</i>	***	***	
Rábano cv. Redondo rojo	L	3,5	2,9	ns
	H	4,5	8,3	***
	<i>P</i>	*	***	
Remolacha cv. Detroit 2	L	22,4	36,5	*
	H	53,2	70,6	*
	<i>P</i>	***	***	

T0 = L18 T8 Roblan[®], T1 = L18 AP67 Valoya[®]. L y H representan 4 y 6 lámparas por m², respectivamente.

*, **, ***, y ns indican diferencias significativas para filas y columnas al $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$, $P \leq 0,001$, y no significancia, respectivamente. n=5.

Tabla 2. Efecto de la intensidad lumínica y composición espectral en el peso total de la parte comestible (g planta⁻¹ peso fresco) de cuatro variedades de lechuga.

Veriedad	Intensidad	T0	T1	P
Batavia cv. Maravilla de verano	L	14,5	21,0	*
	H	50,9	76,3	**
	P	***	***	
Cogollo cv. Astorga	L	6,5	16,6	***
	H	13,8	25,8	***
	P	***	**	
Romana cv. Cervantes	L	16,9	29,2	***
	H	49,7	70,3	***
	P	***	***	
Iceberg cv. California	L	5,1	4,7	ns
	H	29,8	16,9	**
	P	***	***	

T0 = L18 T8 Roblan[®], T1 = L18 AP67 Valoya[®]. L y H representan 4 y 6 lámparas por m², respectivamente.

*, **, ***, y ns indican diferencias significativas para filas y columnas al $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$, $P \leq 0,001$, y no significancia, respectivamente. n=5.

5.3.2 Efecto en el contenido de nitratos

5.3.2.1 Efecto en especies vegetales

Comparativa con los valores medios (europeos y americanos) y límites máximos legales. La Fig. 1 muestra los valores medios de los resultados obtenidos del contenido de nitrato. En rúcula y lechuga, se registraron un 16 y 60% menor de los límites legales (EC, 2011); también la espinaca cultivada a alta intensidad lumínica obtiene valores menores (un 54% menor). Para el rábano y remolacha (vegetales de raíz) los datos medios fueron un 13 y 10% por debajo de los exigidos por EFSA (2008), respectivamente. Los contenidos de nitratos en espinaca cultivadas en alta intensidad registraron un significativo valor del 45% menor que los datos medios provenientes de USA (Sanchez et al., 2005); para el resto de las hortalizas (rúcula, espinaca, lechuga y escarola) nuestros valores fueron superiores.

Efecto del contenido de nitrato por la intensidad lumínica. Se registró un descenso del contenido en nitratos con una menor radiación para el caso del espectro T1 en remolacha (con un 24%), escarola (15%) y rúcula (13%). En general se registró una disminución del contenido de nitrato a una mayor radiación. La mayor disminución de nitratos por efecto del aumento de la radiación fue para las plantas de espinaca, hasta el 70% en caso de T1. Resultados similares ya se habían obtenidos en distintas condiciones, con hojas de cebada,

trigo, maíz y frijol (Canvin y Atkins, 1974), espinacas y lechugas en invernadero (Steingröver et al., 1986; Gaudreau et al., 1995), lechugas y espinacas bajo luz suplementaria (Chadjaa et al., 1995; Proietti et al., 2004), hasta la actualidad en cultivos de lechuga en invernadero (p.ej. Fallovo et al., 2009; Gent, 2014) y Brassica en aeroponía (He et al., 2015; Fu et al., 2017), todos ellos obtenían menores concentraciones de nitratos con una mayor irradiancia. Sin embargo, Novo et al. (2008) no tuvo diferencia significativa con lechugas y espinacas cultivadas con 18 y 50% de sombreo en invernadero. Esto ha hecho que los límites de la legislación vigente en invierno sean más altos que el de verano donde hay una mayor radiación (Fig. 1). Esta disminución de nitratos puede ser debida a que con alta radiación de luz se estimulan algunas enzimas que intervienen en el metabolismo reductor de los nitratos hasta aminoácidos (glutamina sintetasa (GS), glutamato sintasa (GOGAT)) y se inhibe un aminoácido no esencial (asparagina sintetasa (AS)) (Zhang et al., 2018), favoreciendo la asimilación del nitrógeno en compuestos ricos en carbono (glutamina y glutamato). Mientras que, con poca luz, se inhiben la GS y GOGAT, y se estimula la AS, compuesto rico en nitrógeno y estable para que el nitrato sea transportado o almacenado.

La remolacha obtuvo el menor contenido de nitratos en el producto aprovechable a baja iluminación al contrario que el resto de las hortalizas de hojas y rábano ensayado, probablemente porque esta planta almacena los nitratos en la raíz antes de transportarlo a las hojas. Existen pocos trabajos sobre la variación del contenido en nitratos en rábano con los cuales compararnos, en postcosecha Lee et al., (2017) obtuvieron una disminución de la concentración de metabolitos secundarios que contienen nitrógeno (glucosinolatos) durante un almacenamiento en frío entre cero y ocho semanas en oscuridad.

Efecto del espectro sobre el contenido de nitrato. En los tratamientos de baja iluminación a excepción de la espinaca, el contenido de nitratos fue menor en el espectro T1 (una media de 19%). En los tratamientos de alta iluminación en T1 se registró un descenso de nitratos de 47% para lechuga y espinaca, rábano 27% y remolacha 20%. Ohashi et al. (2007) obtuvieron 64% menos nitrato en lechugas y espinacas cultivadas bajo luz fluorescentes rojo o azul versus las cultivadas en luz blanca. Samuolienė et al. (2009) en plantas de mejorana, lechuga y cebolla verde obtuvieron menos nitratos cultivándolas en luz LED contra las cultivadas en lámparas HPS. Actualmente se publicó que los espectros específicos a una misma intensidad benefician el incremento de licopeno en frutos de tomate (Nájera et al., 2018); o un mejor crecimiento en las plantas de lechuga, pimiento y tomate (Urrestarazu et al., 2016) o plantas de granada (Bantis et al., 2018). Por lo tanto, el efecto del T1 es muy

significativo para la disminución del contenido de nitrato en vegetales, modificando la composición de algunas enzimas del interior de la planta al exponerlas a espectros diferentes.

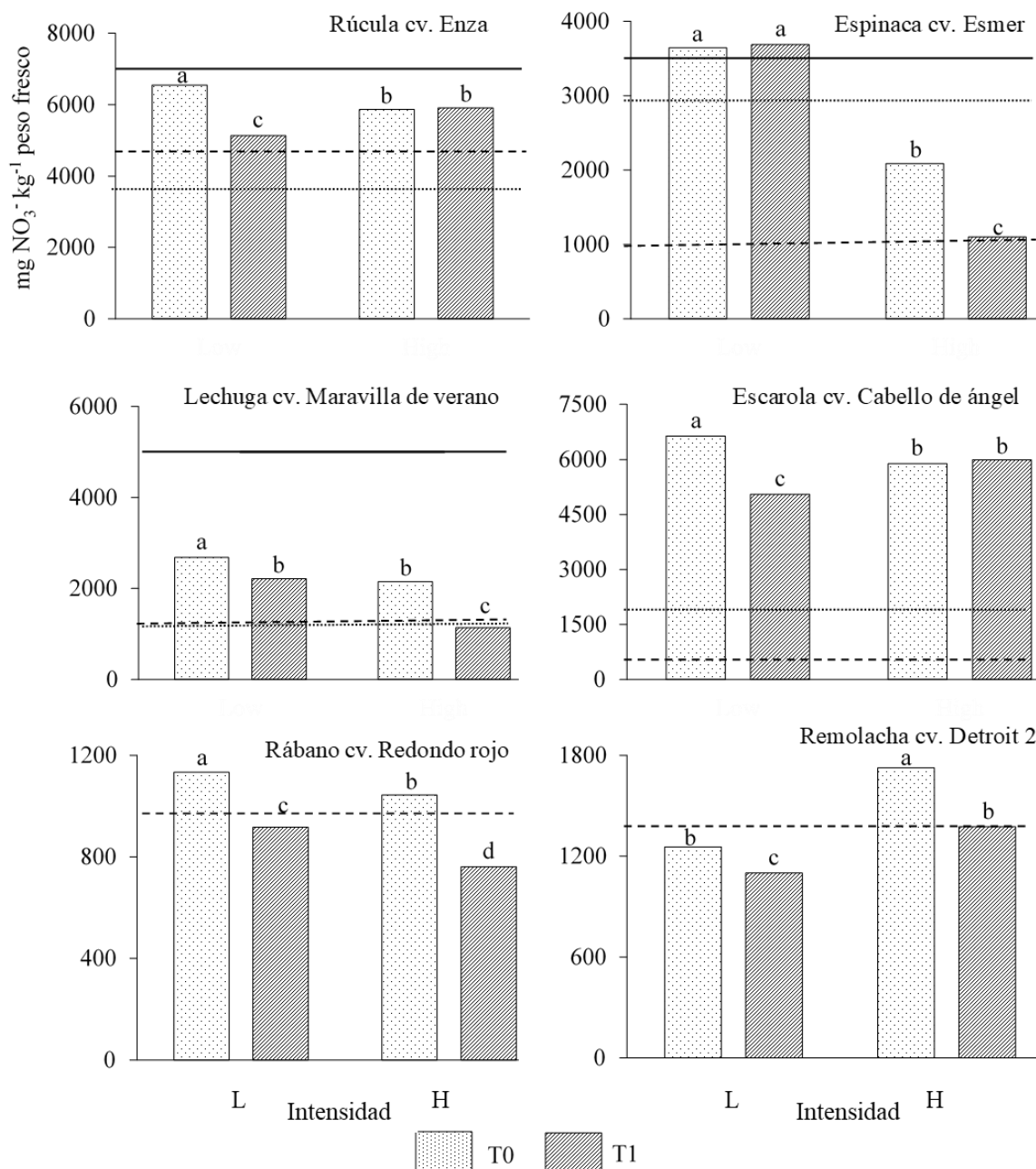


Fig. 1. Contenido de nitratos acorde a la calidad espectral de dos intensidades de luz LED (L y H) de seis variedades de hortalizas. T0 = L18 T8 Roblan® y T1 = L18 AP67 Valoya®. Letras diferentes indican una diferencia significativa entre los espectros a una prueba Tukey, $P \leq 0,05$. $n=5$

5.3.2.2 Efecto en variedades intraespecíficas de lechuga

Comparativa con los valores medios (europeos y americanos) y límites máximos legales. La Fig. 2 muestra los resultados del experimento 2 del contenido de nitratos en variedades de lechuga. Los datos del contenido de nitrato del cultivar Iceberg cv. California fueron menores a las otras tres variedades. Mientras que para el cv. California se encontraron unos

valores medios de 16%, para las otras variedades esta diferencia frente a los límites legales fue muy superior (51%). Todos los valores del contenido de nitratos estuvieron por encima a los reportados por EFSA y los datos medios en américa por Sanchez et al. (2005).

Efecto del contenido de nitrato por la intensidad lumínica. Todos nuestros datos estuvieron por debajo de los límites legales de 5000 mg kg⁻¹ (2500 mg kg⁻¹ de la variedad Iceberg) incluso a baja intensidad lumínica (50 μmol m⁻² s⁻¹). A excepción del cv. Astorga, se obtuvo una significativa disminución promedio del 22% del contenido de nitrato a mayor irradiación. En intensidad baja, sólo la lechuga cv. Astorga, mostró una disminución de nitrato del 17% cultivada con el tratamiento T1. Son pocos los autores que a latitudes medias (altas radiación) como Novo et al. (2008) encontraron valores por encima del 3000 mg kg⁻¹ cuando aplicaba un 18% de sombreado en invernaderos brasileños. Coincidimos con otros autores que a radiación alta encontraron menores contenidos de nitratos; por ejemplo, Cometti et al. (2011) obtuvieron mayor acumulación de nitratos en brotes de lechuga cv. Vera con 80% de sombreado en invernadero (118 μmol m⁻² s⁻¹). La explicación fisiológica de la relación entre intensidad de la radiación y el menor contenido en nitratos ya ha sido descrita ampliamente en las últimas décadas, la nitrato reductasa se activa con iluminación y, por lo tanto, disminuye la acumulación de nitrato (p.ej. Blom-Zandstra et al., 1988; Huber et al., 1992).

Efecto del contenido de nitrato por el espectro. A excepción del cv. Astorga con alta intensidad y cv. Cervantes en baja intensidad donde no hubo una disminución significativa del contenido de nitratos en T1 respecto a T0, el contenido de nitratos fue menor con el tratamiento T1. La mayor reducción del contenido de nitrato con el espectro T1 se registró a la intensidad mayor (95 μmol m⁻² s⁻¹) en un 24% para los cvs. Maravilla de verano y California. Mientras que el porcentaje de reducción menor (11%) se encontró en el cv. Astorga a baja intensidad lumínica con T1. Algunas respuestas específicas en relación al tipo de espectro y contenido en nitratos en hojas ya se habían realizado previamente, así en el cultivo de arroz Deng et al. (2000) utilizaron lámparas fluorescentes azules, rojas y blancas para medir el contenido de nitratos mediante la asimilación primaria de nitrógeno, obteniendo mayor nitrato en las plantas cultivadas durante 2-6 horas con luz azul pura; Ohashi et al. (2007) obtuvo un 63% menos contenido de nitrato en lechugas cultivadas con iluminarias rojas fluorescentes en un fotoperiodo de 12 h a una intensidad de 300 μmol m⁻² s⁻¹. Lin et al. (2013) en trabajos dirigidos a estudios de calidad de lechugas hidropónica (var. "Capitata") usaron los tratamientos de iluminación siguientes: 1) combinación de LEDs rojo

y azul, 2) LEDs azul, rojo y blanca y 3) lámparas fluorescentes; la menor concentración de nitratos en hoja la obtuvo el tratamiento de LEDs donde combinaba los tres tipos de iluminarias; probablemente el espectro de la combinación de iluminaras LEDs de sus tratamientos más eficientes corresponden a espectros similares a los que nosotros usamos (T1). Recientemente en postcosecha Seifu (2017) utilizó lámparas fluorescentes obteniendo un retraso en la acumulación del contenido de nitrato en lechugas recolectadas en diferentes supermercados y transformadas en mínimamente procesadas.

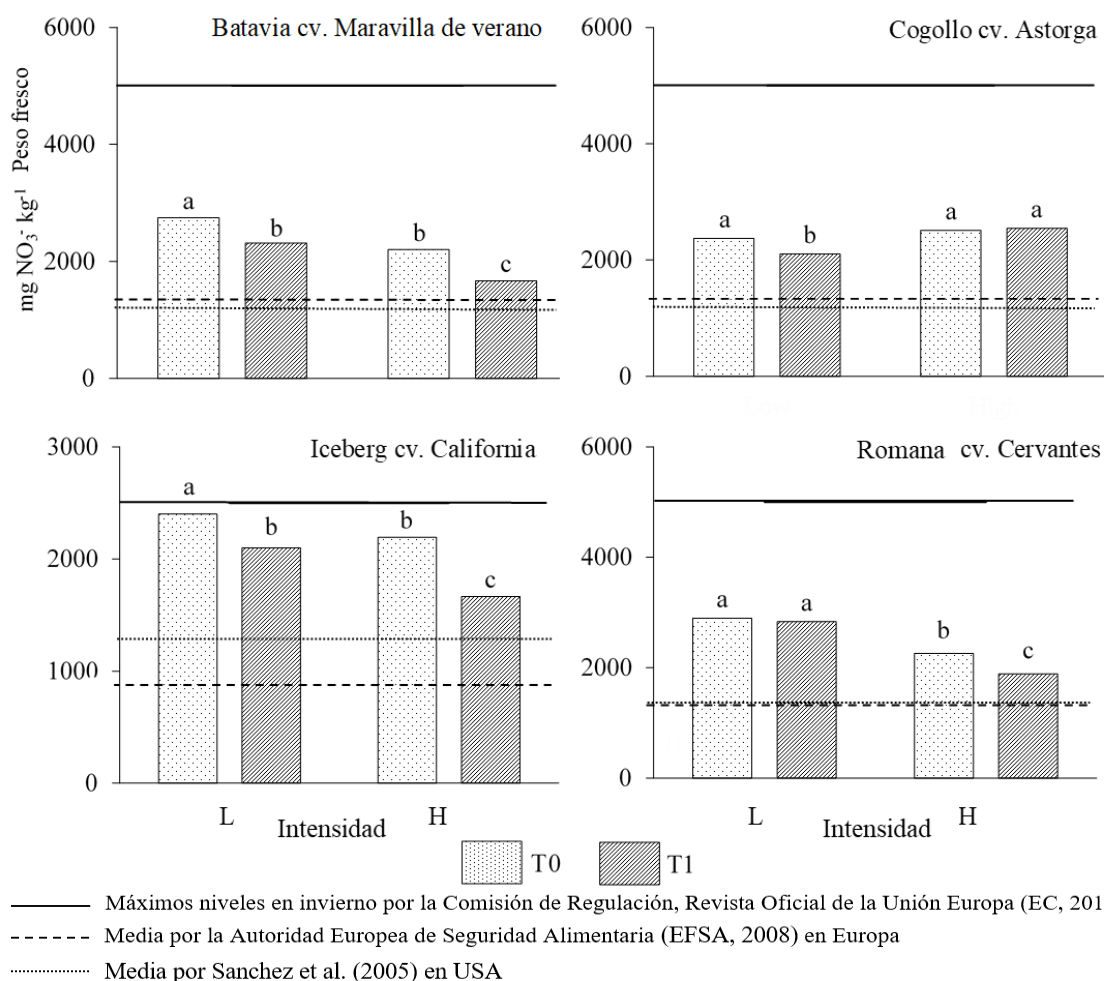


Fig. 2. Contenido de nitratos acorde a la calidad espectral de dos intensidades de luz LED (L y H) de cuatro variedades intraespecíficas de lechuga. T0 = L18 T8 Roblan® y T1 = L18 AP67 Valoya®. Letras diferentes indican una diferencia significativa entre los espectros a una prueba Tukey, $P \leq 0,05$. $n=5$

5.4 Literatura citada

- Addiscott, T. 2006. Is it nitrate that threatens life or the scare about nitrate? *J Sci Food Agr* 86:2005-2009.
- Álvaro, J.A., S. Carrasco, M. Urrestarazu. 2016. Effect of the organic production system and seasonality on nitrate content in vegetables from Spanish supermarkets. *Sylwan* 160:348-363.
- ATSDR. 2015. Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Resumen de salud pública. Nitrato y Nitrito. División de Toxicología y Ciencias de la Salud. Consultado el 10 de enero de 2017 en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs204.pdf.

- Bantis, F., K. Karamanoli, A. Ainalidou, K. Radoglou, H. Constantinidou. 2018. Light emitting diodes (LEDs) affect morphological, physiological and phytochemical characteristics of pomegranate seedlings. *Sci Hortic* 234:267-274.
- Beninni, E., H. Takahashi, C. Neves, I. Fonseca. 2002. Teor de nitrato em alface cultivada em sistemas hidropônico e convencional. *Hortic Bras* 20:183-186.
- Blom-Zandstra, M. 1989. Nitrate accumulation in vegetables and its relationship to quality. *Ann Appl Biol* 115:39-55.
- Blom-Zandstra, M., J.E.M. Lampe, H.M. Ammerlaan. 1988. C and N utilization of two lettuce genotypes during growth under non-varying light conditions and after changing the light intensity. *Physiol Plantarum* 74:147-152.
- Burattini, C., B. Mattoni, F. Bisegna. 2017. The Impact of spectral composition of white LEDs on spinach (*Spinacia oleracea*) growth and development. *Energies* 10:1383.
- Canvin, D.T., C.A. Atkins. 1974. Nitrate, nitrite and ammonia assimilation by leaves: Effect of light, carbon dioxide and oxygen. *Planta* 116:207-224.
- Carrasco, G., J. Tapia, M. Urrestarazu. 2006. Nitrate content in lettuces grown in hydroponic systems. *Idesia* 24:25-30.
- Cavaiuolo, M., A. Ferrante. 2014. Nitrates and glucosinolates as strong determinants of the nutritional quality in rocket leafy salads. *Nutrients* 6:1519-1538.
- Chadjaa, H., L.P. Vezina, S. Dubé, A. Gosselin. 1995. Effects of supplementary lighting on growth and primary nitrogen metabolism of greenhouse lamb's lettuce and spinach. *HortScience* 30:883-884.
- Chan, T.Y.K. 2011. Vegetable-borne nitrate and nitrite and the risk of methaemoglobinaemia. *Toxicol Lett* 200:107-108.
- Chang, C.L., K.P. Chang. 2014. The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple wavelength-band light-emitting diode lighting. *Sci Hortic* 179:78-84.
- Colla, G., H.J. Kim, M.C. Kyriacou, Y. Roupael. 2018. Nitrate in fruits and vegetables. *Sci Hortic* 237:221-238.
- Cometti, N.N., P.R. Furlani. 2009. Hidroponia e segurança alimentar. In: Ferreira, A., Lima, A.B.P., Matta, F.P., Amaral, J.A.T., Lopes, J.C., Pezzopane, J.E.M., Ferreira, M.F.S.,

- Polanczyk, R.A., Soares, T.C.B. (Eds.) Tópicos Especiais em Produção Vegetal I. ed. Alegre, ES: Centro de Ciências Agrárias, pp. 517-528.
- Cometti, N.N., M.Q. Martins, C.A. Bremenkamp, J.A. Nunes. 2011. Nitrate concentration in lettuce leaves depending on photosynthetic photon flux and nitrate concentration in the nutrient solution. *Hortic Bras* 29:548-553.
- Corré, W.J., T. Breimer. 1979. Nitrate and nitrite in vegetables. Centre for Agricultural Publishing and Documentation 39, Wageningen.
- Deng, J.M., J.H. Bin, R.C. Pan. 2000. Effect of light quality on the primary nitrogen assimilation of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Acta Bot Sin* 42:234-238.
- EC, 2002. Reglamento de la Comisión Europea. European Commission Regulation No. 563/2002 of 2 April 2002 amending Regulation (EC) No. 466/2001 Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. OJ. L. 86, 5-6. Consultado el 10 de diciembre de 2016 en: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6bf91c08-0654-4c10-8a24-23473f1210e8/language-en>.
- EC, 2006. Reglamento de la Comisión Europea. European Commission Regulation No. 1881/2006 of 19 December 2006. Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. OJ. L. 364, 5-24. Consultado el 10 de diciembre de 2016 en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32006R1881>.
- EC, 2011. Reglamento de la Comisión Europea. European Commission Regulation No. 1258/2011 of 2 December 2011 amending Regulation No. 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. OJ. L. 320, 15-17. Consultado el 10 de diciembre de 2016 en: https://www.fsai.ie/uploadedFiles/Reg1258_2011.pdf.
- EFSA, 2008. Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. European Food Safety Authority. Nitrate in vegetables. Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain. J 689, 1-79. Consultado el 10 de diciembre de 2016 en: http://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/scientific_output/files/main_documents/689.pdf.
- EFSA, 2010. Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. European Food Safety Authority. Scientific Opinion. Statement on possible public health risks for infants and young children from the presence of nitrates in leafy vegetables. *EFSA Journal* 8, 1935.

- Falovo, C., Y. Roupael, E. Rea, A. Battistelli, G. Colla. 2009. Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *acephala* in floating raft culture. *J Sci Food Agr* 89:1682-1689.
- FAO. FAOSTAT, 2016. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Food and Agriculture Organization. Details of spinach, lettuce, radish, arugula, beetroot and escarole, from 2013 to 2016. Consultado el 24 de febrero de 2017: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Fontana, E., S. Nicola. 2009. Traditional and soilless culture systems to produce corn salad (*Valerianella oleratoria* L.) and rocket (*Eruca sativa* Mill.) with low nitrate content. *J Food Agric Environ* 7:405-410.
- Fu, Y., H.Y. Li, J. Yu, H. Liu, Z.Y. Cao, N.S. Manukovsky, H. Liu. 2017. Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality on lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. Youmaicai). *Sci Hortic* 214:51-57.
- Fukuda, N., M. Miyagi, Y. Suzuki, H. Ikeda, K. Takayanagi. 1999. Effects of supplemental night lighting and NO_3^- exclusion on the growth and NO_3^- concentration in the leaf of greenhouse-grown spinach under NFT. *J Jpn Soc Hortic Sci* 68:146-151.
- Gaudreau, L., J. Charbonneau, L.P. Vezina, A. Gosselin. 1995. Effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on nitrate content and nitrate reductase activity in greenhouse-grown lettuce. *J Plant Nutr* 18:437-453.
- Gent, M.P.N. 2014. Effect of daily light integral on composition of hydroponic lettuce. *HortScience* 49:173-179.
- Gent, M.P.N. 2016. Effect of irradiance and temperature on composition of spinach. *HortScience* 51:133-140.
- Gürkan, R., N. Altunay. 2018. Preconcentration and indirect quantification of trace nitrite, nitrate and total nitrite in selected beverage and milk samples using ion-pairing cloud-point extraction with acridine orange. *J Food Compos Anal* 69:129-139.
- He, J., L. Lim, L. Qin. 2015. Growth irradiance effects on productivity, photosynthesis, nitrate accumulation and assimilation of aeroponically grown *Brassica alboglabra*. *J Plant Nutr* 38:1022-1035.
- Hill, M.J. 1990. Nitrates and nitrites from food and water in relation to human disease, in: Ellis Wood (Ed.), *Food Science and Technology*, London, pp. 163-193.

- Hsu, J., J. Arcot, A. Lee. 2009. Nitrate and nitrite quantification from cured meat and vegetables and their estimated dietary intake in Australians. *Food Chem* 115:334-339.
- Huber, J.L., S.C. Huber, W.H. Campbell, M.G. Redinbaugh. 1992. Reversible light/dark modulation of spinach leaf nitrate reductase activity involves protein phosphorylation. *Arch Biochem Biophys* 296:58-65.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, T. Yoshihara. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ Exp Bot* 75:128-133.
- Lee, J.G., S. Lim, J. Kim, E.J. Lee. 2017. The mechanism of deterioration of the glucosinolate-myrosinase system in radish roots during cold storage after harvest. *Food Chem* 233:60-68.
- Lin, K.H., M.Y. Huang, W.D. Huang, M.H. Hsu, Z.W. Yang, C.M. Yang. 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). *Sci Hortic* 150:86-91.
- MAPA, 2016. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Datos estadísticos de productos agrícolas por superficie y producción. Consultado el 24 de febrero de 2017: <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/default.aspx>.
- Montgomery, D.C. 2004. Diseño y análisis de experimentos, in Limusa Wiley (Ed.), Arizona State University, USA.
- Nájera, C., J.L. Guil-Guerrero, L. Jarquín, J. Álvaro, M. Urrestarazu. 2018. LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit. *Postharvest Biol Technol* 145:151-156.
- Nicola, S., J. Hoeberechts, E. Fontana. 2007. Ebb-and-flow and floating systems to grow leafy vegetables: a review for rocket, corn salad, garden cress and purslane. *Acta Hortic* 747:585-592.
- Novo, A.A.C., J.F. Medeiros, C.H.E. de Souza, P.R.G. Pereira, H.E.P. Martinez, P.C.R. Fontes, N.N. Cometti. 2008. Influência do sombreamento sobre o crescimento e teores de nitrato em hortaliças folhosas em hidroponia. *Hortic Bras* 22:S3761-S3766.

- Ohashi, K.K., M. Takase, N. Kon, K. Fujiwara, K. Kurata. 2007. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environmental Control in Biology* 45:189-198.
- Proietti, S., S. Moscatello, G. Colla, Y. Battistelli. 2004. The effect of growing spinach (*Spinacia oleracea* L.) at low light intensities on the amounts of oxalate, ascorbate and nitrate in their leaves. *J Hort Sci Biotech* 79:606-609.
- Roorda, E.J.P. 1984. Nitrate in vegetables under protected cultivation. *Acta Hort* 145:251-256.
- Samuolienė, G.; A. Urbonavičiūtė, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, P. Vitta, A. Žukauskas. 2009. Decrease in Nitrate Concentration in Leafy Vegetables Under a Solid-state Illuminator. *HortScience* 44:1857-1860.
- Samuolienė, G., R. Sirtautas, A. Brazaitytė, J. Sakalauskaitė, S. Sakalauskienė, P. Duchovskis. 2011. The impact of red and blue light-emitting diode illumination on radish physiological indices. *Cent Eur J Biol* 6:821-828.
- Sanchez, C.A., K.S. Crump, R.L. Krieger, N.R. Khandaker, J.P. Gibbs 2005. Perchlorate and nitrate in leafy vegetables of North America. *Environ Sci Technol* 39:9391-9397.
- Santamaria, P. 2006. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *J Sci Food Agr* 86:10-17.
- Seifu, Y.W. 2017. Nitrate content in minimally processed lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by fluorescent light exposure during storage. *J Plant Biochem Physiol* 5:1-5.
- Sonneveld, C., N. Straver. 1994. Voedingsoplossingen Voor Groenten En Bloemen Geteeld in Water of Substraten: Nutrient Solutions for Vegetables and Flowers Grown in Water or Substrates, in: Voedingsoplossingen glastijnbouw (10ed.), pp. 1-45.
- Statgraphics Centurion X.V.I.I. 2018. Statgraphics Net for Windows 7. <https://www.statgraphics.net/descargas-centurion-xvii/>.
- Steingröver, E., P. Ratering, J. Siesling. 1986. Daily changes in uptake, reduction and storage of nitrate in spinach grown at low light intensity. *Physiol Plantarum* 66:550-556.
- Urrestarazu, M., A. Postigo, M.C. Salas, A. Sánchez, G. Carrasco. 1998. Nitrate accumulation reduction using chloride in the nutrient solution on lettuce growing by NFT in semiarid climate conditions. *J Plant Nutr* 21:1705-1714.

- Urrestarazu, M., C. Nájera, M.M. Gea. 2016. Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience* 51:268-271.
- Wojciechowska, R., O. Dlugosz-Grochowska, A. Kolton, M. Zupnik. 2015. Effects of LED supplemental lighting on fiend and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. *Sci Hortic* 187:80-86.
- Yang, J.H., D.K. Park. 2015. A study on growth of the Plant depends on PPFD and Wavelength of LED lighting module. *J Korean Soc Mechan Technol* 17:31-37.
- Zhang, T., Y. Shi, F. Piao, Z. Sun. 2018. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce. *Plant Cell* 134:231-240.

6. CAPÍTULO 4

Efecto del espectro de luz LED sobre el forraje verde hidropónico

Cinthia Nájera^a, Miguel Urrestarazu^a, Victor M. Gallegos-Cedillo

^aCentro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Almería, España

Artículo enviado a revista

Resumen

La búsqueda de soluciones para mejorar la alimentación humana y animal va en incremento. El forraje verde hidropónico es una técnica que incrementa y controla la producción de alimentos animales en fresco y en un tiempo reducido. En la actualidad la falta de agua, suelos con falta de nutrientes y la reducción de espacios para la producción, son los limitantes para la producción de forrajes convencionales de calidad, una alternativa de producción de forraje verde hidropónico de calidad es con el uso de iluminarias LED. El objetivo fue evaluar los efectos de la cantidad y calidad espectral de la luz LED en la producción, nutrición, eficiencia energética y productiva del forraje verde hidropónico en condiciones controladas. Se han usado tres cereales para la producción en 14 días: Trigo, Maíz y Cebada, cultivadas en una cámara controlada de 12 m². Los tratamientos de los 10 días finales fueron cuatro espectros de LED: L18 T8 Roblan® blanca = T0; L18 NS1 Valoya = T1; L18 AP67 Valoya = T2; y L18 AP673L Valoya = T3, cada uno a dos intensidades alta (H) y baja (L) con 16/8 h (día/noche) de fotoperiodo. Se midió la biomasa fresca, altura, grosor de colchón de raíz, concentración de nitrato y SPAD y porcentaje de materia seca obtenida. Se calculó el factor de conversión de semilla a forraje verde hidropónico, uso eficiente del agua y eficiencia energética eléctrica. Los espectros T2 y T3 fueron los tratamientos que tuvieron un mejor comportamiento en la mayoría de los casos evaluados del forraje verde hidropónico de trigo y de maíz, hasta un 70% de producción, mientras que, en cebada, no se obtuvieron claras diferencias entre los tratamientos. Siendo los espectros de las iluminarias LED R:FR 3.11 y 7.6 los espectros adecuados para la producción de forraje verde hidropónico de valor nutritivo seguro para el consumo animal e incluso para la incorporación en la dieta humana, con un modelo de producción sostenible.

Palabras clave: trigo, maíz, cebada, nitrato, SPAD, rendimiento, nutrición, uso eficiente del agua

6.1 Introducción

La alimentación animal es tan importante como la humana, así como el uso y desarrollo de técnicas sostenibles que permitan incrementar la productividad de los cultivos y la calidad de los alimentos. La FAO en el 2018 (FAOSTAT, 2018) declaró que el 25.19% de la superficie de la tierra en 2016 fue destinada a la producción de pastizales, así como también la estadística de ese mismo año registró que había 4.6 mil millones de cabezas de ganado (que incluían cerdos, ovejas, caprinos y vacunos), lo que corresponde a un 0.12 cabezas de

ganado por m² de pastizal, esto demostró que la superficie destinada para la alimentación animal en el mundo no es suficiente, ya que el consumo de materia seca es del 2 al 4% del peso corporal animal (Flórez, 2017).

La producción convencional de forraje para ganado en regiones áridas y semiáridas se enfrenta a problemas ambientales como: la falta de agua, suelos pobres en materia orgánica, suelos con problemas de salinidad, elevados costes de producción y una baja homogeneidad en la calidad del forraje (Santamaría et al., 2004).

El forraje verde hidropónico en los últimos años ha sido una alternativa para la complementación de la dieta balanceada animal. La producción de forraje verde hidropónico es un método de obtención de alimento vegetal provechoso para animales (Rivera et al., 2010) y ahora también para humanos, con tecnología para la producción de biomasa, donde su parte aérea y zona radicular se encuentran en un desarrollo acelerado. El forraje verde hidropónico permite el consumo alto de proteína en cualquier época del año (Juárez-López et al., 2013), gran parte de los aminoácidos están en forma libre y son más fáciles de ser aprovechados por los animales (Valdivia, 1997). Se ha comprobado que, en un periodo de 10 a 15 días se obtiene un alto rendimiento por unidad de superficie, resultando un excelente alimento para la nutrición de varias especies animales (ejemplo: vacuno, porcino, ovino, caprino, entre otros) (Valdivia, 1997; Arano, 1998; Resh, 2001). El forraje verde hidropónico se ha convertido en una alternativa para contrarrestar los efectos del cambio climático en los sectores agrícola y ganadero, sobre todo en las zonas con heladas, inundaciones y sequías (FAO, 2001; López-Aguilar et al., 2009; Abou-Hadid, 2006).

En la literatura se describen los beneficios sobre el incremento de la producción de forraje verde hidropónico (Romero Valdez et al., 2009; FAO, 2001; Resh, 2001; Müller et al., 2005), además de una mejora de hasta un 11% en producción de leche en vacas alimentadas con forraje verde hidropónico de cebada (Arano, 1998). Por otro lado, Valdivia (1997) demuestra que enfermedades como mastitis se reducen de 13 a 4% y Resh (2001) menciona que el consumo de forraje verde hidropónico incrementa la fertilidad de animales en más de un 50% y disminuye los casos de aborto. Así mismo también, los beneficios son en la salud humana, ya que los cereales son parte fundamental en la lista de alimentación (Akbas et al., 2017). España en el año 2013 importó 93 mil t de cereales en diferentes presentaciones de consumo humano, según la FAO (FAOSTAT, 2018). Aydos et al. (2011) y Akbas et al. (2017) han propuesto la incorporación de grano entero y productos integrales en la dieta humana, para proteger contra enfermedades crónicas. Los cambios fisiológicos durante la

germinación y el brote llevan a las plantas a sintetizar compuestos como vitaminas, antioxidantes o fenólicos, retardando la oxidación de otras moléculas dañinas (Kulkarni et al., 2006). En la actualidad el consumo del jugo de trigo es considerado como un super alimento que aporta en esta fase del crecimiento del forraje verde hidropónico, una alta cantidad de micronutrientes y otros elementos que benefician la salud humana.

El nitrato (NO_3^-) es uno de los principales compuestos inorgánicos en las plantas y su alta acumulación está asociada a diferentes enfermedades cancerígenas en humanos según datos de European Food Safety Authority (EFSA, 2010), y también está asociado con el aborto y muerte de rumiantes con una concentración de 0.05% de NO_3^- respecto al peso del animal (Kellems and Church, 1977; Gulmezoglu et al., 2010).

El uso de iluminación LED (diodos de emisores de luz) en ambientes controlados en diferentes cultivos hortícolas ha tenido un efecto positivo en el desarrollo vegetativo y mejora de las cualidades organolépticas de fruto. Una de las principales características de este sistema es la flexibilidad de controlar los espectros e intensidad luminosa deseadas para el óptimo desarrollo de los cultivos (Massa et al., 2008; Urrestarazu et al., 2016; Pennisi et al., 2019).

Investigaciones recientes han demostrado cambios en la morfología, capacidad antioxidante e incremento de la producción de diferentes cultivos hortícolas con cambios de espectros de LED (Piovene et al., 2015; Bantis et al., 2016; Carvalho et al., 2016; Urrestarazu et al., 2016). Incluso, en frutos de tomate en postcosecha se ha obtenido un incremento de compuestos nutricionales con el uso de LED (Nájera et al., 2018), así mismo, se ha disminuido la presencia de compuestos dañinos para la salud humana como el NO_3^- en especies de plantas acumuladoras de este ion (Nájera y Urrestarazu, 2019). A pesar de que recientemente Capstaff y Miller (2018) han discutido y publicado el potencial para la mejora de la producción de forrajes, existen pocos estudios con el uso de iluminación LED en la producción intensiva de forraje verde hidropónico en ambientes controlados sostenibles, que garantice la producción, eficiencia y calidad del forraje.

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de la cantidad y calidad de la luz LED en la producción y calidad nutricional de forraje verde hidropónico en tres cereales comerciales y su efecto en la eficiencia energética y productiva en condiciones controladas.

6.2 Materiales y métodos

6.2.1 Condiciones de crecimiento del cultivo

Se utilizó una cámara de cultivo cerrada ubicada en la Universidad de Almería, España, con temperatura y humedad relativa controladas mediante un Arduino, se colocaron cuatro racks con ocho secciones independientes unas de otras y distanciadas entre sí de 50 cm (Figura 1). El fotoperiodo fue ajustado a 16/8 horas de luz y oscuridad, respectivamente (Sánchez, 2001; Urrestarazu et al., 2016). La temperatura y humedad se mantuvieron entre 18-26°C y 80% (FAO, 2001), respectivamente. Se colocaron 4 repeticiones por tratamiento para cada especie.

6.2.2 Tratamientos de LED

Se utilizaron lámparas LED blancas L18 T8 Roblan® (Toledo, España) como tratamiento testigo (T0); los tratamientos T1, T2 y T3 corresponden a las lámparas con los espectros L18 NS1, L18 AP67 y L18 AP673L de Valoya (Helsinki, Finlandia), respectivamente. Los espectros de luz de cada tratamiento fueron obtenidos con UPRtek MK350S LED Meter (Miaoli County, Taiwan). Se utilizó la sonda radiométrica cuántica para medir el flujo de fotones de la radiación fotosintéticamente activa LP 471 PAR (valores en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y la sonda LP 471 PHOT para la iluminancia (lux) (ver Figura 1). Los datos espectrales se muestran en la Figura 2. Fueron utilizadas dos intensidades por espectro, baja (L) y alta (H), con tres y seis lámparas por metro cuadrado, respectivamente. Los resultados de las intensidades de luz y sus relaciones R:FR se muestran en la Tabla 1. Los datos para obtener la relación R:FR fueron los proporcionados por el proveedor en las características de cada lámpara empleada.

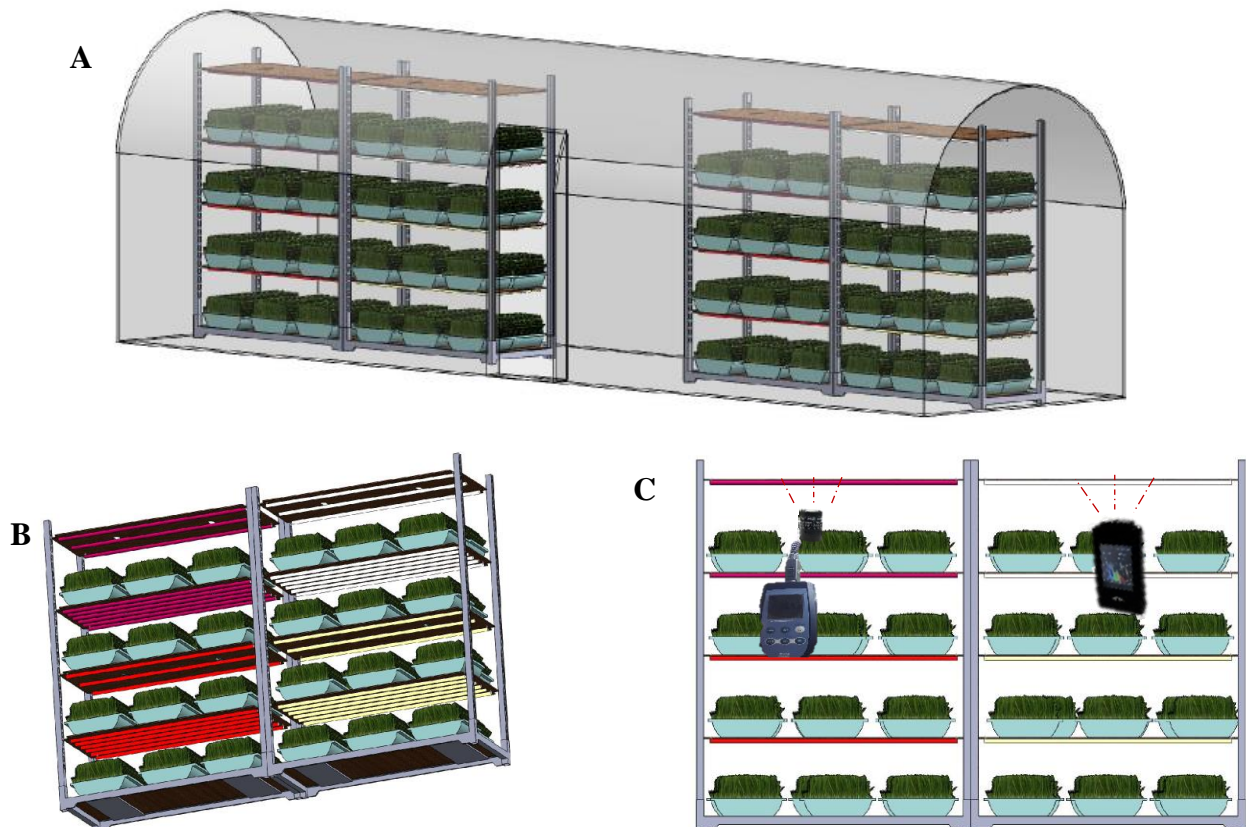


Fig. 1. (A) Cámara de cultivo; (B) distribución de los tratamientos de LED en cada sección; y (C) detalle de la medida de la luz. Diseñado en Solidworks®.

6.2.3 Material vegetal

Se evaluaron tres tipos de cereales utilizados en la alimentación animal y humana, semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) con bajo porcentaje de impurezas (4%). Utilizando una densidad de siembra para maíz de 4.2 kg m^{-2} , y 3 kg m^{-2} para trigo y cebada, colocadas en bandejas de plástico de 6.5 litros. Con un espesor de semillas de 1.5 cm en cada bandeja (Juárez-López et al., 2013).

6.2.4 Producción de forraje verde hidropónico

La semilla fue lavada y desinfectada con hipoclorito de sodio (NaClO) al 5% y puesta en imbibición durante 24 horas (Rivera et al., 2010; López-Aguilar et al., 2009). Posteriormente, se colocaron en obscuridad durante 72 horas hasta germinación hidratándolas constantemente mediante riegos por aspersión, con un volumen de 1.5 L m^{-2} en cada riego (FAO, 2001). Las semillas germinadas (radícula mayor a 2 mm) fueron sometidas a los tratamientos de luz LED durante 10 días.

6.2.5 Parámetros medidos

A los 14 días después aplicación de los tratamientos, la altura y grosor del vástago y raíz fueron medidos con una regla graduada. Se determinó la biomasa fresca y seca del vástago y raíz con una balanza de precisión Radwag PS2100/C1. El vástago y raíz fueron colocados en una estufa de secado Memmert Modell 100-800 a 85°C hasta peso constante. El factor de conversión grano forraje fue considerado como la relación entre la cantidad de forraje verde total producido por metro cuadrado respecto a la cantidad de semillas sembradas por metro cuadrado (ecuación 1). Se calculó el uso eficiente del agua considerando el total de forraje verde producido (kg m²) en relación con el total de litros de agua utilizada (m³ m²) por el ciclo de cultivo en las diferentes especies (ecuación 2). Para el uso eficiente del agua en materia seca se realizó lo mismo (Salazar-Moreno et al., 2014).

$$\text{Factor de conversión Grano a Forraje} = \frac{\text{Peso fresco total (kg m}^2\text{)}}{\text{Semillas (kg m}^2\text{)}} \quad (1)$$

$$\text{Uso eficiente del agua} = \frac{\text{Rendimiento total del forraje (kg)}}{\text{Uso total del agua (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

Los parámetros de eficiencia energética eléctrica (EEE) fue determinada usando la ecuación 3:

$$EEE = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Energía eléctrica consumida por las LED}} \quad (3)$$

6.2.6 Análisis de nitrato y clorofila

Para cada tratamiento y especie se realizaron tres medidas del contenido de clorofila (SPAD) del vástago con un Chlorophyll Meter SPAD-502PLUS (Konica Minolta®). El contenido de nitrato se obtuvo de la savia extraída de cuatro muestras al azar de 25 g del vástago para cada especie por bandeja y fue medido con un microsensor de bajo volumen LAQUA Twin Nitrate (NO₃⁻) (LAQUA Twin Nitrate Meter, Spectrum Technologies, Inc.) descrito por Chang y Chang (2014).

6.2.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de la varianza y la correspondiente separación de medias mediante el software Statgraphics Centurion® XVIII (Warrenton, VA) y Excel de Microsoft Office 2016. Las diferencias entre las medias se compararon usando la prueba LSD ($P \geq 0.05$).

6.3 Resultados y discusión

6.3.1 Parámetros de iluminación LED

En la Tabla 1 se muestran los datos de luz de las lámparas LED utilizados en los tratamientos. Se observa que, a pesar de tener el mismo número de lámparas, los valores de PPF e iluminancia, varían considerablemente entre la intensidad L y H, con un 50% de diferencia entre las intensidades para ambos valores (PPF e iluminancia). Los valores de relación R:FR, varían dependiendo de los espectros, la iluminaria control (T0) y la iluminaria correspondiente al T2 presentan los valores de R:FR más bajos, mientras que la relación de R:FR en los espectros de los tratamientos T1 y T3, es 72% mayor que los tratamientos T0 y T2. Similares resultados fueron observados por Urrestarazu et al. (2016) quienes utilizaron lámparas LED con un espectro específico para horticultura y fue usada para comparar la iluminación convencional. Así mismo, Croser et al. (2016) obtuvieron valores similares en los R:FR a los nuestros al evaluar los efectos de la calidad de la luz y su relación R:FR y FR en el desarrollo de modelos predictivos de la floración en leguminosas. Recientemente, Nájera et al. (2018) también obtuvo resultados similares a los nuestros usando los mismos espectros de iluminación LED.

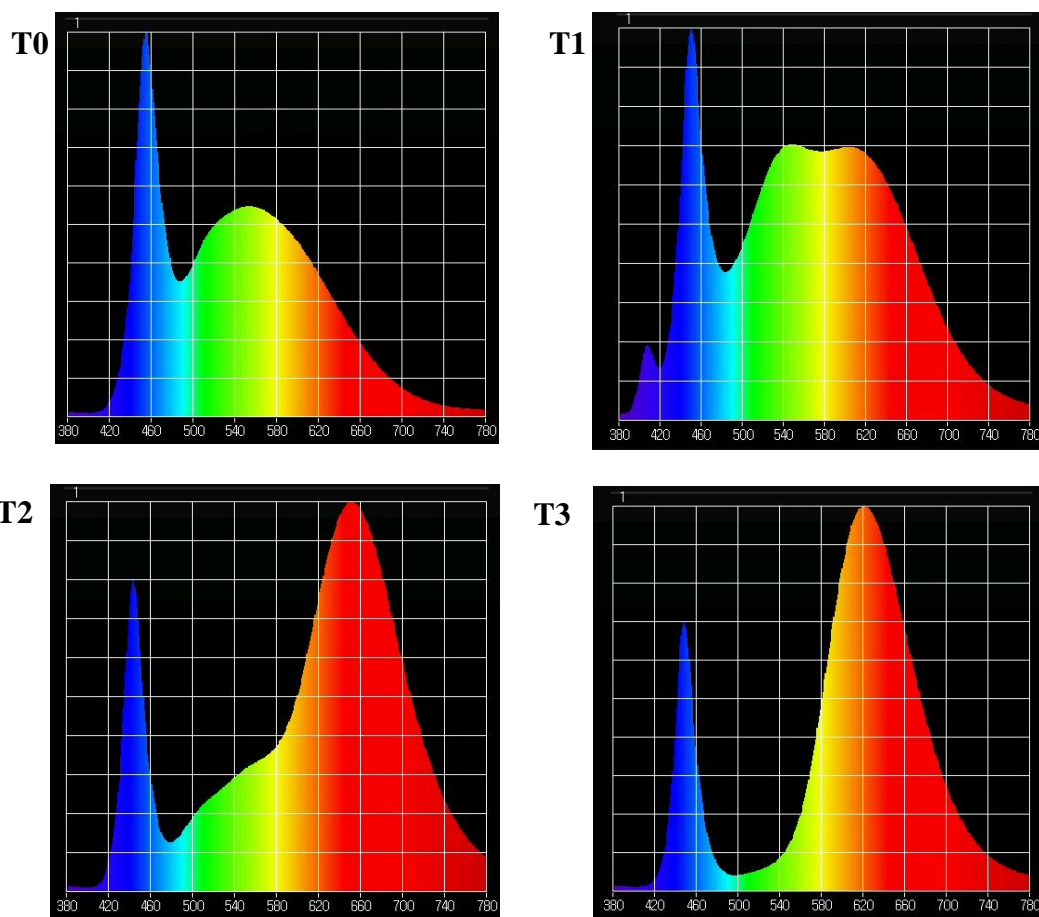


Fig. 2. Tratamientos espectrales de luz LED usados. T0 = L18 T8 Roblan[®]; T1 = L18 NS1 Valoya[®]; T2 = L18 AP67 Valoya[®]; and T3 = L18 AP673L Valoya[®].

Tabla 1. Datos de lámparas LED e intensidades de las lámparas [3 (L) and 6 (H) lámparas m⁻²], densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), iluminancia (lux) y ratios de los tratamientos LED.

Tratamientos de luz	Lámparas LED	PPFD	Lux	R:FR	
T0	L	L18 T8 Roblan	80	3353	2.10
	H	L18 T8 Roblan	167	7468	
T1	L	L18 NS1 Valoya	115	4986	10.4
	H	L18 NS1 Valoya	214	9273	
T2	L	L18 AP67 Valoya	58	2067	3.11
	H	L18 AP67 Valoya	141	4753	
T3	L	L18 AP673L Valoya	97	3129	7.60
	H	L18 AP673L Valoya	162	5343	

L = intensidad baja de iluminación; H = intensidad alta de iluminación; PPFD = densidad de flujo de fotones fotosintéticos; R:FR = ratios rojo:rojo lejano. (n = 4).

6.3.2 Parámetros de crecimiento de planta

Se muestran las medias obtenidas de alturas del grosor de colchón de raíz formado y de la parte aérea en cm en la Tabla 2 de los tres cereales evaluados.

En trigo, cuando se realizaba un cambio de PPF (de L a H de intensidad) en los mismos espectros, el grosor del colchón aumentó un 40 y 45% más en los tratamientos T0 y T3, mientras que en los tratamientos T1 y T2 se obtuvo una disminución de altura en el grosor del colchón de raíz en 22 y 7%, respectivamente. En cuanto al grosor de raíz generado, al comparar los diferentes espectros a una intensidad baja (L), el tratamiento T1 incrementó un 35% el espesor de raíz respecto al tratamiento T0. Mientras que en los demás espectros no se mostraron diferencias significativas. Aplicando una intensidad alta (H) a los espectros, no se encontraron diferencias estadísticas significativas, sin embargo, se muestra una mejora del grosor de colchón de raíz del tratamiento T3 respecto al control (T0) de un 13%. Mientras que, el tratamiento control (T0) fue 24% mayor que los tratamientos T1 y T2. En cuanto a la altura del vástago se muestra que, a una intensidad L, el tratamiento que más incrementa significativamente la altura es el T2 en un 22% más respecto al control, mientras que, en los tratamientos T1 y T3 no se encontraron diferencias significativas respecto al T0, a pesar de que se consiguió un 6% medio más que el tratamiento control (T0). Comparando los espectros de los tratamientos a una intensidad H, se mostró una diferencia significativa entre los tratamientos T2 y T3 frente al T0, donde incrementaron un 22% más que el tratamiento de iluminación control, sin embargo, el tratamiento T1 no mostró diferencia respecto al tratamiento T0. Se muestra que la altura del vástago comparando los cambios de intensidad, la intensidad H obtuvo entre 5 y 19% más altura que la intensidad L en los cuatro tratamientos. Nuestros datos coinciden con los obtenidos en un invernadero con cubierta de malla blanca 60% de sombra por Fuentes et al. (2011), los cuales obtuvieron alturas en forraje verde hidropónico de avena de 10 a 19 cm cultivadas de 7 a 16 días, respectivamente. Mientras que, Dosal (1987) mostró que es suficiente que los cereales crezcan entre 7 a 10 días para completar el ciclo de cultivo a forraje verde hidropónico, sin importar la altura obtenida.

En maíz, comparando el grosor de la raíz entre intensidades (L y H) en la Tabla 2, podemos observar que la intensidad H tiene una media de 30% más que la intensidad L, que varía entre 2.7 a 66% en el T2 y T3, respectivamente, obteniendo diferencias significativas en los tratamientos T1 y T3. Los datos obtenidos en el grosor de colchón en maíz muestran que, a una intensidad L de iluminación, el T0 fue 11.6% mayor que los demás tratamientos.

Mientras que, con intensidad H, el T3 obtuvo un incremento de colchón de raíz de 40% respecto al T0 y al T1, sin embargo, el T2 obtuvo 24% menos que estos dos tratamientos. La altura de vástago en todos los casos fue significativamente mayor a una intensidad de luz alta (H), excepto en el T0. Respecto al cambio de espectro, la altura de vástago tuvo un comportamiento similar en las dos intensidades, ya que el T3 en los dos casos, fue el que mostró mayores valores respecto a todos los demás tratamientos, incluso el T3 obtuvo en promedio 19% más que el tratamiento de iluminaria blanca control (T0). Un estudio realizado por Espinosa-Robles et al. (2009) donde los tratamientos fueron las diferencias de color del maíz y otro estudio de Rivera et al. (2010) que aplicaron fertilizante en la solución de riego en condiciones de iluminación natural deficiente, obtuvieron alturas de forraje de maíz de 30 a 32 cm, en nuestro caso obtuvimos alturas entre 16 y 21 cm sin añadir fertilizante en los riegos y con un maíz amarillo.

En cebada, a pesar de que, en el grosor de colchón formado por la raíz (Tabla 2) se presentaron valores mayores en la intensidad H en todos los casos. Los tratamientos que mostraron diferencias significativas fueron los T1 y T3, con 8% más, cada uno de los espectros respecto a la intensidad L. Comparando el espectro en las dos intensidades, no se mostró una clara diferencia, excepto en el T2 a intensidad L, que fue el que menor valor de grosor de colchón de raíz generó. El crecimiento de vástago en los tratamientos T1 y T3 incrementando la intensidad 50% más, se incrementó un 6% más la altura en el forraje de cebada, sin embargo, en los tratamientos T0 y T2 no se mostraron diferencias significativas. El tratamiento T2 no mostró diferencia significativa respecto al tratamiento del espectro control (T0) en la altura de vástago a una intensidad L, pero el T0 y el T2 fueron 7% mayores a los tratamientos T1 y T3. En la intensidad H, el espectro del T2 fue 5% mayor que los demás tratamientos. Al-Ajmi et al. (2009) obtuvieron valores de forraje entre 15 y 30 cm de altura utilizando diferentes tratamientos de riego con agua tratada. Elizondo (2005) menciona que el forraje verde hidropónico de cebada se debe cosechar cuando se consigan alturas de entre 20 a 25 cm.

Tabla 2. Efecto de la intensidad y espectro sobre los parámetros de crecimiento del forraje verde hidropónico.

Especies	Luz	Espesor de raíz (cm)		Altura de vástago (cm)	
		L	H	L	H
Trigo	T0	2.60 b ^y B ^z	3.65 aA	12.71 bA	13.35 bA
	T1	3.52 aA	2.75 bB	13.33 abA	14.83 bA
	T2	2.96 abA	2.75 bA	15.56 aA	16.35 aA
	T3	2.83 abB	4.12 aA	13.65 abB	16.33 aA
Maíz	T0	2.14 aA	2.46 bA	16.44 cA	17.52 cA
	T1	1.77 bB	2.42 bA	18.29 bB	19.85 bA
	T2	1.80 bA	1.85 cA	17.90 bB	19.21 bA
	T3	2.09 abB	3.42 aA	19.08 aB	21.33 aA
Cebada	T0	4.17 aA	4.30 aA	17.90 aA	17.63 bA
	T1	3.70 aB	4.01 aA	16.44 bB	17.63 bA
	T2	3.17 bA	3.39 aA	18.27 aA	18.46 aA
	T3	3.46 aB	3.77 aA	16.96 bB	17.79 bA

^yDiferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre cuatro espectros de la misma intensidad a una prueba LSD al $P \leq 0.05$. (n = 4).

^zDiferentes letras mayúsculas indican diferencias significativas entre dos intensidades del mismo espectro a una prueba LSD al $P \leq 0.05$. (n = 4).

L = baja intensidad de iluminación; H = alta intensidad de iluminación.

6.3.3 Peso fresco de forraje verde hidropónico

La Table 3 presenta los resultados obtenidos en el peso fresco y porcentaje de materia seca.

En trigo, comparando los espectros en las dos intensidades de iluminación (L y H) del peso fresco total de forraje verde hidropónico, el mayor rendimiento obtenido fue en los tratamientos espectrales T2 y T3 con un 30% y 15% más que el tratamiento control (T0), respectivamente. El mayor peso fresco de vástago fue obtenido en el T3, con más de 70% de producción de vástago en las dos intensidades de iluminación. Sin embargo, el peso fresco de raíz a intensidad H no tuvo diferencia estadística clara en los cuatro tratamientos de iluminación LED, y en intensidad L el tratamiento T2 fue 29% mayor respecto el T0. Comparando por intensidad lumínica, no se observaron diferencias estadísticas claras, únicamente se observaron en el peso fresco total del tratamiento T0 y T3, donde se mostró 32% y 18% más de producción en intensidad H, respectivamente. Así como en el peso fresco de vástago, con más de un 30% en los mismos tratamientos (T0 y T3) a una misma intensidad (H). Nuestros valores de producción en fresco de trigo fueron mayores en cualquiera de los tratamientos que los obtenidos por Contreras et al. (2015), a pesar de que su producción la realizó con combinación de trigo + otra leguminosa. Así como también nuestros datos fueron superiores a los publicados por Navarrete (2008). Al-Ajmi et al. (2009) obtuvo producciones

de 7 a 9 kg en trigo, casi 50% menos que en algunos de nuestros casos. Cerrillo Soto et al. (2012) obtuvo resultados de forraje verde hidropónico de trigo menores a los nuestros, incluso menores que nuestro tratamiento control.

Comparando los espectros en el cultivo de maíz, en tres de los seis casos el espectro correspondiente al T2 fue el que produjo más de 20% respecto al T0 a una intensidad L. El T3 fue en promedio 15% mayor que el tratamiento T1, en la intensidad H. La producción de materia fresca de vástago, no se mostraron diferencias. Respecto a la comparación en un solo espectro con relación a la intensidad de iluminación (L y H), no se mostraron diferencias estadísticas significativas. Vargas-Rodríguez (2008) logró producir en 7.2 m² poco más de 17 kg de forraje de maíz producido con fertirrigación durante tres días con luz. Rivera y Monrota (2000), Müller et al. (2005) y Rivera et al. (2010) obtuvieron rendimientos de forraje hidropónico de maíz menores a los nuestros con iluminación adecuada natural, iluminación artificial e iluminación natural deficiente, respectivamente. Nuestros valores de rendimiento fueron menores a los reportados por Espinosa-Robles et al. (2009). Nuestros valores de producción de forraje verde hidropónico de maíz fueron similares a los obtenidos por López-Aguilar et al. (2009). En ningún caso utilizan espectros de iluminación LED.

La cebada no tuvo un comportamiento tan claro en el peso fresco del forraje verde hidropónico. No se mostraron diferencias tanto en la intensidad alta como en la baja del peso fresco de vástago entre los espectros de iluminación. Tampoco se observaron diferencias en el peso fresco total y de raíz a alta intensidad entre los espectros. Sin embargo, en la intensidad L del peso fresco total y del peso fresco de raíz, se mostró que los espectros T0 y T3 fueron en promedio 28% mayores que el forraje producido en un tratamiento de espectro T2. Comparando el espectro en relación con las intensidades, sólo se observaron diferencias en el peso fresco total y en el peso fresco de raíz con el tratamiento T2, un 26 y 31% más en la intensidad H respecto a la L, respectivamente. Investigaciones realizadas por Al-Ajmi et al. (2009) obtuvieron un incremento de la producción de forraje en fresco cuando incrementaban el contenido de nitrógeno en el riego. Los valores de peso fresco de forraje verde hidropónico de cebada que obtuvieron Fazaeli et al. (2012) usando lámparas fluorescentes de 1000 a 1500 microwatts/cm² con fotoperiodos de 12 a 14 h durante 8 días fueron en algunos casos, casi tres veces menores a los nuestros, quizá esta variación fue por el corto tiempo de producción. Nuestros valores fueron mayores a los publicados por Romero Valdez et al. (2009) usando una densidad de siembra de 2.5 kg de semilla m². Birgi

et al. (2018) obtuvieron similares valores a los nuestros en peso fresco de dos variedades de cebada cultivadas a dos niveles de iluminación natural.

6.3.4 Peso seco de forraje verde hidropónico

En trigo a una intensidad L, el tratamiento con espectro T2 fue 10% mayor de peso seco total que el resto de los tratamientos, mientras que en intensidad H, el T3 fue mayor 18% de peso seco total (Tabla 3). En el peso seco de la parte aérea del forraje en la intensidad L el T2 y T3 son 4% mayores que el T0 y el T1. En la mayor intensidad de iluminación (H) el T3 resultó 23% mayor que los demás tratamientos. El peso seco de las raíces de trigo no mostró alguna diferencia significativa. Comparando los tratamientos espectrales por intensidad, cuatro de los casos obtuvieron mayor peso seco en intensidad mayor, de los cuales dos fueron en el T0 y dos en el T3, con valores entre el 12 y el 56%. Nuestros resultados han sido mayores que los datos publicados para trigo por Herrera-Torres et al. (2010) y por Al-Ajmi et al. (2009). Sin embargo, nuestros valores fueron menores a los publicados por Contreras et al. (2015), esto puede ser debido a que el tiempo que emplearon de producción fue mayor que el nuestro y fue combinado con otra leguminosa. En una publicación reciente, Muro et al. (2019) mencionan que el bajo porcentaje de materia seca en el forraje verde hidropónico no se puede recomendar para etapas reproductivas ni lactantes en conejos, debido a un bajo contenido nutricional.

Para el cultivo de maíz (Tabla 3), el T2 en intensidad L presentó un peso seco total mayor, 15.4% más que el tratamiento control. En la intensidad H, los tratamientos T0, T1 y T2 fueron en promedio 12% mayores que el T3. Sin embargo, en el peso seco de la parte aérea el T3 fue el que resultó 48% mayor que cualquiera de los tratamientos en la intensidad H, en la L no hubo diferencias entre los tratamientos. Mientras que el T2 en el peso seco de la raíz fue 18% mayor que el T0 en la intensidad L. Respecto a la comparación entre las intensidades por tratamientos, sólo el T0 mostró una diferencia significativa de 47% más en intensidad L que en intensidad H en el peso seco de vástago. Los resultados obtenidos por Vargas-Rodríguez (2008) y Campêlo et al. (2007) de materia seca en maíz fueron menores que los nuestros, donde evaluó gramíneas como el arroz, y obtuvo 11% de materia seca, mientras que en nuestro caso obtuvimos en promedio 23 y 22% de materia seca con baja y alta intensidad, respectivamente. Así como también, otros valores menores a los nuestros en porcentaje de materia seca lo obtuvieron Rivera et al. (2010), entre 16 y 18% de materia seca con diferentes métodos de cultivo. Nuestros datos coinciden con algunos autores que

obtuvieron entre 20 y 30% de materia seca en maíz (Carballo, 2000; FAO, 2001; Elizondo, 2005; Müller et al., 2005).

Analizando el porcentaje de materia seca de cebada (Tabla 3), únicamente en intensidad alta (H) en el peso seco de vástago se mostraron diferencias significativas, donde el T1 fue entre 17 y 14% menor que los tratamientos T0, T2 y T3. En los demás casos no se obtuvieron diferencias claras significativas. Comparando los tratamientos de iluminación frente a la intensidad, el tratamiento T3 en intensidad L mostró un peso seco total y de raíz mayor que el forraje cultivado con intensidad H en un 33 y 47%, respectivamente. Así como también, el T2 mostró una diferencia significativa en intensidad H respecto a la intensidad L, con un 17 y 14% mayor en el peso seco total y en el peso seco de vástago, respectivamente. El porcentaje de materia seca publicados por Fazaeli et al. (2012) usando lámparas fluorescentes fueron mayores a los nuestros. Estos mismos autores mencionan que contenidos bajos de materia seca pueden suponer una difícil ingesta en la alimentación animal. Todos nuestros casos fueron mayores a los obtenidos por Birgi et al. (2018).

Tabla 3. Efecto de la intensidad y espectro sobre el peso fresco (PF) y materia seca (MS) de tres especies de forraje verde hidropónico.

Especie	Luz	Total		Vástago		Raíz	
		L	H	Intensidad		L	H
				L	H		
PF (kg m ⁻²)							
Trigo	T0	11.08 b ^y B ^z	14.66 bA	1.56 cB	2.09 bA	9.52 bA	12.57 aA
	T1	13.52 abA	14.45 bA	2.04 bcA	2.08 bA	11.48 abA	12.37 aA
	T2	14.67 aA	16.51 aA	2.42 abA	2.75 bA	12.25 aA	13.76 aA
	T3	14.31 abB	16.82 aA	2.72 aB	3.57 aA	11.59 abA	13.26 aA
Maíz	T0	10.39 bA	12.16 abA	2.61 bA	2.71 aA	7.77 bA	9.45 abA
	T1	11.41 abA	11.45 bA	2.74 bA	2.86 aA	8.67 abA	8.59 bA
	T2	12.68 aA	11.63 bA	3.30 aA	2.55 aA	9.38 aA	9.08 abA
	T3	11.79 abA	13.00 aA	2.93 abA	2.93 aA	8.86 abA	10.07 aA
Cebada	T0	18.13 aA	18.62 aA	4.00 aA	4.11 aA	14.14 aA	14.50 aA
	T1	17.53 bA	18.27 aA	4.11 aA	3.85 aA	13.43 bA	14.42 aA
	T2	15.17 cB	19.17 aA	3.91 aA	4.37 aA	11.26 cB	14.80 aA
	T3	18.95 aA	18.59 aA	4.27 aA	4.82 aA	14.68 aA	13.77 aA
PS (kg m ⁻²)							
Trigo	T0	1.21 bB	1.41 abA	0.21 bA	0.23 bA	1.00 aB	1.18 aA
	T1	1.23 bA	1.27 bA	0.24 abA	0.23 bA	1.00 aA	1.04 aA
	T2	1.38 aA	1.43 abA	0.25 aA	0.25 bA	1.13 aA	1.18 aA
	T3	1.34 bB	1.50 aA	0.25 aB	0.39 aA	1.09 aA	1.11 aA
Maíz	T0	2.46 bA	2.70 aA	0.25 aA	0.17 bB	2.21 bA	2.52 aA
	T1	2.66 abA	2.67 aA	0.24 aA	0.18 bA	2.42 abA	2.49 aA
	T2	2.84 aA	2.68 aA	0.24 aA	0.20 bA	2.60 aA	2.48 aA
	T3	2.55 abA	2.39 bA	0.23 aA	0.27 aA	2.33 abA	2.12 aA
Cebada	T0	1.72 aA	1.96 aA	0.31 aA	0.34 aA	1.41 aA	1.63 aA
	T1	1.83 aA	1.84 aA	0.27 aA	0.29 bA	1.56 aA	1.55 aA
	T2	1.53 aB	1.79 aA	0.29 aB	0.33 abA	1.24 aA	1.45 aA
	T3	1.86 aA	1.40 aB	0.30 aA	0.33 abA	1.57 aA	1.07 aB

^yDiferentes letras minúsculas indican diferencias significativas entre cuatro espectros de la misma intensidad a una prueba LSD al $P \leq 0.05$. (n = 4).

^zDiferentes letras mayúsculas indicant diferencias significativas entre dos intensidades del mismo espectro a una prueba LSD al $P \leq 0.05$. (n = 4).

L = baja intensidad de iluminación; H = alta intensidad de iluminación.

6.3.5 Parámetros de eficiencia para la producción de forraje

El agua es un componente sustancial para la producción del forraje verde hidropónico, y en la actualidad es importante el cuidado de este recurso natural, con la implementación de iluminación LED se muestra un significativo uso eficiente del agua en dos de los cultivos evaluados. El menor consumo de agua por kg de forraje verde hidropónico producido fue a una alta intensidad de iluminación, excepto en los tratamientos (T0 en trigo y T2 en cebada) (Figura 2A-B). De manera general, la mayor EEE se realizó en los espectros más ajustados a la fotosíntesis de los cultivos de trigo y maíz (Figura 2C). La relación de semilla de los cereales estudiados convertida en forraje muestra la eficiencia en el desarrollo de la semilla en los tratamientos (Figura 2D).

De manera independiente, en el cultivo de trigo, comparando por intensidad, la intensidad H fue la que realizó un menor uso eficiente del agua para la producción de forraje verde hidropónico fresco, 12% en promedio respecto a la intensidad L. Excepto en el tratamiento T0 no se vieron diferencias significativas cambiando la intensidad lumínica (Figura 3A). Respecto a los espectros, los tratamientos de iluminación T1, T2 y T3 fueron 28% en promedio mayores que el tratamiento control (T0) en intensidad L, lo que significa que el T0 realizó una menor eficiencia del uso de agua para la producción de materia fresca. En intensidad H, los tratamientos T0 y T1 fueron los tratamientos que realizaron una menor eficiencia de agua un 15% en promedio, respecto a los espectros T2 y T3. La Figura 2B muestra un uso eficiente de agua para la producción de materia seca similar que el uso eficiente en materia fresca. Respecto a la intensidad, los tratamientos T1, T2 y T3 obtuvieron diferencias significativas en la intensidad L respecto la H, siendo un 18.6% en promedio más eficiente a una intensidad L. Mientras que el tratamiento control no mostró diferencias por intensidades. Comparando entre espectros, en la intensidad L los tratamientos T0 y T1 fueron los que realizaron un menor uso eficiente del agua para la producción de materia seca, siendo los T2 y T3 un 11% en promedio más eficientes. En la intensidad H, el T1 fue 14% menos eficiente que los demás tratamientos para la producción de materia seca. Hemos obtenido un mayor uso eficiente del agua que el publicado por Jefferson y Cutforth (2005) para el cultivo de trigo. Al-Karaki y Al-Hashimi (2012) obtuvieron mayor eficiencia en el uso de agua que los nuestros en materia fresca y seca. La intensidad L realizó una mayor EEE (42%) que la intensidad H. En intensidad L, los tratamientos con un mayor ajuste del espectro a la fotosíntesis desarrollaron mayor biomasa fresca (27%) por kW de energía consumida, que T0 (Figura 3C). Mientras que en intensidad H no se mostraron diferencias. Rahman y Hasan (2014), en condiciones de producción de trigo a campo abierto, obtuvieron una eficiencia energética mayor que la nuestra. Se muestra que la relación de semilla de trigo sembrada por metro cuadrado para la producción de forraje tiene una relación inversa al consumo de agua, lo que indica que el tratamiento que más agua usó en la producción fue el que menos relación de producción de forraje obtuvo respecto a las semillas sembradas. En el caso del trigo, se muestra en la Figure 3D que el T0 a intensidad L obtuvo en promedio 28% menos relación conversión de semilla a forraje, respecto a los otros tres tratamientos. A una intensidad H, los tratamientos T2 y T3 obtuvieron en promedio 14% más de relación para la conversión de forraje, respecto al tratamiento control y el T1. Hay autores que mencionan que una relación de 1:5 es la ideal para la eficiencia de la conversión a forraje verde hidropónico (Valdivia, 1997), pero en nuestro caso, para el trigo, el tratamiento T3 logró casi la relación

de 1:6. Sin embargo en el caso del tratamiento control (T0) en uno de los casos de trigo obtuvo una relación de 1:3, más baja que la que la bibliografía recomienda (Valdivia, 1997).

Comparando la eficiencia de producción de materia fresca por agua suministrada con las dos intensidades de iluminación LED en maíz (Figure 3A), la intensidad de iluminación L fue 21% más eficiente que la intensidad H. Respecto a los espectros de iluminación LED, en la intensidad L, el espectro del tratamiento T2 fue 22% más eficiente para producir mayor materia fresca en relación con el agua suministrada, respecto al tratamiento control (T0), y un 9% más eficiente respecto a los tratamientos T1 y T3. Respecto a los espectros evaluados con intensidad H, el tratamiento T3 fue el que realizó en promedio un 11% mejor la eficiencia de agua en la producción de forraje verde hidropónico fresco, frente a los demás tratamientos. Para la producción de materia seca a una intensidad L se realizó una mayor eficiencia de agua con un 27% que con intensidad H (Figure 3B). Realizando el análisis por espectros en cada intensidad, en intensidad L el T2 fue 14% más eficiente de agua para la producción de materia seca que el tratamiento control (T0). Mientras que con la intensidad H, el T3 fue 12% menos eficiente que los otros tratamientos evaluados. López-Aguilar et al. (2009) en su investigación obtuvieron un menor uso eficiente del agua que nuestro caso en la producción de materia seca de maíz. Nuestros resultados de uso eficiente del agua en maíz fueron mayores a los publicados por Howell et al. (1998). El tratamiento de intensidad que realizó una mejor EEE en maíz fue L, en un 91% más que H. Por tratamientos espectrales en intensidad L, el tratamiento que realizó una mejor eficiencia energética fue el T2, fue 22% mejor que el T0 y 9% mejor que T1 y T3. Sin embargo, en intensidad H no se mostraron diferencias (Figure 3C). Es bien conocido que se obtiene una mayor EEE con el uso de iluminación LED en cultivos sobre cámaras de cultivos (Yeh y Chung, 2009; Stanghellini et al., 2019). La relación de conversión de semilla de maíz a forraje verde hidropónico (Figura 3D) fue de 1:2.5 a 1:3, no mostrando diferencias significativas entre los tratamientos espectrales ni por intensidad lumínica. Nuestros datos fueron menores a la relación de semilla obtenida para maíz y sorgo por Vargas-Rodríguez (2008) y en maíz blanco, amarillo y azul por Espinosa-Robles et al. (2009).

Para el caso del cultivo de forraje verde hidropónico de cebada, comparando el uso eficiente del agua en la producción de materia fresca por intensidad (Figura 3A), a una intensidad H el uso eficiente de agua fue un 24% menor respecto al tratamientos de intensidad L, excepto en el tratamiento T2. Comparando los espectros independientes, en intensidad L el T3 fue 25% más eficiente para la producción de forraje verde que el

tratamiento T2, teniendo también diferencia estadística con los T0 y T1. Mientras que, a una alta intensidad (H), no se mostraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. En relación con la eficiencia de agua respecto a la producción de materia seca producida que se muestra en la Figura 3B, la intensidad H fue 32% menos eficiente que la intensidad L, excepto en el tratamiento T2, este tratamiento no mostró diferencias estadísticas entre intensidades. Comparando los espectros por intensidad, en H el tratamiento control (T0) fue el que obtuvo una mayor eficiencia del uso de agua que los tratamientos T1 y T2 con 9% y 41% en el tratamiento T3. En la intensidad L, los tratamientos T1 y T3 fueron 7 y 21% más eficientes que los tratamientos T0 y T2, respectivamente. Para el cultivo de cebada, obtuvimos una mayor eficiencia de uso del agua que los valores obtenidos por Azooz y Arshad (1998) en la producción de materia seca. Al-Karaki y Al-Hashimi (2012) y Al-Karaki et al. (2011) obtuvieron mayor eficiencia en el uso de agua que los nuestros en materia fresca y seca. El tratamiento de intensidad H fue en promedio 86% menos eficiente en energía que el tratamiento de intensidad L para todos los tratamientos espectrales. En intensidad L, el espectro T2 fue 20% menos eficiente energéticamente que los demás tratamientos. En intensidad H no se mostraron diferencias (Figura 3C). En un estudio realizado por Singh et al. (2015) se menciona que las LED son entre 78 y 94% más eficientes energéticamente que las lámparas HPS en cultivos hortícolas en invernadero. En la Figura 3D se muestra que la cebada mostró una mayor relación de conversión de forraje, respecto al maíz o trigo. Sin embargo, no se mostraron diferencias significativas entre los cuatro tratamientos en intensidad H. En intensidad L el T2 obtuvo menor eficiencia para la conversión de semilla significativamente que los tratamientos T0, T1 y T3, que no mostraron diferencias estadísticas significativas entre ellos. Sin embargo, los valores medios fueron de una relación de 1:6, excepto en el T2 a intensidad L, que obtuvo una relación de 1:5, valores que algunos autores recomiendan para la producción de forraje verde hidropónico (Valdivia, 1997).

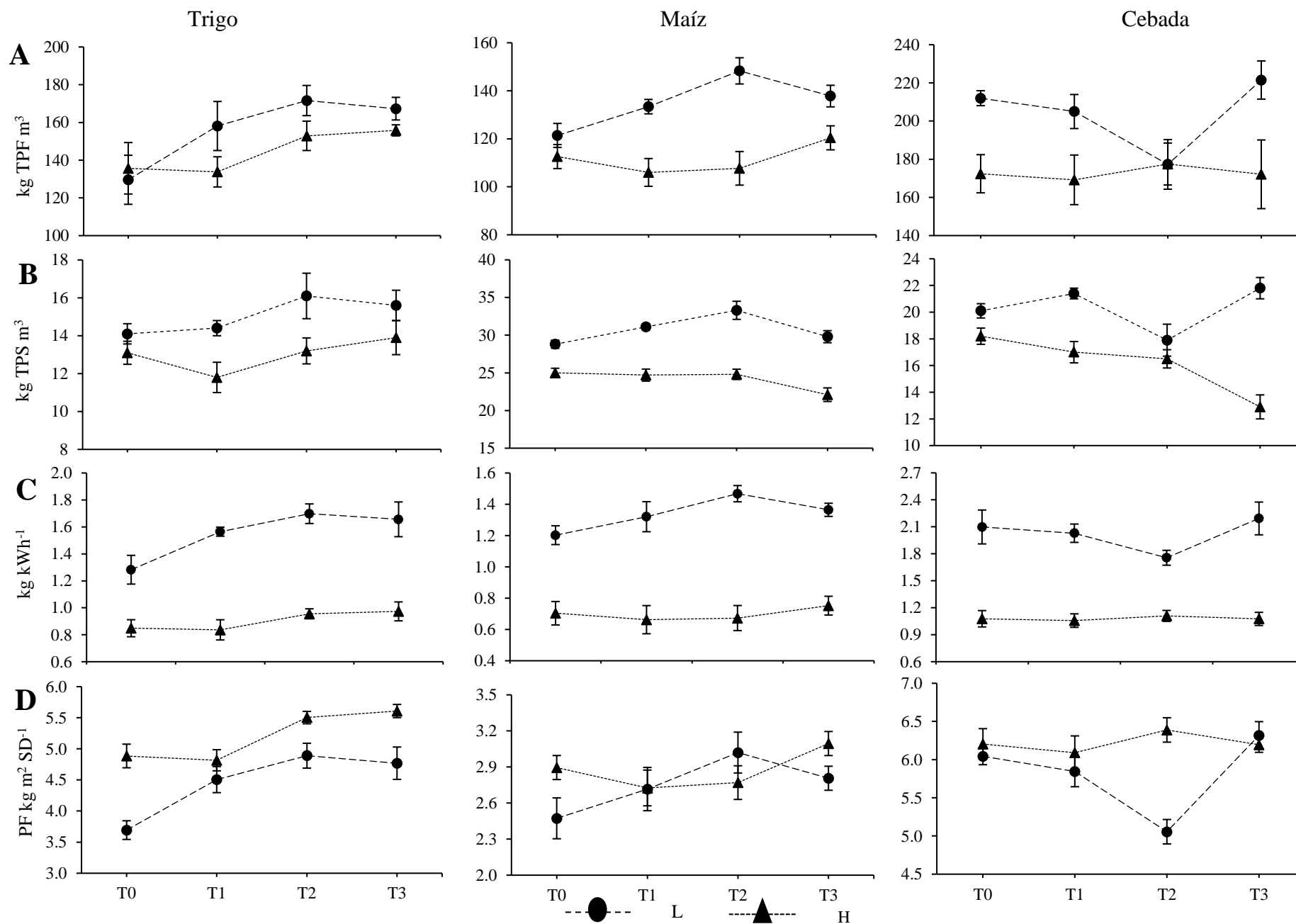


Fig. 3. Parámetros de eficiencia del forraje en dos intensidades de luz LED [Bajo (L) y Alto (H)] de tres cereales. Uso eficiente del agua (UEA) en peso fresco total (A), UEA en el peso seco total (B), Eficiencia energética eléctrica (EEE) en peso fresco (C) y factor de conversión de semilla a forraje (D). T0 = L18 T8 Roblan®; T1 = L18 NS1 Valoya®; T2 = L18 AP67 Valoya® y T3 = L18 AP673L Valoya®. Barras verticales representan el error estándar de la media a una prueba LSD al $P \leq 0.05$. (n = 4).

6.3.6 Parámetro nutricional en el contenido de nitrato y clorofila de forraje

La homogeneidad de los resultados de las mediciones con los dos medidores usados en los tres cultivos presentó un comportamiento muy similar, independientemente del tratamiento de iluminación y espectro aplicado (Figura 4). Cualquier método empleado puede ser usado para aportar información del contenido de NO_3^- en el forraje verde hidropónico. El medidor SPAD tiene la ventaja de que las medidas son no destructivas y se ha convertido en una propuesta para la medición rápida y confiable del nitrógeno en las hojas de los cultivos hortícolas (Padilla et al., 2015; Hurtado et al., 2017), teniendo una ventaja competitiva frente al medidor de nitrato LAQUA Twin Nitrate que, para la obtención de datos, las muestras deben ser destruidas.

La acumulación de nitratos en todos los casos no fue homogénea entre cultivos. El tratamiento T3 fue el que acumuló significativamente menores cantidades de nitrato en trigo a baja intensidad (Figura 4A); así como también el T2 y T3 en el mismo cereal, fueron los que mostraron una menor acumulación de nitratos a una alta intensidad. En maíz (Figura 4B), a baja intensidad (L), el tratamiento T0 fue el que concentró más nitratos que el resto de los tratamientos evaluados. A una alta intensidad (H) también en maíz, el T3 fue el que favoreció estadísticamente la disminución de nitratos respecto a los demás tratamientos. Para cebada (Figura 4C), tanto en baja como en alta intensidad, el T2 obtuvo menores concentraciones de nitrato. La disminución de nitrato con alta radiación puede ser explicada por la estimulación de enzimas que intervienen en el metabolismo reductor de nitratos (glutamina sintetasa (GS), glutamato sintetasa (GOGAT)), donde también favorece la inhibición de un aminoácido no esencial, llamado asparagina sintetasa (AS), la cual ayuda a la asimilación del nitrógeno en carbono. Mientras que, con luz baja, se inhiben la GS y GOGAT, y se estimula la AS, almacenando nitrato en las plantas (Bian et al., 2018; Nájera y Urrestarazu, 2019).

Hay autores que en sus investigaciones analizan la factibilidad nutricional del forraje verde hidropónico sin tomar en cuenta el contenido de nitrato de éste (Samperio-Ruiz, 2009; Fazaeli et al., 2011; Rodríguez, 2012; Chen et al., 2015; Kaouche-Adjlane et al., 2016; Girma y Gebremariam, 2018; Sebata, 2018). Debido a la importancia que tiene la disminución del contenido de nitratos en la salud humana y animal, en recientes investigaciones (Nájera y Urrestarazu, 2019) se han usado lámparas LED similares a las de los tratamientos T0 y T2 para la reducción de este compuesto. Nájera y Urrestarazu (2019) han conseguido disminuir el nitrato en cultivos hortícolas de hoja acumuladoras hasta 35% a una alta intensidad similar

a la nuestra. Sin embargo, la Comisión Europea (EC, 2011) y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2010) determinan el contenido de nitrato en hortalizas consumidas por humanos, y creemos que también debería ser considerada en igualdad de condiciones para animales. Nuestros datos comprueban que los espectros son una alternativa para la disminución de este compuesto químico dañino para la salud humana y animal, incluso nuestros valores han sido valores por debajo de los recomendados por la EC (2011) y EFSA (2010) en cultivos de rúcula, espinaca y lechuga, y por los obtenidos por Nájera y Urrestarazu (2019) en hortalizas acumuladoras de nitrato.

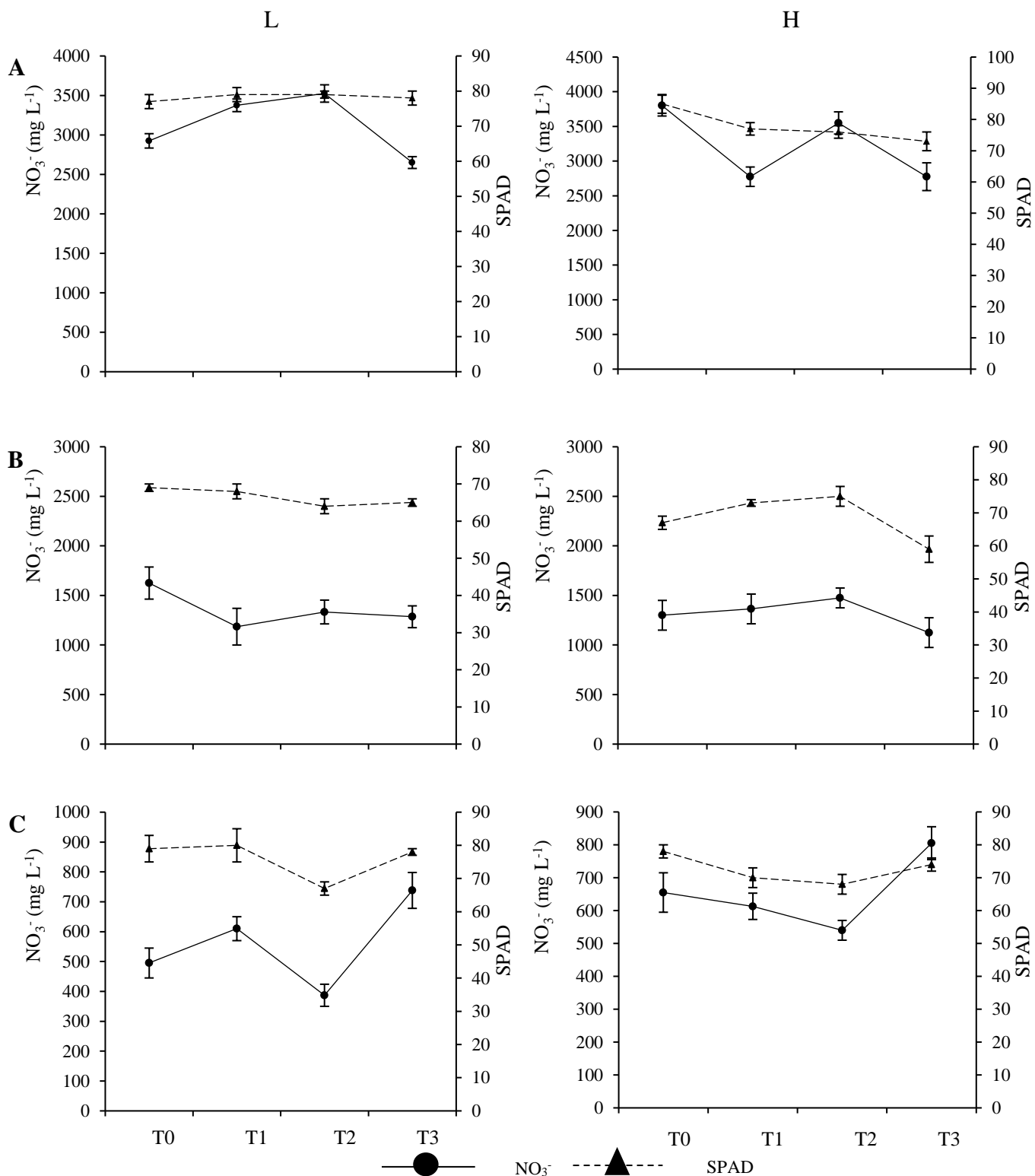


Fig. 4. Parámetros nutricionales en tres especies de forrajes obtenidas con dos métodos analíticos a dos intensidades de iluminación [3(L) y 6(H) lámparas]. (A) Trigo; (B) Maíz; (C) Cebada. NO_3^- = LAQUA Twin Nitrate; SPAD = SPAD-502PLUS. T0 = L18 T8 Roblan; T1 = L18 NS1 Valoya; T2 = L18 AP67 Valoya; T3 = L18 AP673L Valoya. Barras verticales representan el error estándar de la media (n = 4) por una prueba LSD, $P \leq 0.05$.

6.4 Literatura citada

- Abou-Hadid, A.F. 2006. Assessment of impacts, adaptation and vulnerability to climate change in North Africa: Food production and water resources a final report submitted to assessments of impacts and adaptations to climate change (AIACC). Project No. AF 90.
- Akbas, E., M. Kilercioglu, O.N. Onder, A. Koker, B. Soyler, M.H. Oztop. 2017. Wheatgrass juice to wheat grass powder: Encapsulation, physical and chemical characterization. *J Funct Food* 28:19-27.
- Al-Ajmi, A, A. Salih, I. Kadhim, Y. Othman. 2009. Yield and water use efficiency of barley fodder produced under hydroponic system in GCC countries using tertiary treated sewage effluents. *J Phytol* 1:342-348.
- Al-Karaki, G.N., M. Al-Hashimi. 2012. Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic condition. *ISRN Agronomy* 1-5.
- Al-Karaki, N. Ghazi, N. Al-Momani. 2011. Evaluation of some barley cultivars for green fodder production and water use efficiency under hydroponic conditions. *Jordan J Agricultural Sci* 7:448-457.
- Arano, C.R. 1998. Forraje verde hidropónico y otras técnicas de cultivos sin tierra. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- Aydos, O., A. Avci, T. Ozkan, A. Karadag, E. Gurleyik. 2011. Antiproliferative, apoptotic and antioxidant activities of wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) extract on CML (K562) cell line. *Turk J Med Sci* 41:657-663.
- Azooz, R.H., M.A. Arshad. 1998. Effect of tillage and residue management on barley and canola growth and water use efficiency. *Can J Soil Sci* 78:649-656.
- Bantis, F., T. Ouzounis, K. Radoglou. 2016. Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Sci Hortic* 198:277-283.
- Bian, Z., R. Cheng, Y. Wang, Q. Yang, C. Lu. 2018. Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Environ Exp Bot* 153:63-71.

- Birgi, J.A., V. Gargaglione, V. Utrilla. 2018. El forraje verde hidropónico como una alternativa productiva en Patagonia Sur: Productividad y calidad nutricional de dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare*). RIA 1-8.
- Campêlo, J., J. Gomes, A. Silva, J. Carvalho, G. Coutinho, M. Oliveira, J. Lopes, J. Silva, V. Marchao, L. Morais. 2007. Forragem de milho hidropónico producida com diferentes substratos. Rev Bras Zootec 36:276-281.
- Capstaff, N.M., A.J. Miller. 2018. Improving the yield and nutritional quality of forage crops. Front Plant Sci 9:535.
- Carballo, C. 2000. Manual de procedimientos para germinar granos para la alimentación animal. ZOE.
- Carvalho SD, M.L. Schwieterman, C.E. Abrahan, T.A. Colquhoun, K.M. Folta. 2016. Light quality dependent changes in morphology, antioxidant capacity, and volatile production in sweet Basil (*Ocimum basilicum*). Front Plant Sci 7:1328.
- Cerrillo Soto, M.A., A.S. Juárez Reyes, J.A. Rivera Ahumada, M. Guerrero Cervantes, R.G. Ramírez Lozano, H. Bernal Barragán. 2012. Producción de biomasa y valor nutricional del forraje verde hidropónico de trigo y avena. Interciencia 37:906-913.
- Chang, C.L., K.P. Chang. 2014. The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple wavelength-band light-emitting diode lighting. Sci Hort 179:78-84.
- Chen, X., B. Zhao, L. Cheen, R. Wang, C. Ji. 2015. Defoliation enhances green foraje performance but inhibits grain yield in barley (*Hordeum vulgare* L.). Expl Agric 1:14.
- Contreras, J.L., Q.M. Tunque, G.A. Cordero. 2015. Rendimiento hidropónico de la arveja con cebada y trigo en la producción de germinados. RIVEP 26:9-19.
- Croser, J.S., M. Pazos-Navarro, R.G. Bennett, S. Tschirren, K. Edwards, W. Erskine, R. Creasy, F.M. Ribalta. 2016. Time to flowering of temperate pulses in vivo and generation turnover in vivo–in vitro of narrow-leaf lupin accelerated by low red to far-red ratio and high intensity in the far-red region. Plant Cell Tiss Org 127:591-599.
- Dosal, J.M. 1987. Efecto de la dosis de siembra, época de cosecha y fertilización sobre la calidad y cantidad de forraje de avena producido bajo condiciones de hidroponía. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de Concepción, Chillán, Chile.

- Elizondo, J. 2005. Forraje verde hidropónico: una alternativa para la alimentación animal. *Revista ECAG* 32:36-39.
- Espinosa-Robles, P., L. Espinoza-Mendoza, C. Pérez-Mercado, J. Agustín-Martínez. 2009. Hydroponics maize forage production. *Acta Hort* 843:283-286.
- EC, 2011. Regulation No. 1258/2011 of 2 December 2011 amending Regulation No. 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. *OJ. L.* 2011 320:15-17. 10 Oct. 2019. <https://www.fsai.ie/uploadedFiles/Reg1258_2011.pdf>.
- EFSA, 2010. Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. European Food Safety Authority. Scientific Opinion. Statement on possible public health risks for infants and young children from the presence of nitrates in leafy vegetables. *EFSA Journal* 8:1935. 10 Jul. 2019. <<https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/1935>>.
- FAO, 2001. Manual técnico forraje verde hidropónico. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Santiago, Chile 2001.
- FAO. FAOSTAT, 2018. Food and Agriculture Organization Statistics. Uso del suelo destinado a producción de pastizales. <<http://www.fao.org/faostat/es/#home>>.
- Fazaeli, H., H.A. Golmohammadi, A.A. Shoayee, N. Montajedi, S. Mosharraf. 2011. Performance of feedlot calves fed hydroponics fodder barley. *J Agr Sci Tech* 13:367-375.
- Fazaeli, H., H.A. Golmohammadi, S.N. Tabatabayee, M. Asghari-Tabrizi. 2012. Productivity and nutritive value of barley green fodder yield in hydroponic system. *World Appl Sci J* 16:531-539.
- Flórez, D.F. 2017. Estimación de la capacidad de carga del sistema de producción lechero de la vereda Fontibón del municipio de Pamplona. *Mundo FESC* 13:15-21.
- Fuentes, F., C. Poblete, M. Huerta, I. Palape. 2011. Evaluación de la producción y calidad nutritiva de avena como forraje verde hidropónico en condiciones de desierto. *IDESIA* 29:75-81.
- Girma, F., B. Gebremariam. 2018. Review on hydroponic feed value to livestock production. *J Sci Innov Res* 7:106-109.

- Gulmezoglu, N., I. Tolay, A. Askin. 2010. Changes in nitrate concentration of triticale forages (*xTriticosecale Wittmack*) at different growth stages by increasing nitrogen rates. *J Food Agric Environ* 8:449-453.
- Herrera-Torres, E., M.A. Cerrillo-Soto, A.S. Juárez-Reyes, M. Murillo-Ortiz, F.G. Rios-Rincón, O. Reyes-Estrada, H. Bernal-Barragán. 2010. Efecto del tiempo de cosecha sobre el valor proteico y energético del forraje verde hidropónico de trigo. *Interciencia* 35:284-289.
- Howell T.A, J.A. Tolk, A.D. Schneider, S.R. Evett. 1998. Evapotranspiration, yield, and water use efficiency of corn hybrids differing in maturity. *Agron J* 90:3-9.
- Hurtado, E., F. González-Vallejos, C. Röper, E. Bastías, P. Mazuela. 2017. Proposal for determination of chlorophyll content in tomato leaves. *Idesia* 35:129-130.
- Jefferson, P.G., H.W. Cutforth. 2005. Comparative forage yield, water use, and water use efficiency of alfalfa, crested wheatgrass and spring wheat in a semiarid climate in Southern Saskatchewan. *Can J Plant Sci* 85:877-888.
- Juárez-López, P., H.J. Morales-Rodríguez, M. Sandoval-Villa, A.A. Gómez Danés, E. Cruz-Crespo, C.R. Juárez-Rosete, R. Aguirre-Ortegas, G. Alejo-Santiago, M. Ortiz, M. Catón. 2013. Producción de forraje verde hidropónico. *Revista Fuente* 13:16-26.
- Kaouche-Adjlane, S., A. Ahmed Serir, M. Bafdel, R. Benhacine. 2016. Techno-Economic approach to hydroponic forage crops: Use for feeding dairy cattle herd. *J Appl Environ Biol Sci* 6:83-87.
- Kellems, R.O., D.C. Church. 1977. *Livestock feeds and feeding*. 6ta ed. Corvallis, Oregon.
- Kulkarni, S.D., R. Acharya, A.G.C. Nair, N.S. Rajurkar, A.V.R. Reddy. 2006. Determination of elemental concentration profiles in tender wheatgrass (*Triticum aestivum* L.) using instrumental neutron activation analysis. *Food Chem* 95:699-707.
- López-Aguilar, R., B. Murillo-Amador, G. Rodríguez-Quezada. 2009. El forraje verde hidropónico: una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia* 2:121-126.
- Massa, G.D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43:1951-1956.

- Müller, L., P. Manfron, O. Santos, S. Medeiros, V. Haut, D. Dourado, E. Binotto, A. Bandeira. 2005. Producción y composición bromatológica de forrajes hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) con diferentes densidades de siembra y días de cosecha. *Zootec Trop* 23:105-119.
- Muro, M., P. Willimoes, M. Ipolitti, M.S. Trigo, R. Arias, C. Cordiviola. 2019. Respuesta reproductiva de conejas a una dieta de forraje verde hidropónico (FVH). *Vet Arg* 36:378.
- Nájera, C., J.L. Guil-Guerrero, L. Jarquín Enríquez, J.E. Álvaro, M. Urrestarazu. 2018. LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit. *Postharvest Biol Tec* 145:151-156.
- Nájera, C., M. Urrestarazu. 2019. Effect of the intensity and spectral quality of LED light on yield and nitrate accumulation in vegetables. *HortScience* 54:1745-1750.
- Navarrete, R.O. 2008. Estudio de la productividad de dos gramíneas (*Hordeum vulgare* y *Triticum aestivum*) y una leguminosa (*Vicia* sp) para forraje verde hidropónico (FVH) con tres cortes sucesivos en la granja ECAA. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Padilla, F.M., M.T. Peña-Fleitas, M. Gallardo, R.B. Thompson. 2015. Threshold values of canopy reflectance indices and chlorophyll meter readings for optimal nitrogen nutrition of tomato. *Ann Appl Biol* 166: 271-285.
- Pennisi, G, S. Blasioli, A. Cellini, L. Maia, A. Crepaldi, I. Braschi, F. Spinelli, S. Nicola, J.A. Fernandez, C. Stanghellini, L.F.M. Marcelis, F. Orsini, G. Gianquinto. 2019. Unraveling the role of Red:Blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet Basil. *Front Plant Sci* 10:305.
- Piovene, C., F. Orsini, S. Bosi, R. Sanoubar, V. Bregola, and G. Dinelli, G. Gianquinto. 2015. Optimal red: blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Sci Hortic* 193:202-208.
- Rahman, S., M.K. Hasan. 2014. Energy productivity and efficiency of wheat farming in Bangladesh. *Energy* 66:107-114.
- Resh, H.M. 2001. *Cultivos Hidropónicos*. 5ta ed. Mundi-Prensa. Madrid, Spain.
- Rivera, A., M. Moronta. 2000. Producción de forraje verde hidropónico (FVH) de maíz (*Zea mays* L.) comparando la eficiencia de tres métodos de cultivo y dos soluciones

- nutritivas, en condiciones de iluminación natural deficiente. Universidad de los Andes, Trujillo, Venezuela.
- Rivera, A., M. Moronta, M. González-Estopiñán, D. González, D. Perdomo, D.E. García, and G. Hernández. 2010. Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente. *Zootec Trop* 28:33-41.
- Rodríguez, S. 2012. Hydroponic green fodder and ecology. *Acta Hort* 947:45-52.
- Romero Valdez, M.E., G.C. Duarte, E.O. Hernández Gallardo. 2009. Producción de forraje verde hidropónico y su aceptación en ganado lechero. *Acta Universitaria* 19:11-19.
- Salazar-Moreno, R., A. Rojano-Aguilar, I.L. López-Cruz, 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5:177-183.
- Samperio-Ruiz, G. 2009. Perennial production of green hydroponics forage. *Acta Hort* 843:241-248.
- Sánchez, A. 2001. Forraje verde hidropónico. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
- Santamaría, J.C., U. Figueroa-Viramontes, M.C. Medina-Morales. 2004. Productividad de la alfalfa en condiciones de salinidad en el distrito de riego 017, Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana* 22:343-349.
- Sebata, A. 2018. An insight into current and future production of forage crops in Zimbabwe, p. 89-104. In R. Loiola (ed.). *New Perspectives in Forage Crops*.
- Singh, D., C. Basu, M. Meinhardt-Wollweber, B. Roth. 2015. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renew Sust Energ Rev* 49:139-147.
- Stanghellini, C., B. van 't Ooster, E. Heuvelink. 2019. *Greenhouse horticulture. Technology for Optimal Crop Production*. Wageningen Academic Publishers. Wageningen, The Netherlands.
- Statgraphics Centurion XVII, 2018. *Statgraphics Net for Windows 7*. Madrid, Spain.
- Urrestarazu, M., C. Nájera, M. Gea. 2016. Effect of the spectral quality and intensity of Light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience* 53:260271.
- Valdivia, B.E. 1997. Producción de forraje verde hidropónico, p. 91-99. In D. Rodríguez (ed.) *Hidroponia Comercial*. Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

- Vargas-Rodríguez, C.F. 2008. Comparación productiva de forraje verde hidropónico de maíz, arroz y sorgo negro forrajero. *Agronomía Mesoamericana* 19:233-240.
- Yeh, N., J.P. Chung. 2009. High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew Sust Energ Rev* 13:2175-2180.

7. Conclusiones

7.1 Capítulo 1

Los resultados demuestran claramente que, comparando las lámparas LED convencionales, las lámparas LED diseñadas específicamente para el uso hortícola fueron más beneficiosas para los vegetales evaluados y tienen un 26% más EE.

El crecimiento de las plantas estuvo estrechamente ligado al ajuste espectral de la respuesta fotosintética máxima registrada por McCree, que por la intensidad de PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) o iluminancia (lux). Por lo tanto, una distribución espectral detallada específica es necesaria para predecir el efecto en un solo parámetro de crecimiento de las plantas. Al mismo tiempo, dentro de una cantidad y calidad de luz específica, se observa un crecimiento significativo de especies de plantas -y cultivares- específicas.

Cuando la intensidad de luz aumentó en T1 de 50 a 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, esto como mínimo duplicó el LA en comparación con T0, un aumento muy significativo en todas las especies hortícolas probadas.

7.2 Capítulo 2

La iluminación en la fase de postcosecha de los frutos de tomate favoreció los parámetros comerciales, organolépticos y el contenido de licopeno. Las condiciones de luz LED con mayores ratios R:FR influyeron positivamente en los parámetros de firmeza frente a otras condiciones de luz LED blanca. Además, las condiciones con mayor ratio R:FR incrementaron la acidez titulable de los frutos de tomate.

En general, la luz LED de mayor proporción de R:FR ejerce una mayor inducción de la síntesis de licopeno: en una proporción de 41% con relación a la obscuridad y un 24% en relación a otras condiciones de iluminación LED.

La calidad de los parámetros de fruto no se ve claramente afectada por la aplicación de luz LED, especialmente en las variedades de tomate con un mayor calibre. Si embargo, las variedades de tomate tipo cherry, mostraron efectos significativos en los tratamientos T2 y T3 que coinciden con los espectros de mayor ratio R:FR.

7.3 Capítulo 3

Respecto al rendimiento, para los dos espectros una duplicación de la intensidad lumínica conduce a una significativa mejora de la productividad en todas las especies que varía entre un 30 y 60%. Dentro de una misma especie existe una gran variabilidad de respuesta de crecimiento al duplicar la intensidad que varía entre 35 y 85%.

Cuando se utilizó un espectro continuo más ajustado a la eficiencia de la actividad fotosintética (calidad del espectro) respecto a la luz blanca convencional, en las seis especies de hortalizas ensayadas se registró un incremento medio significativo del 28 y el 20% en intensidad de iluminación baja (en torno a $50-80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y alta (en torno a $90-120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), respectivamente. La mejora de la calidad del espectro fue mayor en baja intensidad.

Cuando se comparan los dos espectros entre sí, el incremento de la producción en los cvs. de lechuga, el tratamiento con una mejor calidad del espectro mostró una gran variabilidad. A excepción de un cv. (tipo Iceberg), la mejora de la calidad del espectro es de al menos el 30%. Pudiendo alcanzar valores que oscilan del 45 al 60% para alta y baja intensidades, respectivamente.

Respecto al contenido de nitratos, aumentando la intensidad lumínica, las especies cultivadas con LED blancas, a excepción de una (remolacha), mostraron una disminución media del contenido de nitratos de 18%, oscilando de 7 a 42%, siendo la espinaca la que logra la mayor disminución. Cultivando las especies con iluminarias de espectro específico, la disminución media al incrementar la intensidad fue del 45%, aunque sólo en tres de las seis especies evaluadas (lechuga, espinaca y rábano), valores que van desde 17 al 70%, donde la espinaca también consigue la máxima disminución. Dentro de la especie, el espectro específico disminuyó un 27% el contenido de nitratos, mientras que la LED blanca un 14%.

Un espectro específico mostró una significativa disminución del contenido de nitratos a baja iluminación de 18% y en alta intensidad de 35% para las especies. Dentro de la variedad de lechuga se mostró una significativa disminución del contenido de nitratos de 10 y 21% en baja y alta iluminación, respectivamente. También este mismo espectro, obtuvo las mayores disminuciones de nitrato de una intensidad baja a un alta de 45 y 27% para las especies y dentro de una de ellas, respectivamente. La escarola fue la especie que mayor disminución de nitratos tuvo en baja intensidad (23%) con el espectro de distribución fotosintética y en alta intensidad la espinaca con un 47% menos nitratos que la LED blanca.

7.4 Capítulo 4

El espectro AP673L es recomendable para la producción de forraje verde hidropónico en las tres especies forrajeras.

La utilización de iluminación LED con espectros específicos en la producción de forraje verde hidropónico beneficia la productividad e incrementa la eficiencia del uso de agua y energía, y potencia la conversión de semillas a forraje en las tres especies forrajeras evaluadas.

El uso de espectros específicos con una relación R:FR de 3.11 y 7.60 disminuye la acumulación de nitratos en beneficio de la salud humana y animal, así como también incrementa el rendimiento en materia seca y fresca.

7.5 Conclusiones Generales

El ajuste de los espectros con intensidad similar proveniente de una tecnología con light-emitting diode (LED) conduce a una mejora en la productividad y en la fitoquímica de los alimentos.

En el futuro, la cantidad y la homogeneidad de los nutraceuticos podrá ser determinada y elegida para los diferentes cultivares en función de las pretensiones perseguidas, es decir, una luminotecnica medioambientalmente sostenible nos permitirá modular la naturaleza y contenidos saludables de la producción agrícola sostenible.

8. Conclusion

8.1 Chapter 1

The results clearly demonstrate that, compared with other conventional LED lamps, the LED lamps specifically designed for horticultural use were more beneficial to the evaluated vegetables and had 26% higher energy efficiency.

Plant growth was more closely linked to the degree of spectral fit to the maximum photosynthetic response recorded by McCree than to 1) photosynthetic photon flux intensity ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) or 2) illuminance (lux). Therefore, a specific detailed spectral distribution is necessary to predict the effect on a single parameter of plant growth. At the same time, within a specified quantity and quality of light, significantly species- and cultivar-specific plant growth is observed.

When the light intensity was increased in T1 from 50 to 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, this minimally doubled the leaf area compared with T0, a very significant increase found in all the horticultural species tested.

8.2 Chapter 2

Illumination during the postharvest phase of the tomato fruit had a positive effect on their commercial and organoleptic parameters and lycopene content. LED light conditions with the highest R:FR ratios positively affected the firmness parameters compared with other white LED light conditions. Furthermore, the conditions with the highest R:FR ratio increased the titratable acidity of the tomato fruit. In general, LED light with a higher R:FR ratios exert a greater influence on induction of lycopene synthesis: a 41% increase was observed relative to exposure to darkness, and a 24% increase was observed relative to other LED lighting conditions. The quality of the fruit parameters is not affected by exposure to LED light, especially in large tomato cultivars. However, cherry tomato cultivars were affected by the T2 and T3 treatments, which coincide with spectra of higher R:FR ratios.

8.3 Chapter 3

Regarding performance, for the two spectra, doubling the light intensity leads to a significant improvement in the productivity for all the species, with the values varying between 30 and 60%. Within the same species, there is a great variability in the growth response when doubling the intensity, varying between 35 and 85%.

When a continuous spectrum, adjusted to the efficiency of photosynthetic activity (spectral quality), was used instead of conventional white light in the six species of vegetables tested, a significant average increase in quality of 28 and 20% was observed under low light intensity (approximately $50\text{-}80\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$) and high intensity (approximately $90\text{-}120\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$), respectively. The improvement of the spectral quality was greater at low intensity.

When the two spectra are compared with each other, the treatment with better spectral quality showed a great variability in the production increase of the lettuce cultivars. Except for one cultivar (iceberg), the improvement of the spectral quality was at least 30%, reaching values that range from 45 to 60% for high and low intensities, respectively.

Regarding nitrate content, when the light intensity was increased, the species cultivated with white LEDs showed a decrease, with the exception of one species (beetroot); the average nitrate content reduction was 18%, ranging from 7 to 42%, with spinach obtaining the greatest decrease. In species grown under a specific spectrum, the average decrease when the intensity was increased was 45%, although this decrease was only observed in three of the six species evaluated (lettuce, spinach and radish); the values ranged from 17 to 70%, with spinach showing the maximum decrease. Within the species, the specific spectrum decreased the nitrate content by 27%, whereas the white LEDs decreased the nitrate content by 14%.

The specific spectrum treatment at a low intensity and high intensity resulted in a significant decrease in the nitrate content (18 and 35%, respectively) for the species. Within the varieties of lettuce, a significant decrease in the nitrate content of 10% and 21% was observed at the low and high light intensity, respectively. This same spectrum also showed the greatest decreases in nitrate content from low to high intensity of 45 and 27% for all species and within one of them, respectively. Escarole was the species with the greatest decrease in nitrate levels at low intensity (23%) under a photosynthetic spectrum, and at high intensity, spinach contained 47% less nitrate than spinach grown under white LEDs.

8.4 Chapter 4

The AP673L spectrum is recommended for the hydroponic green fodder production of the three fodder species tested.

Using LED lighting with specific spectra for the production of hydroponic green fodder benefits productivity and increases water and energy-use efficiency as well as enhancing the conversion of seeds to fodder in the three fodder species tested.

The use of specific spectra with an R:FR ratio of 3.11 and 7.60 decreases nitrate accumulation thus benefitting human and animal health as well as increasing the yield in both fresh and dry matter.

8.5 General Conclusion

Adjusting the spectra to an intensity similar to that coming from light-emitting diode (LED) technology leads to improved food productivity and phytochemistry.

In future, the quantity and homogeneity of nutraceuticals can be determined and chosen for different cultivars according to their intended purpose, i.e. environmentally sustainable lighting technology will allow us to modulate the nature and healthy contents of sustainable agricultural products.

9. Apéndice

9.1 CHAPTER 1

HORTSCIENCE 51(3):268–271. 2016.

Effect of the Spectral Quality and Intensity of Light-emitting Diodes on Several Horticultural Crops

Miguel Urrestarazu¹

Departamento de Agronomía, Universidad de Almería, Almería, Spain; and Universidad de Tarapacá, Arica, Chile

Cinthia Nájera

Centro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (BITAL), Universidad de Almería, Almería, Spain

María del Mar Gea

Departamento de Agronomía, Universidad de Almería, Almería, Spain

Additional index words. tomato, sweet pepper, lettuce, photosynthesis, LEDs, light intensity, young plant

Abstract. Light-emitting diode (LED) lamps signify one of the most important advances in artificial lighting for horticulture over the last few decades. The objective of this study was to compare the cultivation of four horticultural plants using a conventional white LED tube (T0) light against one with a good spectral fit to the maximum photosynthetic response (T1) at two intensities. The experiment was carried out with two types of young lettuce, tomato, and bell pepper plants. In a controlled environment chamber, six and four lamps per square meter were used to achieve high (H) and low (L) intensity, respectively. We measured the lighting parameters illuminance (lux) and photosynthetic photon flux (PPF) intensity ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). The dry and fresh weight, leaf area (LA), and specific index were measured to gauge plant growth. The photosynthetic activity and energy efficiency (EE) were recorded for each species over 60 days of cultivation. The results clearly demonstrate that, compared with conventional LED lamps, the specific horticultural LED lamps with an improved light spectrum increased the EE of the evaluated vegetables by 26%. At both the studied light intensities, plant growth was clearly more closely linked to the spectral fit of the light to the maximum photosynthetic response recorded by McCree (1972) than to PPF or illuminance (lux). We therefore suggest that a specific, detailed spectral distribution study be conducted to predict the effect of the specific quantity and quality of light used in this study on a single parameter of plant growth.

9.1.1 Introduction

As a primary source of energy, light is one of the most important environmental factors for plant growth (Naoya et al., 2008).

Fluorescent lamps are widely used in horticulture, particularly in *in vitro* culture. However, LED lighting systems have several beneficial properties, including their spectral composition, durability, long operating lifetime, wavelength specificity, relatively cool emitting surface, and high EE. Therefore, LED lighting is both energy efficient and beneficial to plants (Massa et al., 2008; Li et al., 2013; Huimin et al., 2013; Urrestarazu, 2013; Ouzounis et al., 2015). Morrow (2008) suggests that solid-state lighting LED is one of the leading advancements in horticultural lighting in the last decade.

Light intensity is one of the most important environmental factors for plant growth (Naoya et al., 2008). In contrast with high light intensity light, low intensity light is frequently reported as a factor for photoinhibition (Long et al., 1994). In addition, the effect of low light levels on plant growth and photomorphogenesis is well known; for example, they can lead to increased specific leaf area (SLA) and plant height (Steinger et al., 2003; Fan et al., 2013).

In photosynthetic photon flux (PPF), blue and red light has approximately 90% absorption, and green light has 70 to 80% absorption (Terashima et al., 2009). The proportions of both red and blue light PPF have been studied by several authors (Li et al., 2013). Johkan et al. (2012) suggest that high-intensity green LED light promotes lettuce growth, and in particular, short-wavelength green light (510 nm) is available for active plant growth.

On the other hand, the use of illuminance, a measure of radiation expressed as the photosynthetic photon flux intensity from 380 to 780 nm (the photosynthetic radiation spectrum, PAR), is often used in horticulture for determining the sufficiency of light intensity for proper plant cultivation. Multiple studies have been conducted with blue and red light (e.g. Fan et al., 2013), with different combinations of them (e.g. Li et al., 2013) and with the addition of a very specific section of the green spectrum (Johnkan et al., 2012). Little information on continuous-spectrum LED lamps fit to a theoretical model of the maximum photosynthetic response has been recorded since McCree's experiments on cultivated plants (1972).

The objective of this study was to evaluate the agronomy and energy efficiency of LED lamps manufactured for horticultural use with a continuous spectrum fit to the maximum photosynthetic response versus conventional white lighting at two different light intensities.

9.1.2 Materials and Methods

9.1.2.1 Plant material and growth conditions.

The experiment was carried out at the University of Almeria (Spain) in an 1800 mm wide × 800 mm deep × 2200 mm high growth chamber. The light racks were spaced 50 cm apart, and the plants were exposed to a 16/8 h photoperiod (day/night) at a temperature of 28 to 18 °C (day/night) and 85 to 80% relative humidity. Lettuce (cv. Astorga and cv. Cervantes), tomato (cv. Simona), and pepper (cv. Dulce italiano) plants with six true leaves were transplanted to a 0.750 mL pot containing coir substrate. The physical characteristics of the coir substrate have been previously described by Morales and Urrestarazu (2014). The fertigation was replenished if 10% of the readily available water was consumed (Urrestarazu, 2004; Rodríguez et al., 2014). The nutrient solution used was similar to that recommended by Sonneveld and Straver (1994).

Five plants per species and five cultivars per replicate were considered after 35 days of treatment. The total leaf area (LA) was determined using the AM350 portable leaf area meter (ADC BioScientific Limited, Hertfordshire, United Kingdom). The plants were separated into leaves, stems and roots, immediately weighed to determine their fresh weight, dried at 75 °C for 48 h and re-weighed.

The specific leaf area of each young plant was measured using the following equation:

$$\text{Specific leaf area (SLA)} = \frac{\text{Leaf area (LA)}}{\text{Leaf dry weight}} \quad (1)$$

9.1.2.2 Net photosynthesis rate (P_n) and energy efficiency.

The net photosynthesis rate (P_n) was measured using the LCI Portable Photosynthesis System (ADC BioScientific Limited, Hertfordshire, United Kingdom). The objective was to monitor the environment and measure the plants photosynthetic activity. The LCI system can measure within the intervals of 0 to 2000 ppm (CO₂) and 0 to 75 mbar (H₂O) with a precision of ± 2%. The P_n experiment was repeated 12 and 33 days post treatment. Five

measurements per treatment, species and cultivar were conducted on completely expanded mid leaf blades.

The parameter efficiencies were determined using the following equation:

$$\text{Electric Energy efficiency (EE)} = \frac{\text{Dry weight}}{\text{Electric power consumed by LEDs}} \quad (2)$$

9.1.2.3 Treatment, LED devices and light intensities.

Two photosynthetic photon flux density (PPF) intensities, low (L) and High (H), were tested using two types of LED lamps. The L and H intensities consisted of four and six lamps per square metre, respectively. The resulting light data are shown in Table 1. Three replicate measurements were taken of the spectral scan LED light 20 cm below the panel where the plants were grown. The HD 2302.0 LightMeter (Delta OHM®, Veneto, Italy) was used to measure the quantitative light. The LP 471 PAR and LP 471 PHOT quantum radiometric probes were used to measure the photon flux intensity density ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and illuminance (Lux), respectively.

Two types of 18 W light emitting diode (LED) lamp tubes were used. L18 T8 Roblan® (Toledo, Spain) was used as a control (T0), and L18 EU AP67 Valoya® (Helsinki, Finland), an agronomic LED Tube (T1) made for horticultural growth, was evaluated as the test group. The light spectra of T0 and T1 are shown in Fig. 1A and B and were recorded with the UPRtek MK 350S LED Meter (Miaoli County 35059, Taiwan).

To calculate the percentage of the potentially useful photons available for photosynthesis, a proportional integral between 350 and 750 nm was established. The values reported by McCree (1972) (Fig. 1D) were used as the optimal values of photosynthetic spectral efficiency (MSE), and we consider the values of McCree to be maximal and equal to 100% using the following formula:

$$\text{MSE} = \int_{350}^{725} f(x)dx \quad (3)$$

$$\text{MSE} \cong \sum_{i=1}^n \frac{h(f(x_{i+1}) + f(x_i))}{2} \quad (4)$$

where $n = 15$, from McCree's experimental data (1972), $h = 25$, the nm range of the experimental data from McCree, $x_1 = 350$ nm and $y_{x_n} = 725$ nm.

9.1.2.4 Statistical analysis

A randomized complete block design was implemented. For each treatment, species and cultivar, four blocks of five plants per block were constructed. The mean data were analysed at different levels of significance. The data were subjected to analysis of variance, and their means were compared by a Tukey test using Statgraphics Centurion® 16.1.15 and Microsoft Office 2010.

Table 1. Light data with two LED lamps and light intensities [4 (L) and 6 (H), unit m^{-2}] and electric energy expenditure (kWh m^{-2}).

Light treatment	LED lamp type	PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Illuminance (lux)
T0	L	L18 T8 Roblan	$85 \pm 5^*$
	H	L18 T8 Roblan	117 ± 9
T1	L	L18 AP67 Valoya	52 ± 3
	H	L18 AP67 Valoya	95 ± 7

L = low intensity; H = high intensity; PPF = photosynthetic photon flux.

*Values represent the mean of three replicates.

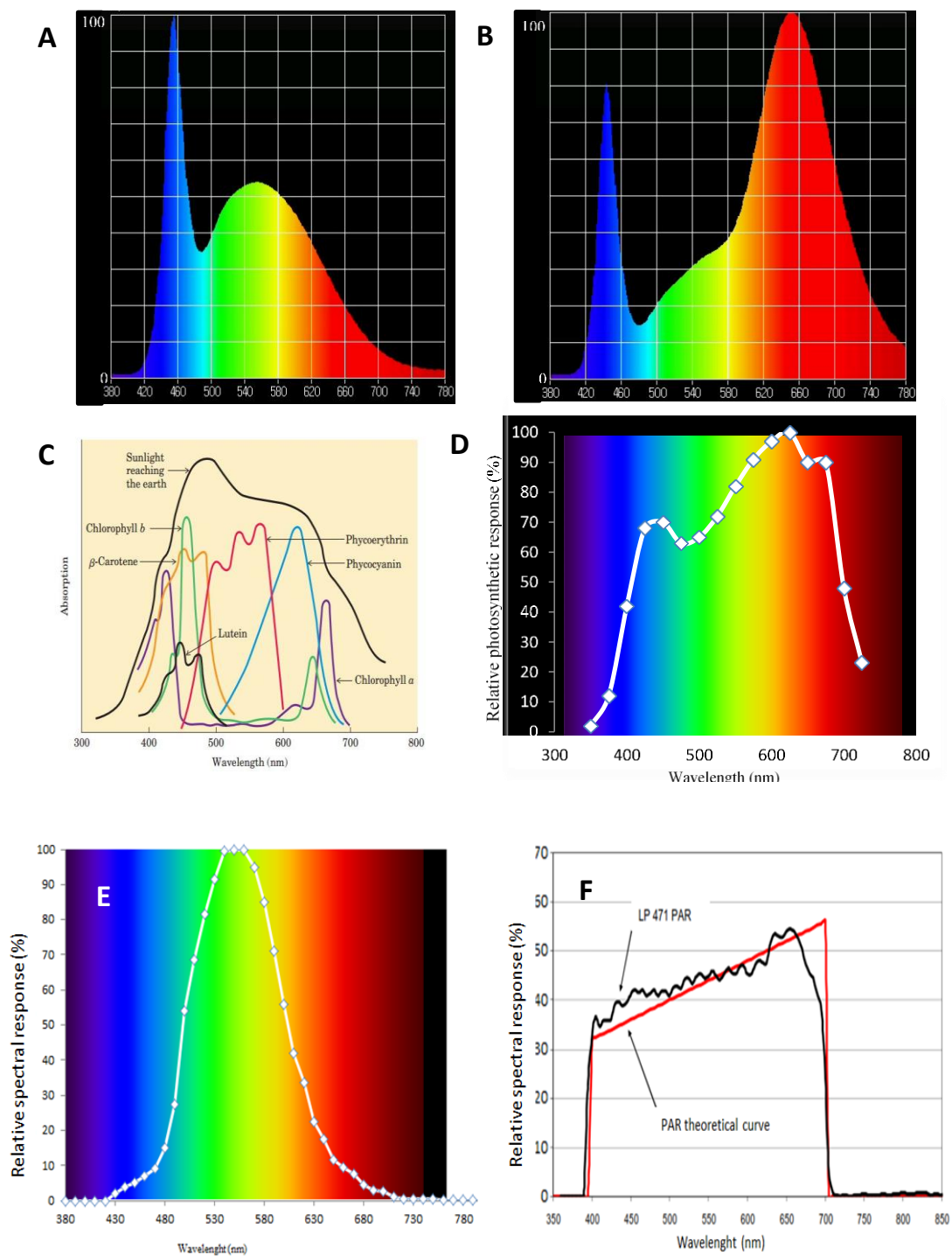


Fig. 1. LED-specific spectra. (A) Spectral photon flux distributions for 380 to 780 nm lighting treatment for the white LED lamps used as a control and (B) the LEDs specifically designed for agricultural use. (C) Absorbance of different pigments by Nelson and Cox (2013). (D). The relative photosynthetic response by McCree (1972). (E) Relative spectral sensibility measured with the LP 471 PHOT by Delta Ohm®. (F). Relative spectral sensibility measured with the LP 471 PAR by Delta Ohm®.

9.1.3 Results and Discussion

9.1.3.1 Effect of light quality on light parameters

Given identical energy consumption and an equivalent number of LED lamps per area, there was substantial variation in both illuminance (lux) and PPF ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (Table 1). Compared with the T0 plants, the T1 plants exhibited a significant 37% and 39% decline in illuminance and PPF (PAR), respectively.

Fig. 1 shows the spectral photon flux distributions for the 380 to 780 nm lighting treatments. The T1 lamps exhibited a closer fit to the photosynthetic efficiency curve. We obtained MSE values of 1, 0.47 and 0.64 for McCree (1972), T0 and T1, respectively.

9.1.3.2 Effect of light quality on the parameter of plant growth.

In all cases, with the exception of the roots of the lettuce 1 and 2 cultivars, significantly or highly significantly higher vegetative growth was found with increased light intensity (Table 2).

The spectrum of the LED lamps caused an important and significant effect on the majority of the growth parameters of the four species: the light treatment with a closer spectral fit to the highest photosynthetic response (T1) was more conducive to growth. Only in the roots of the plants was there no clear and significant effect in this regard. Although the illuminance and PPF were noticeably higher in T0 than T1, the plant growth parameter values of T0 were not higher than T1 in any of the four species. Lettuce 1 had the highest significant mean increase in total biomass (fresh and dry weight, greater than 100%), and the average increase in dry biomass was 57%.

The correlation between vegetative growth and illuminance and PAR (Table 1) was unclear, which corroborates the findings of Barnes et al. (1993), who reported on two necessary measures for photosynthetically active radiation: 1) photosynthetic photon flux, which assigns values to all photons from 400 to 700 nm, and 2) yield photon flux, which weights photons in the approximate range of 360 to 760 nm according to the photosynthetic response of the plant.

The average photosynthetic responses of crop plants reported by McCree in 1972 (including tomato and lettuce) are shown in Fig. 1D. The closer spectral fit of T1, particularly between 580 and 710 nm (Fig. 1B), might explain its improved results over T0, i.e., a significant reduction in PPF after 580 nm. However, the MSE values of 47% and 65%,

associated with the T0 and T1 spectra with the best fit to the maximum photosynthetic response, more closely fit the higher growth of T1 than T0. In lettuce, even small spectral changes (from 500 to 530 nm) in LED lamps vary the behaviour of vegetative growth in comparison to white fluorescent lamps (Johkan et al., 2012).

With the exception of pepper in T1, the leaf area significantly or highly significantly increased when the light intensity was increased (Table 3). However, while the significant mean increase was 36% for T0, it was 113% for T1. The greatest increase in leaf area due to increased light intensity was occurred during treatment T1 with tomato seedlings (170%). With the exception of tomato grown at low light intensity, the effect of the spectrum of the LED lamps in T1 on leaf area was a mean 57% and 63% increase for low and high light intensity, respectively.

The studies of Johkan et al. (2012) found no major differences in the leaf area of young tomato plants using various spectra when they used a PPF of $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, whereas we recorded a considerable spectral effect in T1 versus T0 (with the exception of tomato in treatment L). This may be due to the closer spectral fit between 580 and 710 nm, or the closer overall fit of any of the spectra to the maximum photosynthetic response. It is noteworthy to mention that Li et al. (2013) obtained improved results using a combination of red and blue LEDs over white fluorescent lamps.

With the exception of the tomato cultivars of T1, a clear and significant decrease in the specific leaf area (SLA) was associated with an increase in light intensity. This SLA decrease was also reported to be in the range of 50 to 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ in young tomato plants by Fan et al. (2013), who used blue and red LEDs; they also suggested that SLA always decreased, which may have reduced the absorption of light energy. In the present study, the effect of the spectrum on SLA did not show a clear trend: its increased SLA in lettuce 2 and pepper, decreased SLA in tomato at low light intensity, and had no effect on lettuce 1 and tomato SLA under high lighting conditions.

Table 2. Effect of the light intensity and spectral composition on growth parameters of four vegetables. T0 is white light LED and T1 is specific spectrum LED for horticultural crop.

		Fresh weight (g plant ⁻¹)											
		Total			Root			Stem			Leaves		
		T0	T1	<i>P</i> values	T0	T1	<i>P</i> values	T0	T1	<i>P</i> values	T0	T1	<i>P</i> values
Lettuce 1	L	4.52	5.53	ns	0.70	0.76	ns				3.82	4.77	***
	H	5.20	10.43	***	0.55	0.69	***				4.65	9.74	***
<i>P</i> values		**	*		*	ns					***	***	
Lettuce 2	L	7.62	9.42	***	0.40	0.32	ns				7.22	9.15	***
	H	17.92	19.07	ns	0.81	0.83	ns				17.11	18.24	ns
<i>P</i> values		***	***		***	***					***	***	
Tomato	L	4.24	4.71	ns	0.72	0.74	ns	1.34	1.57	***	2.18	2.40	ns
	H	8.61	14.41	***	1.54	2.33	***	3.05	5.94	***	4.01	6.14	***
<i>P</i> values		***	***		***	***		***	***		***	***	
Pepper	L	5.69	7.86	***	0.37	0.88	***	1.63	2.11	***	3.69	4.88	***
	H	11.72	12.87	ns	1.42	1.23	ns	2.71	3.68	***	7.58	7.96	ns
<i>P</i> values		***	***		***	**		***	***		***	***	
		Dry weight (g plant ⁻¹)											
Lettuce 1	L	1.33	1.95	**	0.28	0.32	*				1.05	1.63	***
	H	2.13	3.27	**	0.51	0.42	ns				1.62	2.89	**
<i>P</i> values		**	*		***	ns					*	***	
Lettuce 2	L	2.18	1.65	ns	0.34	0.26	ns				1.84	1.52	ns
	H	3.60	3.93	ns	0.25	0.36	ns				3.34	3.58	ns
<i>P</i> values		**	*		ns	*					**	**	
Tomato	L	2.05	2.50	*	0.51	0.64	ns	0.38	0.55	**	1.16	1.31	*
	H	4.15	6.88	**	0.79	1.32	**	1.12	2.26	***	2.24	3.30	***
<i>P</i> values		***	***		***	***		***	***		***	***	
Pepper	L	2.55	3.23	*	0.34	0.48	ns	0.55	0.73	*	1.65	2.02	*
	H	5.00	6.30	*	0.67	0.88	ns	1.00	1.53	*	3.34	3.89	*
<i>P</i> values		*	**		*	**		*	**		**	**	

*, **, ***, and ns indicate significant differences for row and columns at $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$ and no significant, respectively. n=4

L = low intensity; H = high intensity

Table 3. Effect of the light intensity and spectral composition on leaf area growth parameters of four vegetables. T0 is white light LED and T1 is specific spectrum LED for horticultural crop.

		Leaf area (cm ² plant ⁻¹)			Specific leaf area (cm ² g ⁻¹ DW)		
		T0	T1	<i>P</i> values	T0	T1	<i>P</i> values
Lettuce 1	L	30.44	41.72	**	22.89	21.40	ns
	H	38.00	70.45	***	14.27	11.27	ns
<i>P</i> values		**	***		***	***	
Lettuce 2	L	30.36	36.88	*	17.41	42.82	***
	H	46.54	71.55	***	12.94	18.20	**
<i>P</i> values		**	***		**	***	
Tomato	L	33.14	26.62	ns	16.21	10.67	*
	H	46.79	73.42	***	11.29	10.68	ns
<i>P</i> values		***	***		**	ns	
Pepper	L	34.91	74.50	***	13.70	23.16	***
	H	44.14	68.73	***	8.83	10.92	*
<i>P</i> values		***	ns		***	***	

*, **, ***, and ns indicate significant differences for row and columns at $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$ and no significant, respectively. n=4

L = low intensity; H = high intensity

9.1.3.3 Effect of light quality on net photosynthetic rate and energy efficiency

All the net photosynthesis (P_n) measurements increased significantly in T1 with increasing light intensity; however, this effect was less clear for white LED lamps (T0) (Table 4). In the T0 lettuce 1 and pepper plants, no differences were found in P_n compared with lettuce 2. Similarly, at the highest light intensity, all the P_n values increased with the treatments in T1 compared with T0, with the exception of lettuce 2. In contrast, at the lowest light intensity, only the young tomato plants were affected by the T1 treatments. Fan et al. (2013) also reported a P_n increase in the range of 50 to 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Again, the improvements associated with the spectra in T1 versus T0 might be justified by the distribution of the T1 spectra, which leads to a greater photosynthetic response.

With the exception of T0 and lettuce 1, increasing the light intensity with LED lamps always significantly or highly significantly increased the energy efficiency (EE). Although it varied proportionally for each species, the mean significant EE of the four horticultural species for T1 was 4 g higher dry matter per-kW of energy consumed than T0, which represents a 26% increase in significant average efficiency.

The significant average increases in EE of the four species under increased light intensity were 67% and 76% for T0 and T1, respectively, while within the L and H intensities, the comparable EE increases were 28% and 44%, respectively. The improvements of LED over

conventional spectra are likely due to the closer fit of their PAR spectrum to the spectrum of the maximum photosynthetic response recorded by McCree (1972).

Our results are in agreement with those of Fan et al. (2013), who found that energy efficiency increased by 50% from 50 to 150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ but decreased above 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Table 4. Effect of the light intensity and spectral composition on photosynthesis (P_n) and energy efficiency (EE) of four vegetables. T0 is white light LED and T1 is specific spectrum LED for horticultural crop.

		P_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			EE (g kW^{-1})		
		T0	T1	P values	T0	T1	P values
Lettuce 1	Low	0.90	0.94	ns	10.63	13.27	*
	High	0.89	1.15	*	10.34	21.68	***
P values		ns	*		ns	***	
Lettuce 2	Low	1.39	1.58	ns	20.08	25.47	*
	High	2.36	2.45	ns	38.08	40.61	ns
P values		***	**		**	***	
Tomato	Low	0.48	1.07	***	6.06	6.68	ns
	High	1.08	1.27	*	8.92	13.67	***
P values		**	*		**	***	
Pepper	Low	1.97	1.63	ns	10.26	13.57	*
	High	1.56	2.74	***	16.88	17.72	ns
P values		ns	***		**	**	

*, **, ***, and ns indicate significant differences for row and columns at $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$, $P \leq 0.001$ and no significant, respectively. $n=4$

9.1.4 Literature Cited

- Barnes, C., T. Tibbitts, J. Sager, G. Deitzer, D. Bubenheim, G. Koerner, B. Bugbee. 1993. Accuracy of Quantum Sensors Measuring Yield Photon Flux and Photosynthetic Photon Flux. *HortScience* 28:1197-1200.
- Fan, X.X., Z.G. Xu, X.Y. Liu, C.M. Tang, L.W. Wang, X.I. Han. 2013. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Sci Hortic* 153:50-55.
- Huimin, L., T. Canming, X. Zhigang. 2013. The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis *in vitro*. *Sci Hortic* 150:117-124.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, T. Yoshihara. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ Exp Bot* 75:128-133.

- Li, H., C. Tang, Z. Xu. 2013. The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis *in vitro*. *Sci Hortic* 150:117-124.
- Long, S.P., S. Humphries, P.G. Falkowski. 1994. Photoinhibition of photosynthesis in nature. *J. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 45:633-662.
- Massa, G. D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43:1951-1956.
- McCree, K.J. 1972. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9:191-216.
- Morales, I. and M. Urrestarazu. 2014. Effect of a passive mixing device on the electrical conductivity and pH values of a nutrient solution. *J. Irrig. Drain. E-Asce.* 140: 04013022.
- Morrow, R.C. 2008. LED lighting in horticulture. *HortScience* 43:1947-1950.
- Naoya, F., F. Mitsuko, O. Yoshitaka, S. Sadanori, N. Shigeo, E. Hiroshi. 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *J. Sci. Hortic.* 115:176-182.
- Nelson, D.L. and M.M. Cox. 2013. *Lehninger, principles of biochemistry.* 6th ed. W.H. Freeman y Co., New York.
- Ouzounis, T., E. Rosenqvist, C.O. Ottosen. 2015. Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *HortScience* 50:1128-1135.
- Rodríguez, E., J. Reça, J. Martínez, M.T. Lao, M. Urrestarazu. 2014. Effect of controlling the leaching fraction on the fertigation and production of a tomato crop under soilless culture. *Sci Hortic* 179:153-157.
- Sonneveld, C. and N. Straver. 1994. *Voedingsoplossingen voor groenten en bloemen geteeld in water of substraten [Nutrient solutions for vegetables and flower grown in water or substrates].* 10th ed. Proefstation voor Tuinbouw onder Glas, Naaldwijk, Netherlands.
- Statgraphics Centurion X.V.I.I. Statgraphics Net for Windows 7 2018.
- Steinger, T., B.A. Roy, M.L. Stanton. 2003. Evolution in stressful environments II: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis*. *J. Evol. Biol.* 16:313-323.

Terashima, I., T. Fujita, T. Inoue, W.S. Chow, R. Oguchi. 2009. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *J. Plant Cell Physiol.* 50:684-697.

Urrestarazu, M. 2004. *Tratado de cultivo sin suelo*. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.

Urrestarazu, M. 2013. Infrared thermography used to diagnose the effects of salinity in a soilless culture. *Quantitative InfraRed Thermography* 10:1-8.

9.2 CHAPTER 2

Postharvest Biology and Technology 145 (2018) 151–156



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Postharvest Biology and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/postharvbio



LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit

Cinthia Nájera^a, José Luis Guil-Guerrero^b, Lorenzo Jarquín Enríquez^c, Juan Eugenio Álvaro^d, Miguel Urrestarazu^{b,*}



^a Centro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAMBITAL), Universidad de Almería, Almería, Spain

^b Departamento de Agronomía, Universidad de Almería, Almería, Spain

^c Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica de Guanajuato, Guanajuato, Mexico

^d Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Agronomía, Quillota, Chile

ARTICLE INFO

Keywords:

Cherry tomato
Redondo tomato
Light spectrum
Lycopene
Colour
Far red light
Solanum lycopersicum

ABSTRACT

Tomato fruit possess high lycopene concentrations, which increases after reaching the breaker stage of ripeness. Light emitting diode (LED) systems have emerged as a clean and efficient artificial lighting technique for use in horticulture. The objective of this research was to examine the effect of LEDs on postharvest and lycopene quality parameters. The effects on quality parameters were significantly different depending on the tomato fruit cultivar. The commercial and organoleptic quality parameters most affected were firmness and titratable acidity. The lycopene concentration in all tomato cultivars increased between 30% and 60% when they were exposed to LED light compared with dark-exposed fruit. One hour of LED light exposure per day during the postharvest phase of fruit increased commercial and organoleptic parameters, and increased the lycopene concentration. Fruit exposed to LED light with a high red:far red (R:FR) light ratio had increased firmness compared with those exposed to other types of white LED light. The highest R:FR ratio used in this study resulted in fruit with higher titratable acidity than those exposed to lower R:FR ratios. Overall, the results of this study demonstrated that the postharvest exposure of tomato fruit to LED light with a high R:FR ratio induces lycopene synthesis, with lycopene concentrations being 41% higher in comparison with exposure to darkness and 24% higher in comparison with exposure to other LED lighting conditions.

9.2.1 Introduction

Interest in food and human health has increased, especially in terms of the consumption of added-value vegetables containing anti-carcinogens such as antioxidants, carotenoids and vitamins (Dhandevi and Rajesh, 2015). Carotenoids are an important part of the human diet (Krinsky and Johnson, 2005), as they provide resources for the formation of vitamin A. As such, carotenoids are an essential component and precursor of volatiles in plants (Vogel et al., 2010). In addition to their antioxidant function, carotenoids provide the tomato fruit with its distinctive colour and contribute to its nutritional quality (Shao et al., 2015). Furthermore, epidemiological studies have shown that the consumption of foods rich in lycopene help prevent cardiovascular diseases (Müller et al., 2016) and several types of cancer (Giovannucci, 1999; Sandmann et al., 2006; Ford and Erdman, 2012).

The tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is a climacteric fruit and continues to ripen after harvest. During ripening, chlorophylls are degraded, while carotenoids are synthesized (Liu et al., 2009). Lycopene concentrations, the primary antioxidant in tomatoes, increase after reaching the breaker stage of ripeness (Liu et al., 2009) or when changing maturation states (defined by the USDA (2005) ripeness scale) during its ripening process (Davies and Hobson, 1981). This phenomenon indicates light will have a significant effect on the synthesis of lycopene. The development of tomato antioxidants depends on genetic and environmental factors and their stage of ripeness (Javanmardi and Kubota, 2006).

Light plays a role in the evolution of the colour of tomatoes after harvest as it affects the metabolism of pathways involved in biosynthesis of pigments. Particularities of the light spectrum affect the pigments synthesized, which play a decisive role on the shelf lives of tomatoes. For example, the relationship between red light and blue light has a significant effect on the pigmentation of tomatoes (Azari et al., 2010; Toledo-Ortiz et al., 2010; Li et al., 2013). Current postharvest work (Moya et al., 2017) consists of three basic objectives related to market acceptance, which include maintaining the following factors: 1) high commercial quality of the fruit (firmness, size and colour); 2) high nutritional quality (lycopene, ascorbic acid, antioxidant activity and total phenol content); and 3) desirable organoleptic properties (titratable acidity, pH, electrical conductivity and total soluble solids). Achieving these objectives includes optimizing temperature, relative humidity, oxygen and carbon dioxide concentrations and, in some cases, ethylene concentrations (Kader and Rolle, 2004; D'Souza et al., 2015). Postharvest studies are usually performed in the dark, where lycopene continues to increase because of the presence of phytochromes in

the pericarp of tomatoes (Alba et al., 2000; Demotes-Mainard et al., 2016) and cryptochromes (Giliberto et al., 2005). The storage temperature of the fruit is another important factor (Toledo-Ortiz et al., 2010). Toor and Savage (2006) obtained a threefold higher lycopene content in fruit stored at a temperature range of 15-25 °C than those stored at 7 °C, a temperature commonly used for tomato.

Toledo-Ortiz et al. (2010), and Toor and Savage (2006), have found that light (Naoya et al., 2008) and temperature affect lycopene synthesis in addition to other postharvest quality parameters, including colour, soluble solids, titratable acidity and texture. Therefore, designing an efficient system of artificial growth to feed a constantly growing population while simultaneously meeting the food demands of having high nutritional quality that provides health benefits is possible (Darko et al., 2014).

The integration of light emitting diodes (LEDs) in horticultural lighting systems has increased over the last decade (Morrow, 2008; Urrestarazu et al., 2016). Unlike other conventional lighting systems, LEDs are being developed with technology that allows for the design of specific spectra, direction and light intensity (Massa et al., 2008). LEDs are also being developed as components of lighting systems that exhibit an energy efficiency ratio that is associated with increased plant growth (Toledo-Ortiz et al., 2010; Urrestarazu et al., 2016; Massa et al., 2008; Ouzounis et al., 2015).

Information concerning the effects of the use of LED lamps on certain aspects of horticulture, especially on the influence of the LED spectrum on the development of anticancer nutritional quality (Urrestarazu et al., 2016) is limited. The objective of this work was to evaluate the light spectra of three different types of LED lamps on the organoleptic, commercial and dietary qualities of tomato fruit during the postharvest stage of six cultivars.

9.2.2 Materials and methods

9.2.2.1 Plant materials and growth conditions

The experiment was conducted at the University of Almería. Tomato fruit (*Solanum lycopersicum* L.) from six different tomato cultivars were used and are denoted as follows: A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Angelle and F = Cherry cv. Santa West. Fruit were obtained from commercial greenhouses located in the region of Almería and were in the ripening stage (USDA, 2005). Rama tomatoes were harvested from the central portion of the branch. The experimental unit comprised four fruit of each cultivar per replication, with a total of four replications. Samples

were taken postharvest on day 6, when the fruits had reached their red ripe ripeness stage (USDA, 2005). The experimental unit of cherry tomatoes comprised 20 fruit of each cultivar per replicate, with a total of four replicates for each treatment. In the study, the fruits were placed calyx end down, and the temperature and relative humidity were maintained at 19 °C and 85%, respectively (Tiwari et al., 2013). Fruit were subjected to LED light for one hour per day.

At the beginning and end of the study, fruit from each replicate (20 and 4 fruits for cherry and big tomato, respectively) were crushed in a blender to measure their colour, texture, total soluble solids (TSS), titratable acidity and lycopene content. HPLC-mass spectrometry was used to determine their lycopene concentration (Guil-Guerrero and Reboloso-Fuentes, 2009).

9.2.2.2 Exposure to LED light

Fruit were placed under LED lights 20 cm away, except for the control treatment (T0), in which fruit were kept in darkness. The LED lighting treatments consisted of exposure to four lamps m^{-2} and are denoted as follows: T1 = L18 T8 Roblan[®], T2 = L18 AP67 Valoya[®] and T3 = L18 AP673 L Valoya[®].

The spectra of illumination treatments (Fig. 1) were obtained with an LED meter (UPRTek MK350S, Miaoli County, Taiwan). The quantitative light intensity parameters were obtained with a light meter (HD 2302.0, Delta OHM[®], Veneto, Italy). LP 471 PAR and LP 471 PHOT radiometric sensors were used to measure the photosynthetic photon flux density (PPFD) and illuminance in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and lux, respectively (Table 1). Red:far red (R:FR) light ratios were calculated using the values provided by the illuminator manufacturers.

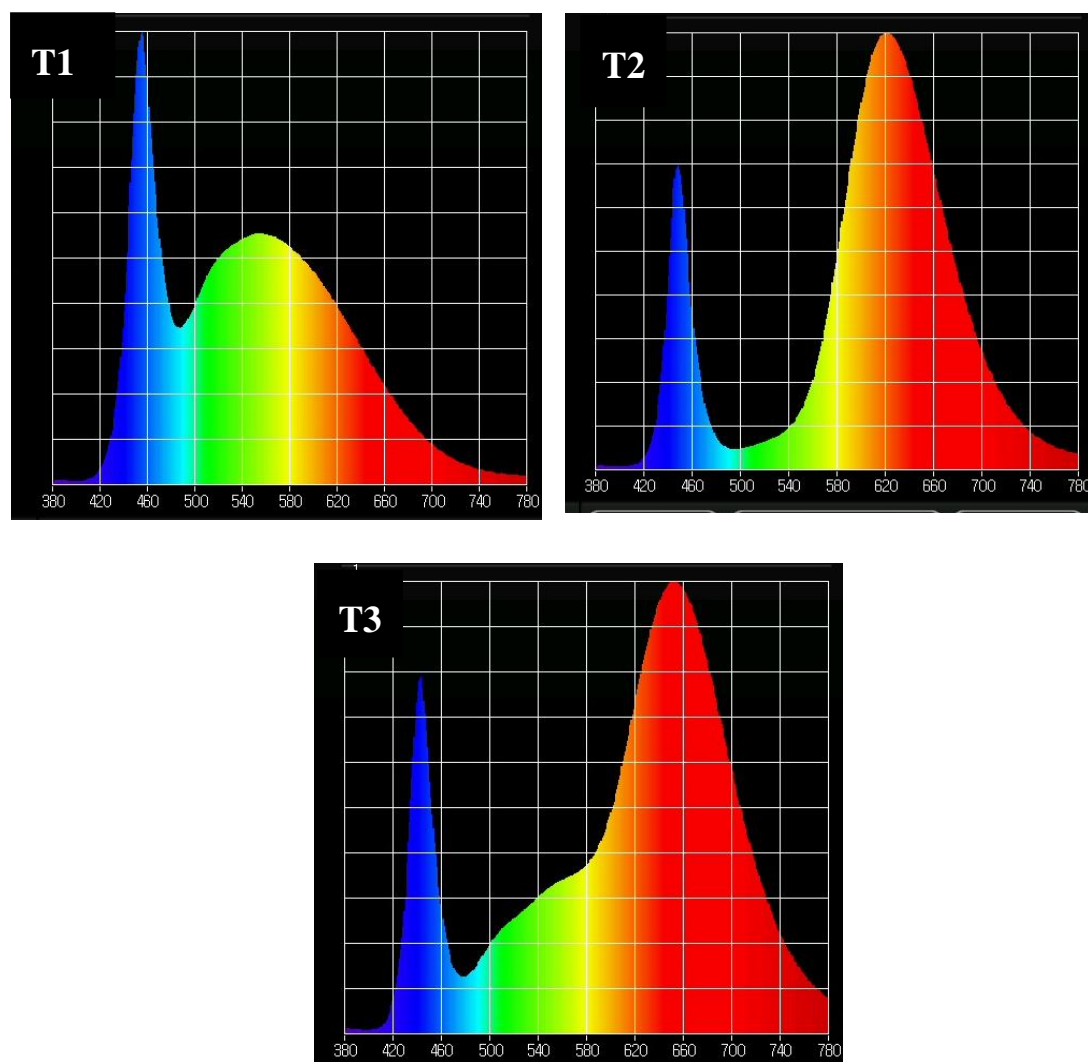


Fig. 1. LED-light spectra. T1 = L18 T8 Roblan[®], T2 = L18 AP67 Valoya[®] and T3 = L18 AP673L Valoya[®].

Table 1. Photosynthetic photon flux density ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), illuminance (lux) and ratio of the LED treatments.

Light treatments	LED lamp type	PPFD	lux	R:FR ratio
T0*	Dark	-	-	-
T1	L18 T8 Roblan [®]	92.60	4181	2.10
T2	L18 AP67 Valoya [®]	64.05	2250	3.11
T3	L18 AP673L Valoya [®]	84.48	2900	7.60

*Control.

PPFD = Photosynthetic photon flux density.

R:FR = Ratio red:far red.

n=4.

9.2.2.3 Commercial quality

Colour was measured with a colorimeter (CM-3500D, Konica Minolta[®], Madrid, Spain) equipped with a 10° observer and D65 light. The lightness (L^*), redness (a^*) and yellowness

(b*) coordinates of the CIE colour space were determined. Seven measurements of each fruit were conducted (two measurements were conducted in the peduncular zone, three measurements were conducted in the equatorial zone, and two measurements were conducted in the distal zone), and average values were calculated. a* and b* values were used to estimate the colour index (a*/b*) (López Camelo and Gómez, 2004; Hyman et al., 2004; Brandt et al., 2006; Helyes and Lugasi, 2006). An FT327 fruit pressure tester (Bertuzzi, Italy) was used for firmness measurements in the equatorial zone.

9.2.2.4 Organoleptic quality

Fruit juices were obtained using an extractor. The TSS (%) was measured with a hand-held refractometer (ATAGO, X-5000i-Plus, Tokyo, Japan). For titratable acidity, 20 mL of the filtered juice was collected under vacuum for subsequent titration with 0.1 N NaOH.

9.2.2.5 Dietary quality of fruit

The extraction of carotenoids was performed via the method described by Wills et al. (1988). First, 50 mL of diethyl ether was added to 25 g of the fresh sample from same juice, and the mixture was stirred for 60 min. The supernatant was then separated by decanting from the solid material, and the process was repeated with 25 mL of diethyl ether and 30 min of agitation. 5 mL of 10% methanolic potassium hydroxide (m/v) was added, and the mixture was incubated for 1 h at 4 °C in the dark. The mixture was then washed with water from the extract until the soaps formed during the previous step were eliminated. Finally, the solvent was evaporated using a rotary evaporator, and the carotenoids were recovered in 3 mL of methyl tert-butyl ether.

The separation and quantification of lycopene were performed by HPLC (Finnigan Surveyor chromatograph, Thermo Electron Corporation, UK) equipped with a reverse phase column (Hypersil Gold, 250mm×4.6mm inner diameter, 5mm particle size) and a UV detector. For separation, isocratic elution with a binary solvent system (acetonitrile-methanol, 85:15, v/v) was used. The flow rate of the mobile phase was 1 mL min⁻¹, the column temperature was 32 °C, and the detection wavelength was 476 nm. The amount of lycopene in each sample was calculated using a standard curve created by measuring known amounts of lycopene (Ishida et al., 2001).

9.2.2.6 Experimental design and statistical analysis

Experiments were performed using a randomized complete block design (Montgomery, 2004). The results were subjected to analysis of variance (ANOVA), a Tukey comparison of

means test ($P \leq 0.05$) and linear and quadratic correlations using the Statgraphics Centurion® XVI.II (2018) statistical package.

9.2.3 Results and discussion

9.2.3.1 Irradiation parameters for illumination

Using the same power consumption ($18 \text{ W} \times \text{lamp}$), use of the T1 lighting treatment resulted in significant increases of 31% and 46% for the PPFd ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and illuminance (lux), respectively, in comparison with the T2 and T3 lighting treatments. Similar results were observed by Urrestarazu et al. (2016) when horticultural lighting was used as opposed to conventional lighting (Table 1).

9.2.3.2 Effects on commercial quality parameters and organoleptic properties

Light affected all quality parameters, except for TSS in “Santa West” (Table 2). The increase in the TSS content was observed only in the Cherry cv. Santa West as also found by Lei et al. (2016). After exposure to light, there was difference in the firmness of “Redondo A” and two cherry-type cultivars (D and F). Except for the Redondo tomato cultivar that had been exposed to darkness, tomatoes exposed to the higher R:FR ratio (T2 and T3) maintained a greater firmness in relation to the T1 or T0 (darkness). Arias et al. (2000) did not observe any changes in firmness under similar conditions, which included exposure of Redondo and pear tomato cultivars to a temperature of $23 \text{ }^\circ\text{C}$ and red-light treatment. In addition, Gergoff et al. (2016) observed no changes in firmness, acidity, TSS or pH in the “Elpida” tomatoes after exposure to white light radiation pulses. Other authors (Lee et al., 1997; Liu et al., 2009) reported results no conclusive, which included softening when tomatoes were stored at $22 \text{ }^\circ\text{C}$ for 6 days and $12\text{-}14 \text{ }^\circ\text{C}$ for 21 days. Except for the rama tomato (C), significant differences in the titratable acidity were observed and depended on the cultivar. However, only the mean values produced clear significant differences and demonstrated the treatment involving exposure to the lamp with the higher R:FR ratio (T3) was most beneficial. Gergoff et al. (2016) observed no changes in the titratable acidity upon exposure to white light radiation pulses. In addition, the mean values of the titratable acidity in our data did not differ with white light (T1) with respect to darkness (T0).

The colour ratio (a^*/b^*) of the tomatoes increased for all cases at 6 days after harvest (Fig. 2). The final values of the colour ratio (a^*/b^*) of the cherry tomatoes (D, E and F) were much lower (by 50%) compared to the Redondo (A), pera (B) and rama (C) cultivars.

Table 2. Quality parameters of six tomato varieties.

Light	Firmness (kg)							Total soluble solids (%)							Titratable acidity (% citric acid)						
	A	B	C	D	E	F	Mean	A	B	C	D	E	F	Mean	A	B	C	D	E	F	Mean
T0	9.3a	7.5a	5.3b	4.9c	4.8a	5.1b	6.2b	4.0a	4.0a	5.0a	6.8a	6.1a	4.0b	5.0a	0.191b	0.151b	0.142a	0.081b	0.031c	0.061b	0.110b
T1	6.2b	8.6a	5.5ab	4.8c	5.1a	4.2c	5.8c	3.5a	3.5a	4.9a	6.2a	6.6a	4.2b	4.8a	0.172bc	0.151b	0.132a	0.070c	0.048a	0.075a	0.108b
T2	8.8a	6.7a	7.9a	6.7a	5.4a	4.3c	6.6a	4.0a	4.2a	4.0a	6.6a	6.5a	4.1b	4.9a	0.132c	0.113b	0.156a	0.099a	0.051a	0.078a	0.105c
T3	6.8b	8.0a	5.8a	6.0 _b	5.4a	6.4a	6.4a	4.0a	3.5a	4.0a	6.5a	6.7a	4.5a	4.9a	0.243a	0.261a	0.143a	0.094ab	0.041b	0.058b	0.140a

Values after six days in which T0 = dark, T1 = L18 T8 Roblan[®], T2 = L18 AP67 Valoya[®] and T3 = L18 AP673L Valoya[®].

A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Bronco, E = Cherry cv. Angelle and F = Cherry cv. Santa West.

Different letters indicate significant differences between treatments at $P \leq 0.05$ using the Tukey test. n=4.

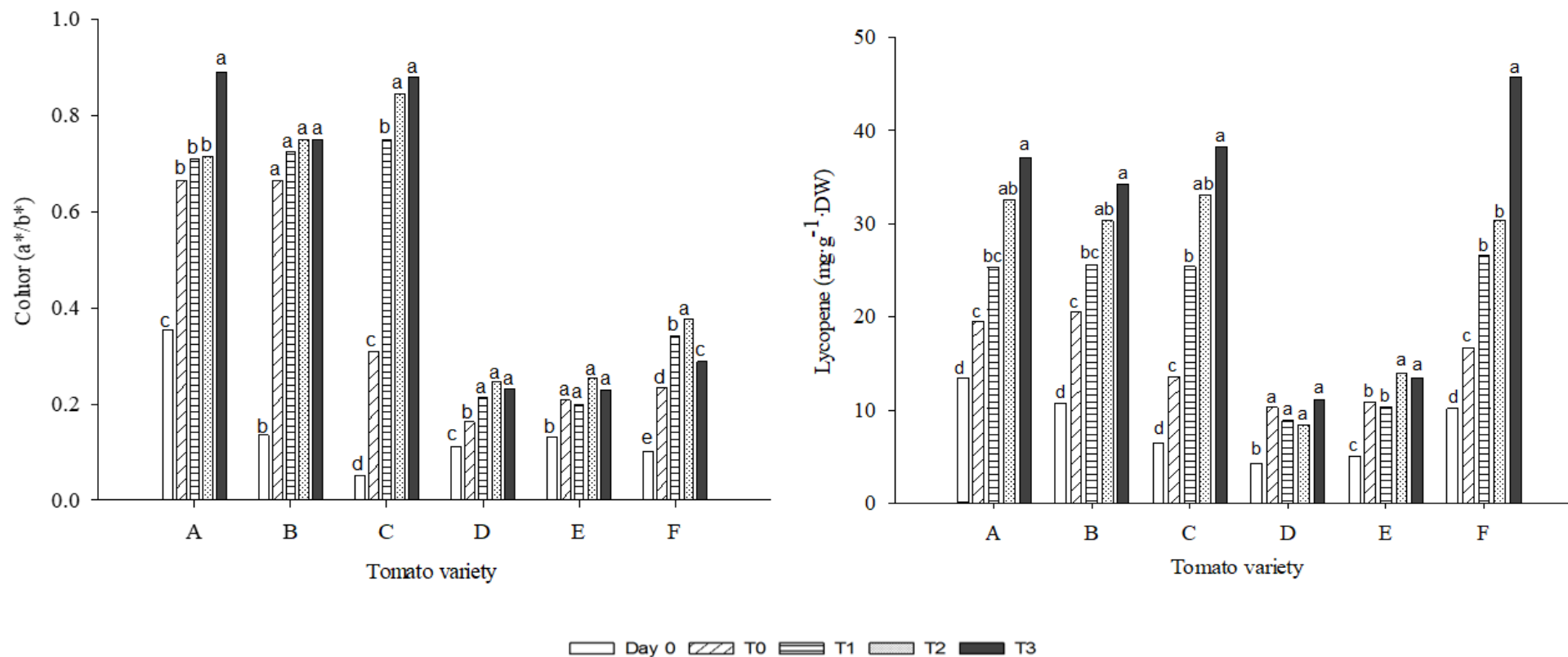


Fig. 2. Postharvest colour and lycopene content of six different tomato varieties exposed to different LED light treatments. Data are from Day 0 and Day 6. Day 6 includes the following conditions: T0 = dark, T1 = L18 T8 Roblan[®], T2 = L18 AP67 Valoya[®] and T3 = L18 AP673L Valoya[®]. A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Bronco, E = Cherry cv. Angelle and F = Cherry cv. Santa West. Different letters indicate a significant difference between the treatments for each variety ($P \leq 0.05$, Tukey test). $n=4$

9.2.3.3 Dietary quality: lycopene

The lycopene content increased for all cultivars and treatments from days 0 to 16. After 6 days in the postharvest chamber, cultivars F and C had the highest lycopene content compared with the control treatment (greater than 60%). The correlation between the lycopene increase and the value of the colour ratio (a^*/b^*) has previously been described (Thomas and Jen, 1975; Alba et al., 2000; Dumas et al., 2002; Gergoff et al., 2016; Lei et al., 2016). However, the F cultivar was the only tomato that did not show a positive correlation between the two factors. Except for cultivar D, all light treatments caused a significant increase in lycopene (between 30% and 45%, depending on the cultivar). Similar data were obtained by D'Souza et al. (1992) and Liu et al. (2009) who refer to the slightly positive correlation of the colour ratio a^*/b^* with respect to the lycopene concentration. The study of Ramos-Bueno et al. (2016) with fruit of the tomato Raf introduced a correlation between the amount of lycopene obtained with colour (as the colour ratio (a^*/b^*) decreases, the lycopene decreases).

These data regarding the increase of lycopenes with the presence of light are coincident with those demonstrated by Dumas et al. (2002) who observed an increase in lycopene with light. Gergoff et al. (2016) also reported an increase in lycopene upon exposure to pulses of nocturnal light.

The spectrum of the lights with a higher proportion of R:FR (T2 and T3) produced a higher proportion of lycopene than the other LED lamp (T1). Thomas and Jen (1975) and Alba et al. (2000) used red LED lamps during the first week of storage obtained via an accumulation of carotenoids in tomato fruits with a red LED and Lei et al. (2016) increased the lycopene content in cherry tomatoes until 20 days.

The higher R:FR (T3) light always increased the presence of lycopene more than the white LED (T1). However, in more than half of the cultivars of tomato fruits used, T2 showed an intermediate behaviour between T3 and T1. Similar results were obtained by Schwend et al. (2016) in which the T3 light increased the antioxidant content in basil and borage.

9.2.3.4 Illumination and lycopene correlation

Little information regarding the quality of light and the proportion of lycopene exists. Our results from the three light parameters evaluated found that the R:FR ratio had the highest significant correlations (Fig. 3). The larger cultivars (A, B and C) showed the lowest

correlations, assuming an average increase of 29% of the highest R:FR ratio compared to the lowest. The effect produced by the R:FR ratio on the cherry tomatoes was not so clear. However, for cultivar F, which obtained the highest significant correlation (greater than 99.9), a lycopene increase of 44% under conditions provided by the highest R:FR ratio (T3 versus T1).

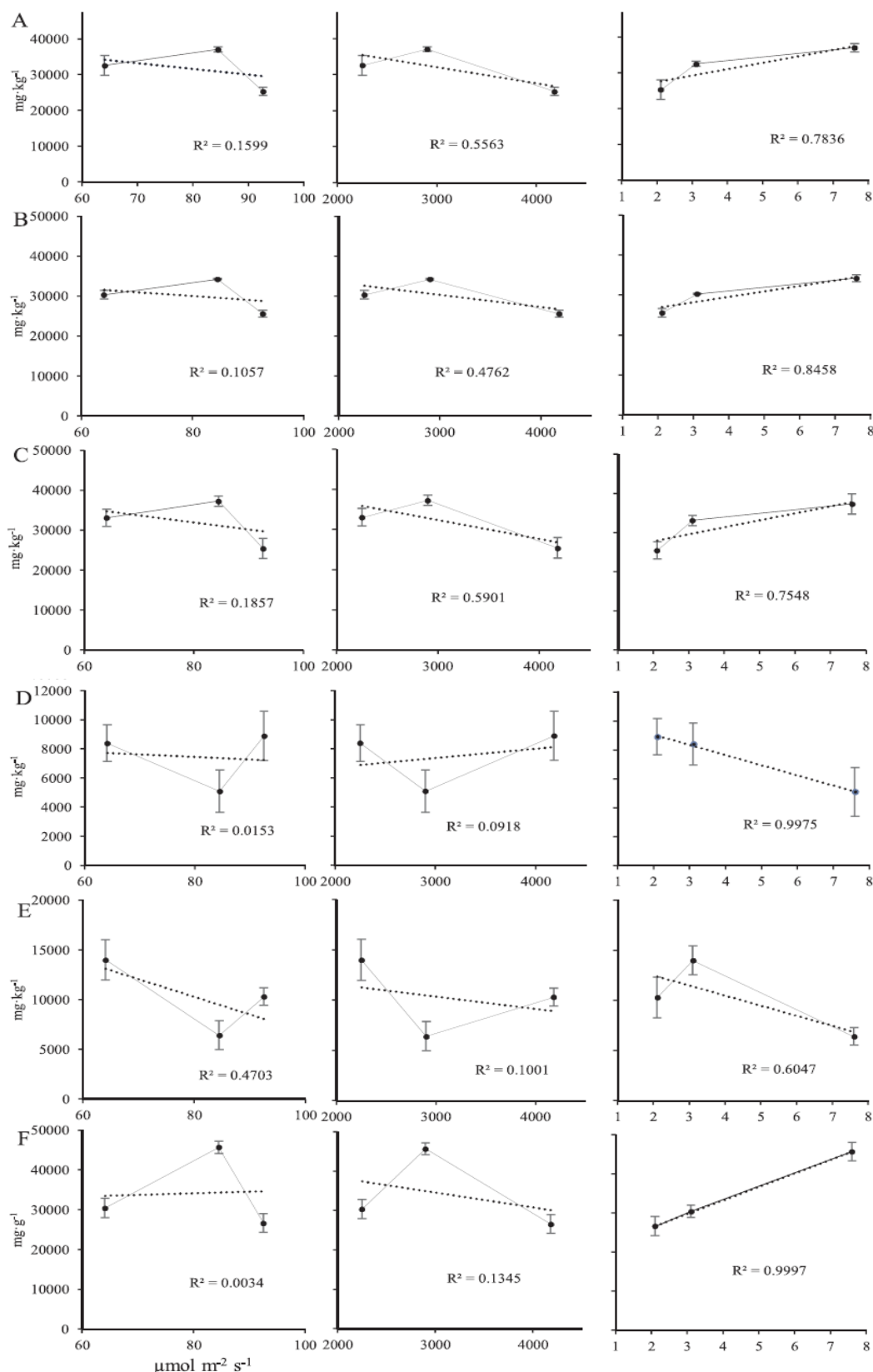


Fig. 3. Relationship between the concentration of lycopene in tomato fruits and the following radiation parameters: photosynthetic photon flux density (PPFD), illuminance (lux) and red:far red ratio (R:FR). A = Redondo cv. Pasadena, B = Pera cv. Fangora, C = Rama cv. Fahara, D = Cherry cv. Bronco, E = Cherry cv. Angelle and F = Cherry cv. Santa West. Vertical bars represent the standard error of the mean. n=4

9.2.4 Literature cited

- Alba, R., M.M. Codonnier-Pratt, L.H. Pratt. 2000. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato. *Plant Physiology* 123:363-370.
- Arias, R., T.C. Lee, D. Specca, H. Janes. 2000. Quality comparison of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) ripened on and off vine. *J. Food Sci.* 65:545-548.
- Azari, R., Y. Tadmor, A. Meir, M. Reuveni, D. Evenor, S. Nahon, I. Levin. 2010. Light signaling genes and their manipulation towards modulation of phytonutrient content in tomato fruits. *Biotechnol. Adv.* 28:108-118.
- Brandt, S., Z. Pék, E. Barna, A. Lugasi, H. Lajos. 2006. Lycopene content and color of ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *J. Sci. Food Agr.* 86:568-572.
- Darko, E., P. Heydarizadeh, B. Schoefs, M.R. Sabzalian. 2014. Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.* 3:369.
- Davies, J.N. and G.E. Hobson. 1981. The constituents of tomato fruit. The influence of environment, nutrition and genotype. *Crit. Rev. Food Sci.* 15:205-280.
- Demotes-Mainard, S., T. Péron, A. Corot, J. Bertheloot, J.L. Gourrierc, S. Pelleschi-Travier, L. Crespel, P. Morel, L. Huché-Thélier, R. Boumaza, A. Vian, V. Guérin, N. Leduc, S. Sakr. 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environ. Exp. Bot.* 121:4-21.
- Dhandevi, P. and J. Rajesh. 2015. Fruit and vegetable intake: Benefits and progress of nutrition education interventions - Narrative Review Article. *Iran J. Public Health* 44:1309-1321.
- D'Souza, M.C., S. Singha, M. Ingle. 1992. Lycopene concentration of tomato fruit can be estimated from chromaticity values. *HortScience* 27:465-466.
- D'Souza, C., H.G. Yuk, G.H. Khoo, W. Zhou. 2015. Application of Light-Emitting Diodes in Food Production, Postharvest Preservation, and Microbiological Food Safety. *Compr. Rev. Food Sci. F.* 14:719-740.

- Dumas, Y., M. Dadomo, G. Di Lucca, P. Grolier. 2002. Review of the influence of major environmental and agronomic factors on the lycopene content of tomato fruit. *Acta Hort.* 579:595-601.
- Ford, N.A. and J.W. Erdman. 2012. Jr, Are lycopene metabolites metabolically active? *Acta Biochim. Pol.* 59:1-4.
- Gergoff, G.E., M.E. Sen, M.L. Alegre, A.R. Chaves, C.G. Bartoli. 2016. Nocturnal low irradiance pulses improve fruit yield and lycopene concentration in tomato. *Sci Hortic* 203:47-52.
- Giliberto, L., G. Perrotta, P. Pallara, J.L. Weller, P.D. Fraser, P.M. Bramley, A. Fiore, M. Tavazza, G. Giuliano. 2005. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiol.* 137:199-208.
- Giovannucci, E.1999. Tomatoes, tomato-based products, lycopene, and cancer: review of the epidemiologic literature. *Inci. J. Natl. Cancer I.* 91:317-331.
- Guil-Guerrero, J.L. and M.M. Reboloso-Fuentes. 2009. Nutrient composition and antioxidant activity of eight tomato (*Lycopersicon esculentum*) varieties. *J. Food Compos. Anal.* 22:123-129.
- Helyes, L. and A. Lugasi. 2006. Formation of certain compounds having technological y nutritional importance in tomato fruits during maturation. *Acta Aliment. Hung.* 35:183-193.
- Hyman, J., J. Gaus, M.R. Foolad. 2004. A rapid and accurate method for estimating tomato lycopene content by measuring chromaticity values of fruit purée. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 129:717-723.
- Ishida, B.K., M. Jason, B. Chan. 2001. A simple, rapid method for HPLC analysis of lycopene isomers. *Pytochemical Analysis* 12:194-198.
- Kader, A.A. and R.S. Rolle. 2004. The role of post-harvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce, *FAO Agricultural Services Bulletin* 152, Rome, Italy.
- Krinsky, N.I. and E.J. Johnson. 2005. Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Mol. Aspects Med.* 26:459-516.

- Lee, G.H., J.M. Bunn, Y.J. Han, G.D. Christenbury. 1997. Ripening characteristics of light irradiation tomatoes. *J. Food Sci.* 62:138-140.
- Lei, J., N. Zhang, R. Yan, L. Xu, Y. Li, W. Guan. 2016. Red and blue LED weak light irradiation maintaining quality of cherry tomatoes during cold storage. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 32:248-254.
- Li, H., C. Tang, Z. Xu. 2013. The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis in vitro. *Sci. Hort.* 150:117-124.
- Liu, L.H., D. Zabaraz, L.E. Benett, P. Aguas, B.W. Woonton. 2009. Effects of UV-C, red light and sun light on the carotenoid content and physical qualities of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chem.* 115:495-500.
- López Camelo, A.F. and P.A. Gómez. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Hortic. Bras.* 22:534-537.
- Massa, G.D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43:1951-1956.
- Montgomery, D.C. 2004. *Diseño y análisis de experimentos. Segunda edición*, ed. Limusa Wiley, Arizona State University, USA.
- Morrow, R.C. 2008. LED lighting in horticulture. *HortScience* 43:1947-1950.
- Moya, C., E. Oyanedel, G. Verdugo, M.F. Flores, M. Urrestarazu, J.E. Álvaro. 2017. Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato. *HortScience* 52:868-872.
- Müller, L., C. Caris-Veyrat, G. Lowe, V. Böhm. 2016. Lycopene and its antioxidant role in the prevention of cardiovascular diseases-a critical review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 56:1868-1879.
- Naoya, F., F. Mitsuko, O. Yoshitaka, S. Sadanori, N. Shigeo, E. Hiroshi. 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *J. Sci. Hort.* 115:176-182.
- Ouzounis, T., B. Razi Parjikolaei, X. Fretté, E. Rosenqvist, C.O. Ottosen. 2015. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield

of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa*. *Front. Plant Sci.* 6:19.

Postharvest Center University of California, 1997. Recommendations for Maintaining Postharvest Quality-Tomato.

http://postharvest.ucdavis.edu/Commodity_Resources/Fact_Sheets/Datastores/Vegetables_English/?uid=36&ds=799 (Accessed 24 February 2018).

Ramos-Bueno, R.P., R. Romero-González, M.J. González-Fernández, J.L. Guil-Guerrero. 2016. Phytochemical composition and in vitro anti-tumour activities of selected tomato varieties. *J. Sci. Food Agric.* 97:488-496.

Sandmann, G., S. Romer, P.D. Fraser. 2006. Understanding carotenoid metabolism as a necessity for genetic engineering of crop plants. *Metab. Eng.* 8:291-302.

Schwend, T., D. Prucker, S. Peisl, A. Nitsopoulos, H. Mempe. 2016. The rosmarinic acid content of basil and borage correlates with the ratio of red and far-red light. *J. Hortic. Sci.* 81:243-247.

Shao, G.C., S. Deng, N. Liu, M.H. Wang, D.L. She. 2015. Fruit quality and yield of tomato as influenced by rain shelters and deficit irrigation. *J. Agr. Sci. Tech.* 17:691-704.

Statgraphics Centurion XVII, 2018. Statgraphics Net for Windows 7, Madrid, Spain.

Thomas, R.L. and J.J. Jen. 1975. Red light intensity y carotenoids biosynthesis in ripening tomatoes. *J. Food Sci.* 40:566-568.

Tiwari, G., D.C. Slaughter, M. Cantwell. 2013. Nondestructive maturity determination in green tomatoes using a handheld visible and near infrared instrument. *Postharvest Biol. Tec.* 86:221-229.

Toledo-Ortiz, G., E. Huq, M. Rodríguez-Concepción. 2010. Direct regulation of phytoene synthase gene expression and carotenoid biosynthesis by photochrome-interacting factors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107:1626-11631.

Toor, R.K. and G.P. Savage. 2006. Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chem.* 99:724-727.

Urrestarazu, M., C. Nájera, M. Gea. 2016. Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience* 51:268-271.

- USDA, Shipping Point and Market Inspection Instructions, 2005. USDA Agricultural Marketing Service, Washington, DC.
- Vogel, J.T., D.M. Tieman, C.A. Sims, A.Z. Odabasi, D.G. Clark, H.J. Klee. 2010. Carotenoid content impacts flavor acceptability in tomato (*Solanum lycopersicum*). *J. Sci. Food Agr.* 90:2233-2240.
- Wills, R.B.H., H. Nurdin, M. Wootton. 1988. Separation of carotenes and xanthophylls in fruit and vegetables by HPLC. *J. Micronutr. Anal.* 4:87-98.

9.3 CHAPTER 3

HORTSCIENCE 54(10):1745–1750. 2019. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14263-19>

Effect of the Intensity and Spectral Quality of LED Light on Yield and Nitrate Accumulation in Vegetables

Cinthia Nájera and Miguel Urrestarazu

Research Centre in Agri-Food Biotechnology (Centro de Investigación en Biotecnología, CIAIMBITAL), University of Almería, Almería, Spain

Additional index words. indoor, healthy diet, leafy greens, lighting efficiency, photosynthesis, regulation

Abstract. At present, trends exist in the production of food for the benefit of human health. The negative effect of an excessive intake of nitrates accumulated in vegetables is well known, causing worldwide concern. Light plays an important role in the accumulation of this ion. The objective of this work was to evaluate the effect of light-emitting diode (LED) spectra used in artificial lighting for horticulture on the accumulation of nitrates in leafy and root vegetables compared with the effects with white LED lights. Two independent experiments were carried out in the culture chamber. In Expt. 1, six species of nitrate accumulators were used: arugula, spinach, lettuce, endive, radish, and beetroot. In Expt. 2, four lettuce cultivars were used. In both experiments, the treatments were two spectra—T1 = AP67 Valoya® and the control (T0) = white Roblan®—at two illumination intensities [high (H) and low (L)] with a 16/8-hour (day/night) photoperiod. The fresh biomass and the concentration of nitrates were measured at 35 days of treatment posttransplantation. An important and significant increase of 50% of the mean fresh weight was obtained in all the species when the light intensity increased. Except for spinach in the low-intensity treatment, all nitrate content values were less than the maximum limits of European regulation. The nitrate content generally decreased with increasing intensity, and this benefit was greater in the T1 treatment. T0 showed a reduction in the nitrate content compared with T1 in only one case, which was the H in beetroot. A large and significant reduction was observed in the nitrate content in T1. For L in Expt. 1, the nitrate decrease was 18%, whereas for H, it was 35%. In Expt. 2, the decrease in the nitrate content was 10% for L and 21% for H. A greater benefit was derived when using the photosynthetic spectrum in the growing chambers under low light intensity.

9.3.1 Introduction

The concentration of nitrate accumulated in plants depends on the plant variety or cultivar (cv) (Urrestarazu et al., 1998; EFSA 2008; Álvaro et al., 2016), on the time of year in which the plant is grown (Carrasco et al., 2006), the irradiation it receives (Roorda, 1984; Blom-Zandstra, 1989), the cultivation system used (Carrasco et al., 2006; Nicola et al., 2007), the management practices and the nutritive ions applied (Urrestarazu et al., 1998; Fontana and Nicola, 2009). Nitrate is found in vegetables, fruits, meats, fish, grains and in several products that are part of the basic diet of human beings (Gürkan and Altunay, 2018). According to the Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2015), nitrate is a source of carcinogenic nitrosamines via nitrites (Addiscott, 2006; Cometti and Furlani, 2009), which can seriously compromise human health; moreover, the consumption of nitrate-accumulating vegetables in children under 6 years old is especially worrisome according to the European Food Safety Authority (EFSA, 2010), because 75% of the nitrates consumed are supplied by vegetables (Hill, 1990).

Arugula, spinach, lettuce and escarole are vegetables that are eaten raw; are species with a tendency to accumulate high concentrations in the leaves and ribs; and for which no restrictions exist on the daily intake (Cometti et al., 2011; Gent, 2016). The beetroot and radish are also considered root vegetable sources of nitrates (EFSA, 2008).

The species considered in this work are widely cultivated in Spain, according to statistical data from the Food and Agriculture Organization (FAO) and the Spanish Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAPA). These crops have made Spain one of the five leading countries in terms of production over a period of 20 years (1993 to 2013); the cultivation areas are 3686, 34862, 33168, 2200 and 282 ha for spinach, lettuce, beet, escarole and radish, respectively, with corresponding production of 67 thousand, 930 thousand, 3 million 240 thousand, 59 million and 5 thousand t, respectively (FAOSTAT, 2016; MAPA, 2016).

The presence of high levels of nitrate in vegetables, especially in leaves and roots, has been well known for decades (e.g., Corré and Breimer, 1979; Sanchez et al., 2005; Santamaria, 2006; Carrasco et al., 2006; Hsu et al., 2009; Chan, 2011) and has been reported more recently (Wojciechowska, et al., 2015; Colla et al., 2018; Bantis et al., 2018). As a result, since 2002, the European Union has established maximum levels for certain contaminants in food, and in 2011, the European Commission Regulation updated the

maximum levels as follows: 5000 and 4000 mg NO₃⁻ kg⁻¹ fresh weight for lettuce harvested in winter and spring, respectively; 3500 and 2000 mg NO₃⁻ kg⁻¹ fresh weight for spinach harvested in winter and spring, respectively; 7000 and 6000 mg NO₃⁻ kg⁻¹ fresh weight for arugula, which presents the highest levels of nitrate, in winter and summer, respectively; and 2500 mg NO₃⁻ kg⁻¹ fresh weight for iceberg lettuce (EC, 2002; EC, 2006; EC, 2011). In 2008, the EFSA published a reference report of nitrates in some vegetables as follows: escarole, with a mean of 523 mg NO₃⁻ kg⁻¹ fresh weight; radish, with 967 mg NO₃⁻ kg⁻¹ fresh weight; and beetroot, with 1379 mg NO₃⁻ kg⁻¹ fresh weight (EFSA, 2008).

Plants grown hydroponically show higher nitrate levels compared to those grown in conventional systems (Beninni et al., 2002), even though they are cultivated with a controlled supplemental lighting system (Lin et al., 2013). Despite the improved cultivation practices and the current technologies associated with a strict application of these regulations, in certain regions of the European Union, it is not possible to achieve nitrate levels in lettuce and spinach that are below the current maximum limits (EC, 2011).

Researchers agree on a close relationship between the accumulation of nitrate in vegetables and the intensity of light (Steingröver et al., 1986; Chadja et al., 1995; Fukuda et al., 1999; Ohashi et al., 2007; Cometti et al., 2011; He et al., 2015) because photosynthesis causes the uptake and assimilation of nitrates in vegetables (Cavaiuolo and Ferrante, 2014).

In recent years, effective techniques have been developed for the growth and morphological development of plants, especially those grown under a soilless system and in closed and controlled structures under LED lights (Johkan et al., 2012; Urrestarazu et al., 2016). This advance in agriculture can be beneficial for the reduction of nitrate levels in plants that accumulate the most and, above all, in plants that are most consumed in the world. Some works have related the content of nitrates in leaves and the quality of fluorescent lamps (e.g., Deng et al., 2000; Ohashi et al., 2007; Seifu, 2017), but few studies have been conducted on the quality of LED spectra as a beneficial tool for safer food (Lin et al., 2013; Wojciechowska et al., 2015; Nájera et al., 2018), especially for hydroponic crops. Therefore, the objective of this work was to evaluate how LED spectra used in artificial lighting for horticulture affect the accumulation of nitrates in leafy and root vegetables compared to the effect of white LED lights.

9.3.2 Materials and methods

The experiment was carried out in a controlled culture chamber of 10 m x 2.5 m located in the experimental field of practice of the University of Almeria in the province of Almeria in southern Spain (36° 49' 38.1" N, 2° 24' 19.3" W).

9.3.2.1 LED treatments

White LED lamps L18 T8 Roblan[®] (Toledo, Spain) were used as control (T0) and L18 T8 AP67 from Valoya[®] (Helsinki, Finland) as the spectrum to be evaluated (T1). Each treatment had two light intensities: T0 = 85 and 117 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, which were low and high intensities consisting of four and six lamps per square metre, respectively; and T1 = 52 and 95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, which were low and high, respectively. Each lamp was 120 cm in length. Spectral specifications, quantitative light values, photon flux density ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and illuminance (lux) are described in a previous study by Urrestarazu et al. (2016). Photoperiods were 16/8 h (day/night) at a temperature of 28 to 18 °C (day/night) and relative humidity of 85 to 80%.

9.3.2.2 Experiments and vegetable material

The work was divided into two experiments with different plant species.

Experiment 1

Six species were used: arugula (*Eruca sativa* Mill. cv. Enza), spinach (*Spinacia oleracea* L. cv. Esmer), lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Maravilla de verano), escarole (*Cichorium intybus* L. cv. Cabello de angel), radish (*Raphanus sativus* L. cv. Redondo rojo) and beetroot (*Beta vulgaris* L. cv. Detroit 2).

Experiment 2

Four varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L.) were used: Batavia (cv. Maravilla de verano), cogollo (cv Astorga), romaine (cv. Cervantes) and iceberg (cv. California).

Seedlings were transplanted at the stage of four true leaves in 0.6 L pots filled with coconut fiber and then placed in the culture chamber and fertirrigated with a standard solution recommended by Sonneveld and Straver (1994).

9.3.2.3 Harvest

Plant biomass was measured at 35 days after transplantation, stored cold until laboratory analysis and subsequently taken to the laboratory in Ziploc plastic bags inside an isothermal

container at a controlled temperature. Only the edible parts were analyzed. Fresh weight was determined using an OHAUS Adventurer[®] Analytical Precision Balance (Nueva Jersey, USA) with precision to four tenths of a gram.

9.3.2.4 Nitrate analysis

The nitrate content was determined by the method described by Urrestarazu et al. (1998) using ion chromatography and as described by Chang and Chang (2014) using a LAQUA Twin Nitrate (NO₃⁻) rapid response digital meter (LAQUA Twin Nitrate Meter, Spectrum Technologies, Inc.). Measurements for arugula, spinach, lettuce and escarole were obtained from the sap of the leaves, and for radish and beet, the bulb or root was crushed, and the sap and juice obtained were stored in 2 mL microcentrifuge tubes until analysis.

9.3.2.5 Statistical analysis

The experimental design was a randomized complete block design, with 4 repetitions for 4 treatments and 5 plants per repetition (Montgomery, 2004). The mean data were analyzed at different levels of significance. The data were subjected to an analysis of variance, and their means were compared by Tukey's test using Statgraphics Centurion[®] 16.1.15 (Warrenton, VA). Some data were analyzed by means of a Student's *t-test* in Excel 2016.

9.3.3 Results and discussion

9.3.3.1 Fresh weight

The average increase in light intensity was 50% in all the species evaluated in any of the spectra (Table 1). Arugula obtained the highest percentage of growth in fresh weight (66%) when the light intensity was increased and white LED was used; escarole and radish obtained the greatest benefit (both 65%) when cultivated at high intensity, with the T1 treatment corresponding to the photosynthetic spectrum. However, plant growth in the T1 treatment was 6% higher than for those plants cultivated in T0. An improvement in productivity relative to T0 was observed with T1 at low intensity; the fresh weight of the species increased between 6 and 58%, with arugula presenting the highest vegetative growth. In the case of plants cultivated with high light intensity in T1, an average increase of 20% was seen compared to those cultivated under T0, where the fresh weight of radish increased by 45%. A change in spectrum and intensity had previously been shown to improve the parameters of vegetative growth by Yang and Park (2015) and Samuolienė et al. (2011) in radish; by Urrestarazu et al. (2016) in lettuce, tomato and pepper; and by Burattini et al. (2017) in

spinach. T1 produced a significant increase in fresh weight that varied between 12% for lettuce and 45% for radish. Working in similar conditions, Urrestarazu et al. (2016) found that the vegetative growth doubles, or in some cases can be greater than 200%, whereas Samuolienė et al. (2011) achieved significant growth (90% more) in radish.

The behavior of the lettuce varieties (Table 2) in terms of intensity (Low vs High) and the specific spectrum (T0 vs T1) was very similar to that of the other vegetables. The California cultivar showed greater growth than the rest of the cultivars when cultivated with increasing light intensity of white LED (82%) and LED T1 (72%). Under T1, the Summer Wonder cultivar similarly increased the fresh weight by 72% with high light intensity. When comparing the light spectra, the Astorga cultivar showed the greatest increase compared to the other cultivars, both at low and high light intensity (60 and 46%, respectively) when cultivated under T1.

Table 1. Effect of the light intensity and spectral composition on total weight of edible part (g plant^{-1} fresh weight) of six vegetables.

Plant	Intensity	T0	T1	<i>P</i> value
Arugula cv. Enza	L	5.5	13.4	***
	H	16.5	28.1	***
	<i>P</i> value	***	***	
Spinach cv. Esmer	L	7.1	8.8	**
	H	12.3	14.7	***
	<i>P</i> value	***	***	
Lettuce cv. Maravilla de verano	L	29.6	33.2	**
	H	38.7	50.2	**
	<i>P</i> value	*	***	
Escarole cv. Cabello de ángel	L	11.3	12.1	ns
	H	26.8	34.7	*
	<i>P</i> value	***	***	
Radish cv. Redondo rojo	L	3.5	2.9	ns
	H	4.5	8.3	***
	<i>P</i> value	*	***	
Beetroot cv. Detroit 2	L	22.4	36.5	*
	H	53.2	70.6	*
	<i>P</i> value	***	***	

T0 = L18 T8 Roblan[®], T1 = L18 AP67 Valoya[®]. L and H represent 4 and 6 lamps per m^2 , respectively.

*, **, ***, and ns indicate significant differences for row and columns at *P* value ≤ 0.05 , *P* value ≤ 0.05 , *P* value ≤ 0.05 , and nonsignificant, respectively. n=5

Table 2. Effect of the light intensity and spectral composition on total weight of edible part (g plant^{-1} fresh weight) of four lettuce varieties.

Variety	Intensity	T0	T1	P value
Batavia cv. Maravilla de verano	L	14.5	21.0	*
	H	50.9	76.3	**
	P value	***	***	
Cogollo cv. Astorga	L	6.5	16.6	***
	H	13.8	25.8	***
	P value	***	**	
Romane cv. Cervantes	L	16.9	29.2	***
	H	49.7	70.3	***
	P value	***	***	
Iceberg cv. California	L	5.1	4.7	ns
	H	29.8	16.9	**
	P value	***	***	

T0 = L18 T8 Roblan[®], T1 = L18 AP67 Valoya[®]. L and H represent 4 and 6 lamps per m^2 , respectively.

*, **, ***, and ns indicate significant differences for row and columns at P value ≤ 0.05 , P value ≤ 0.05 , P value ≤ 0.05 , and nonsignificant, respectively. $n = 5$.

9.3.3.2 Effect in nitrate content

Effect on species vegetables

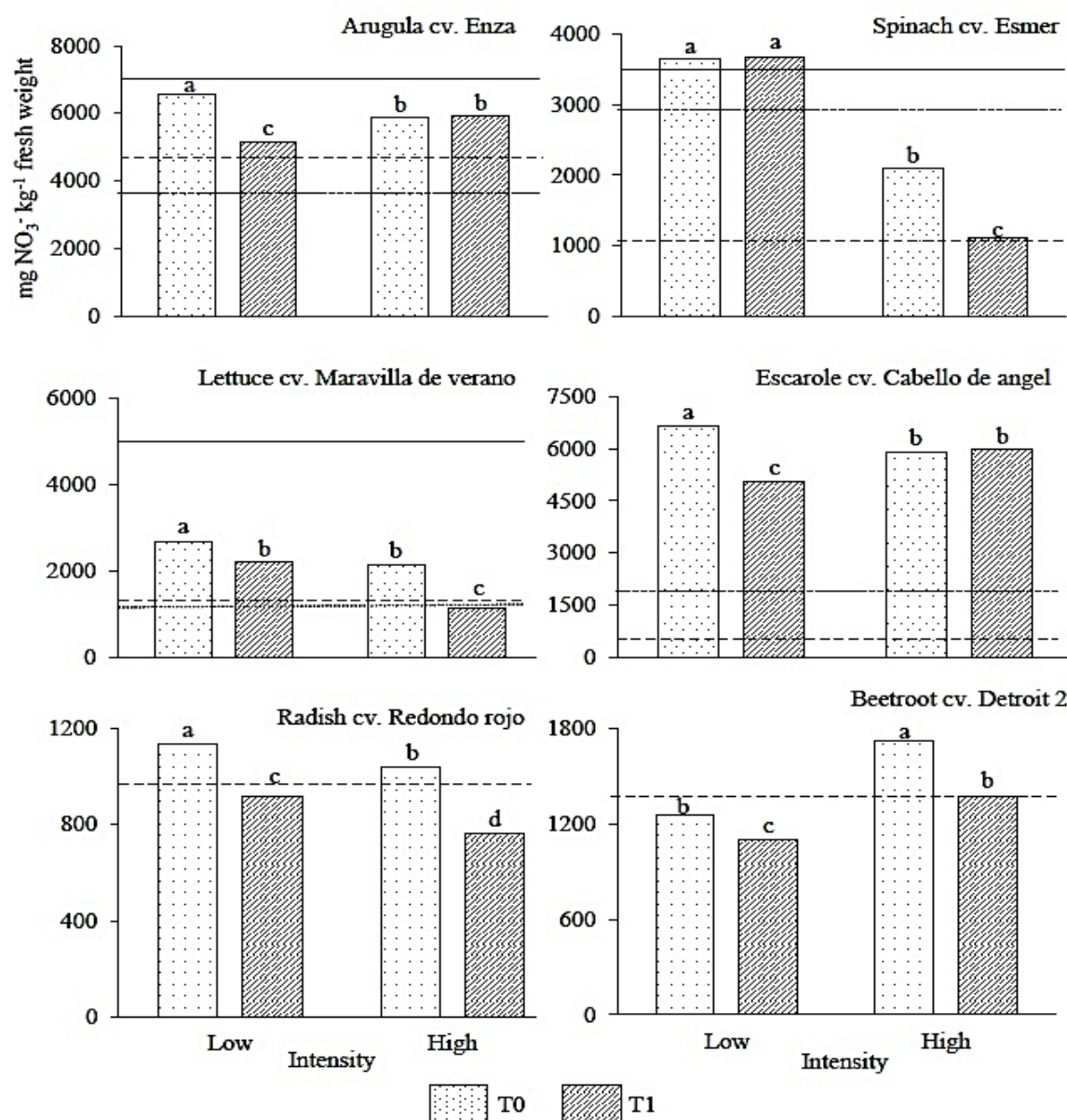
Comparison with the mean values (European and USA) and legal maximum limits. Figure 1 shows the resulting mean values of the nitrate content. In arugula and lettuce, nitrate levels 16 and 60% lower than the legal limits were recorded (EC, 2011); additionally, the spinach cultivated under high light intensity yielded lower values (54% lower). For the radish and beetroot (root vegetables), the mean content values were 13 and 10% below those reported by EFSA (2008), respectively. The nitrate content in spinach grown under high-intensity light recorded a significantly lower value (45%) than the mean values reported from the USA (Sanchez et al., 2005); for the rest of the vegetables (arugula, spinach, lettuce and escarole), our values were higher.

Effect of nitrate content by light intensity. A decrease in the nitrate content was recorded with a lower irradiation intensity for the case of the T1 spectrum in beetroot (24%), escarole (15%) and arugula (13%). Moreover, in general, a decrease in the nitrate content was recorded with greater irradiation. The greatest decrease in nitrates resulting from the increase in irradiation intensity was for spinach plants, which was as much as 70% in the case of T1. Similar results had already been obtained in different conditions, with leaves of barley, wheat, corn and beans (Canvin and Atkins, 1974); spinach and greenhouse lettuce

(Steingröver et al., 1986; Gaudreau et al., 1995); lettuce and spinach under supplementary light (Chadjaa et al., 1995; Proietti et al., 2004) and, more recently, in lettuce crops in greenhouses (e.g., Fallovo et al., 2009; Gent, 2014); and Brassica in aeroponics (He et al., 2015; Fu et al., 2017); and all of these plants obtained lower concentrations of nitrates with higher irradiance. However, Novo et al. (2008) found no significant difference in lettuce and spinach grown with 18 and 50% shade in the greenhouse. This result means that the limits of the current legislation in winter are higher than those for summer when greater irradiation occurs (Fig. 1). This decrease in nitrate content may be because, with high light irradiation, some enzymes involved in the metabolism of nitrates to amino acids (glutamine synthetase (GS) and glutamate synthase (GOGAT)) are stimulated, and a non-essential amino acid is inhibited (asparagine synthetase (AS)) (Zhang et al., 2018), favouring the assimilation of nitrogen into carbon-rich compounds (glutamine and glutamate); conversely, in low light, the GS and GOGAT are inhibited, and AS, which is a compound rich in nitrogen and that stabilizes nitrate for transport or storage, is stimulated.

In low lighting, beetroot obtained the lowest nitrate content in the product that could be used, unlike the rest of the leafy vegetables and the radish tested; the reason was probably because this plant stores the nitrates in the root before transporting it to the leaves. There are few works on the variation of nitrate content in radish with which to compare; in post-harvest, Lee et al., (2017) observed a decrease in the concentration of secondary metabolites containing nitrogen (glucosinolates) during cold storage of between zero and eight weeks in darkness.

Spectrum effect on nitrate content. In low light treatments, the nitrate content was lower in the T1 spectrum (mean of 19%), with the exception of spinach. In the high-intensity T1 treatments, a decrease in nitrate content was recorded for lettuce and spinach (47%), radish (27%) and beetroot (20%). Ohashi et al. (2007) obtained 64% less nitrate in lettuce and spinach grown under red or blue fluorescent light versus those cultivated in white light. Samuolienė et al. (2009) in marjoram, lettuce and green onion obtained less nitrate under light LED versus light HPS. A recent study reported that spectra of the same intensity increases the lycopene content in tomato fruits (Nájera et al., 2018) or contributes to better growth in lettuce, pepper and tomato plants (Urrestarazu et al., 2016) or pomegranate plants (Bantis et al., 2018). Therefore, the effect of T1 is very significant in the decrease in nitrate content in vegetables, modifying the composition of some enzymes inside the plant when exposed to different spectra.



— Maximum levels in winter by Regulation Commission, Official Journal of the European Union (EC, 2011).
 - - - Mean by European Food Safety Authority (EFSA, 2008) in Europe
 Mean by Sanchez et al. (2005) in USA

Fig. 1. Nitrate content according to quality spectral in two LED-light intensities (Low and High) of six vegetables. T0 = L18 T8 Roblan® and T1 = L18 AP67 Valoya®. Different letters indicate significant differences between spectral by Tukey's test, $P \leq 0.05$. $n=5$

Effect in intraespecific lettuce varieties

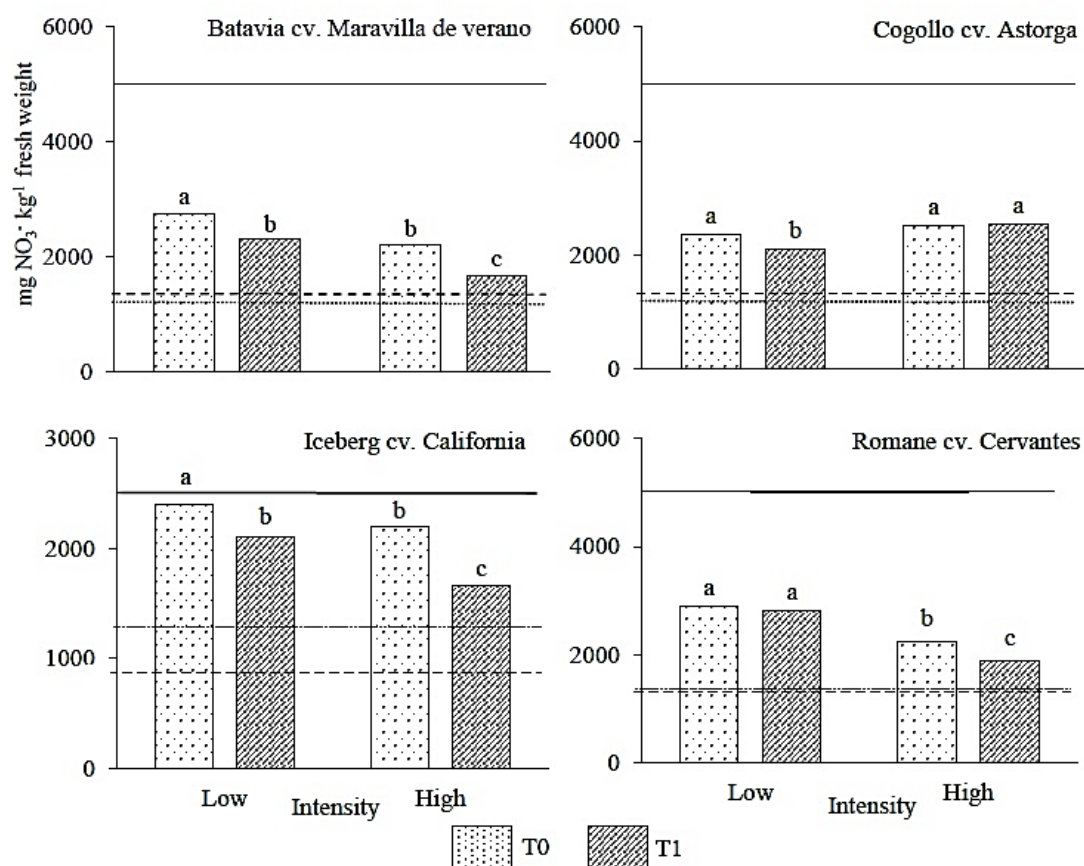
Comparison with the mean values (European and USA) and legal maximum limits. Fig. 2 shows the nitrate content results of experiment 2 for lettuce varieties. The nitrate content data of the iceberg cv. California were lower than those for the other three varieties. While mean values of 16% were found for the California cultivar, for the other varieties, the

differences between the observed values and legal limits were much higher (51%). All the nitrate content values were above those reported by the EFSA and the mean data in USA by Sanchez et al. (2005).

Effect of nitrate content by light intensity. All our data were below the legal limits of 5000 mg kg⁻¹ (2500 mg kg⁻¹ for the iceberg variety) even at low light intensity (50 μmol m⁻² s⁻¹). With the exception of the Astorga cultivar, a significant average decrease of 22% of the nitrate content was obtained at higher irradiation. At low intensity, only the lettuce cultivar Astorga showed a nitrate decrease (17%) when cultivated under the T1 treatment. A few authors such as Novo et al. (2008) found values at mid-latitudes (high irradiation) that were above 3000 mg kg⁻¹ when 18% shading was applied in Brazilian greenhouses. We agree with other authors that lower nitrate content occurs at high irradiation; for example, Cometti et al. (2011) obtained greater accumulation of nitrates in shoots of the lettuce cultivar Vera with 80% shading in the greenhouse (118 μmol m⁻² s⁻¹). The physiological explanation of the relationship between irradiation intensity and the lower nitrate content has already been described extensively in recent decades; nitrate reductase is activated by illumination and therefore decreases the accumulation of nitrate (e.g., Blom-Zandstra et al., 1988; Huber et al., 1992).

Effect of nitrate content on the spectrum. The nitrate content was lower with the T1 treatment, with the exception of the cultivar Astorga under high-intensity light and the cultivar Cervantes under low-intensity light, where no significant decrease was observed in the nitrate content in T1 with respect to T0. The greatest reduction (by 24%) of the nitrate content with the T1 spectrum was recorded at the highest intensity (95 μmol m⁻² s⁻¹) for the Summer Wonder and California cultivars, whereas a smaller reduction (11%) was found in the cultivar Astorga at low light intensity under T1. Some specific responses regarding the type of spectrum and nitrate content in leaves had already been made previously, as well in rice cultivation, where Deng et al. (2000) used blue, red and white fluorescent lamps and measured nitrate content by the primary assimilation of nitrogen; the authors observed higher nitrate levels in plants grown for 2-6 h with pure blue light. Ohashi et al. (2007) obtained 63% less nitrate content in lettuce cultivated with fluorescent red lights in a photoperiod of 12 h at an intensity of 300 μmol m⁻² s⁻¹. Lin et al. (2013), in works aimed at quality studies of hydroponic lettuce (var. "Capitata"), used the following lighting treatments: 1) combination of red and blue LEDs, 2) blue, red and white LEDs and 3) fluorescent lamps. The lowest concentration of nitrates in leaves was obtained by the LED treatment combining

the three spectra; probably, the combination LED spectra used in their most efficient treatments were similar to the spectra that we use (T1). Recently, in post-harvest Seifu (2017), fluorescent lamps have been used to delay the accumulation of nitrate content in lettuces collected for different supermarkets for transformation into minimally processed produce.



——— Maximum levels in winter by Regulation Commission, Official Journal of the European Union (EC, 2011).
 - - - - Mean by European Food Safety Authority (EFSA, 2008)
 Mean by Sanchez et al. (2005) in USA

Fig. 2. Nitrate content according to quality spectral in two LED-light intensities (Low and High) of four lettuce varieties. T0 = L18 T8 Roblan® and T1 = L18 AP67 Valoya®. Different letters indicate significant differences between spectral by Tukey's test, $P \leq 0.05$. $n=5$

9.3.4 Literature cited

- Addiscott, T. 2006. Is it nitrate that threatens life or the scare about nitrate? *J. Sci. Food Agr.* 86:2005-2009.
- Álvaro, J.A., S. Carrasco, M. Urrestarazu. 2016. Effect of the organic production system and seasonality on nitrate content in vegetables from Spanish supermarkets. *Sylwan* 160:348-363.
- ATSDR, 2015. Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Resumen de salud pública. Nitrato y Nitrito.

División de Toxicología y Ciencias de la Salud. Consultado el 10 de enero de 2017 en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs204.pdf.

- Bantis, F., K. Karamanoli, A. Ainalidou, K. Radoglou, H. Constantinidou. 2018. Light emitting diodes (LEDs) affect morphological, physiological and phytochemical characteristics of pomegranate seedlings. *Sci Hortic* 234:267-274.
- Beninni, E., H. Takahashi, C. Neves, I. Fonseca. 2002. Teor de nitrato em alface cultivada em sistemas hidropônico e convencional. *Hortic. Bras.* 20:183-186.
- Blom-Zandstra, M. 1989. Nitrate accumulation in vegetables and its relationship to quality. *Ann. Appl. Biol.* 115:39-55.
- Blom-Zandstra, M., J.E.M. Lampe, H.M. Ammerlaan. 1988. C and N utilization of two lettuce genotypes during growth under non-varying light conditions and after changing the light intensity. *Physiol. Plantarum* 74:147-152.
- Burattini, C., B. Mattoni, F. Bisegna. 2017. The Impact of spectral composition of white LEDs on spinach (*Spinacia oleracea*) growth and development. *Energies* 10:1383.
- Canvin, D.T., C.A. Atkins. 1974. Nitrate, nitrite and ammonia assimilation by leaves: Effect of light, carbon dioxide and oxygen. *Planta* 116:207-224.
- Carrasco, G., J. Tapia, M. Urrestarazu. 2006. Nitrate content in lettuces grown in hydroponic systems. *Idesia* 24:25-30.
- Cavaiuolo, M. and A. Ferrante. 2014. Nitrates and glucosinolates as strong determinants of the nutritional quality in rocket leafy salads. *Nutrients* 6:1519-1538.
- Chadjaa, H., L.P. Vezina, S. Dubé, A. Gosselin. 1995. Effects of supplementary lighting on growth and primary nitrogen metabolism of greenhouse lamb's lettuce and spinach. *HortScience* 30:883-884.
- Chan, T.Y.K. 2011. Vegetable-borne nitrate and nitrite and the risk of methaemoglobinaemia. *Toxicol. Lett.* 200:107-108.
- Chang, C.L. and K.P. Chang. 2014. The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple wavelength-band light-emitting diode lighting. *Sci Hortic* 179:78-84.
- Colla, G., H.J. Kim, M.C. Kyriacou, Y. Roupheal. 2018. Nitrate in fruits and vegetables. *Sci. Hortic* 237:221-238.

- Cometti, N.N. and P.R. Furlani. 2009. Hidroponia e segurança alimentar. In: Ferreira, A., Lima, A.B.P., Matta, F.P., Amaral, J.A.T., Lopes, J.C., Pezzopane, J.E.M., Ferreira, M.F.S., Polanczyk, R.A., Soares, T.C.B. (Eds.) *Tópicos Especiais em Produção Vegetal I*. ed. Alegre, ES: Centro de Ciências Agrárias, pp. 517-528.
- Cometti, N.N., M.Q. Martins, C.A. Bremenkamp, J.A. Nunes. 2011. Nitrate concentration in lettuce leaves depending on photosynthetic photon flux and nitrate concentration in the nutrient solution. *Hortic. Bras.* 29:548-553.
- Corré, W.J. and T. Breimer. 1979. Nitrate and nitrite in vegetables. Centre for Agricultural Publishing and Documentation 39, Wageningen.
- Deng, J.M., J.H. Bin, R.C. Pan. 2000. Effect of light quality on the primary nitrogen assimilation of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Acta Bot. Sin.* 42:234-238.
- EC, 2002. European Commission Regulation No. 563/2002 of 2 April 2002 amending Regulation (EC) No. 466/2001 Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. OJ. L. 86:5-6. Accessed on 10 December 2016: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6bf91c08-0654-4c10-8a24-23473f1210e8/language-en>.
- EC, 2006. European Commission Regulation No. 1881/2006 of 19 December 2006. Setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. OJ. L. 364:5-24. Accessed on 10 December 2016: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32006R1881>.
- EC, 2011. European Commission Regulation No. 1258/2011 of 2 December 2011 amending Regulation No. 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuffs. OJ. L. 320:15-17. Accessed on 10 December 2016: https://www.fsai.ie/uploadedFiles/Reg1258_2011.pdf.
- EFSA, 2008. European Food Safety Authority. Nitrate in vegetables. Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain. J 689:1-79. Accessed on 10 December 2016: http://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/scientific_output/files/main_documents/689.pdf.

- EFSA, 2010. European Food Safety Authority. Scientific Opinion. Statement on possible public health risks for infants and young children from the presence of nitrates in leafy vegetables. *EFSA Journal*, 8:1935.
- Falovo, C., Y. Roupael, E. Rea, A. Battistelli, G. Colla. 2009. Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *acephala* in floating raft culture. *J. Sci. Food Agr.* 89:1682-1689.
- FAO. FAOSTAT, 2016. Food and Agriculture Organization. Details of spinach, lettuce, radish, arugula, beetroot and escarole, from 2013 to 2016. Accessed on 24 February 2017: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Fontana, E., and S. Nicola. 2009. Traditional and soilless culture systems to produce corn salad (*Valerianella olitoria* L.) and rocket (*Eruca sativa* Mill.) with low nitrate content. *J. Food Agric. Environ.* 7:405-410.
- Fu, Y., H.Y. Li, J. Yu, H. Liu, Z.Y. Cao, N.S. Manukovsky, H. Liu. 2017. Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality on lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. Youmaicai). *Sci Hortic* 214:51-57.
- Fukuda, N., M. Miyagi, Y. Suzuki, H. Ikeda, K. Takayanagi. 1999. Effects of supplemental night lighting and NO_3^- exclusion on the growth and NO_3^- concentration in the leaf sap of greenhouse-grown spinach under NFT. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 68:146-151.
- Gaudreau, L., J. Charbonneau, L.P. Vezina, A. Gosselin. 1995. Effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on nitrate content and nitrate reductase activity in greenhouse-grown lettuce. *J. Plant Nutr.* 18:437-453.
- Gent, M.P.N. 2014. Effect of daily light integral on composition of hydroponic lettuce. *HortScience* 49:173-179.
- Gent, M.P.N. 2016. Effect of irradiance and temperature on composition of spinach. *HortScience* 51:133-140.
- Gürkan, R. y N. Altunay. 2018. Preconcentration and indirect quantification of trace nitrite, nitrate and total nitrite in selected beverage and milk samples using ion-pairing cloud-point extraction with acridine orange. *J. Food Compos. Anal.* 69:129-139.
- He, J., L. Lim, L. Qin. 2015. Growth irradiance effects on productivity, photosynthesis, nitrate accumulation and assimilation of aeroponically grown *Brassica alboglabra*. *J. Plant Nutr.* 38:1022-1035.

- Hill, M.J. 1990. Nitrates and nitrites from food and water in relation to human disease, in: Ellis Wood (Ed.), Food Science and Technology, London, pp. 163-193.
- Hsu, J., J. Arcot, A. Lee. 2009. Nitrate and nitrite quantification from cured meat and vegetables and their estimated dietary intake in Australians. Food Chem. 115:334-339.
- Huber, J.L., S.C. Huber, W.H. Campbell, M.G. Redinbaugh. 1992. Reversible light/dark modulation of spinach leaf nitrate reductase activity involves protein phosphorylation. Arch. Biochem. Biophys. 296:58-65.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, T. Yoshihara. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. Environ. Exp. Bot. 75:128-133.
- Lee, J.G., S. Lim, J. Kim, E.J. Lee. 2017. The mechanism of deterioration of the glucosinolate-myrosinase system in radish roots during cold storage after harvest. Food Chem. 233:60-68.
- Lin, K.H., M.Y. Huang, W.D. Huang, M.H. Hsu, Z.W. Yang, C.M. Yang. 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). Sci Hortic 150:86-91.
- MAPA, 2016. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Datos estadísticos de productos agrícolas por superficie y producción. Accessed on 24 February 2017: <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/default.aspx>.
- Montgomery, D.C. 2004. Diseño y análisis de experimentos, in Limusa Wiley (Ed.), Arizona State University, USA.
- Nájera, C., J.L. Guil-Guerrero, L. Jarquín, J. Álvaro, M. Urrestarazu. 2018. LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit. Postharvest Biol. Tec. 145:151-156.
- Nicola, S., J. Hoeberechts, E. Fontana. 2007. Ebb-and-flow and floating systems to grow leafy vegetables: a review for rocket, corn salad, garden cress and purslane. Acta Hortic. 747:585-592.
- Novo, A.A.C., J.F. Medeiros, C.H.E. de Souza, P.R.G. Pereira, H.E.P. Martinez, P.C.R. Fontes, N.N. Cometti. 2008. Influência do sombreamento sobre o crescimento e teores de nitrato em hortaliças folhosas em hidroponia. Hortic. Bras. 22:S3761-S3766.

- Ohashi, K.K., M. Takase, N. Kon, K. Fujiwara, K. Kurata. 2007. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environmental Control in Biology* 45:189-198.
- Proietti, S., S. Moscatello, G. Colla, Y. Battistelli. 2004. The effect of growing spinach (*Spinacia oleracea* L.) at low light intensities on the amounts of oxalate, ascorbate and nitrate in their leaves. *Journal Hortic. Sci. Biotech.* 79:606-609.
- Roorda, E.J.P. 1984. Nitrate in vegetables under protected cultivation. *Acta Hortic.* 145:251-256.
- Samuolienė, G.; A. Urbonavičiūtė, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, P. Vitta, A. Žukauskas. 2009. Decrease in Nitrate Concentration in Leafy Vegetables Under a Solid-state Illuminator. *HortScience* 44:1857-1860.
- Samuolienė, G., R. Sirtautas, A. Brazaitytė, J. Sakalauskaitė, S. Sakalauskienė, P. Duchovskis. 2011. The impact of red and blue light-emitting diode illumination on radish physiological indices. *Cent. Eur. J. Biol.* 6:821-828.
- Sanchez, C.A., K.S. Crump, R.L. Krieger, N.R. Khandaker, J.P. Gibbs 2005. Perchlorate and nitrate in leafy vegetables of North America. *Environ. Sci. Technol.* 39:9391-9397.
- Santamaria, P. 2006. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *J. Sci. Food Agr.* 86:10-17.
- Seifu, Y.W. 2017. Nitrate content in minimally processed lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by fluorescent light exposure during storage. *J. Plant Biochem. Physiol.* 5:1-5.
- Sonneveld, C. y N. Straver. 1994. Voedingsoplossingen Voor Groenten En Bloemen Geteeld in Water of Substraten: Nutrient Solutions for Vegetables and Flowers Grown in Water or Substrates, in: Voedingsoplossingen glastijnbouw (10ed.), pp. 1-45.
- Statgraphics Centurion X.V.I.I. 2018. Statgraphics Net for Windows 7. <https://www.statgraphics.net/descargas-centurion-xvii/>.
- Steingröver, E., P. Ratering, J. Siesling. 1986. Daily changes in uptake, reduction and storage of nitrate in spinach grown at low light intensity. *Physiol. Plantarum* 66:550-556.

- Urrestarazu, M., A. Postigo, M.C. Salas, A. Sánchez, G. Carrasco. 1998. Nitrate accumulation reduction using chloride in the nutrient solution on lettuce growing by NFT in semiarid climate conditions. *J. Plant Nutr.* 21:1705-1714.
- Urrestarazu, M., C. Nájera, M.M. Gea. 2016. Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience*, 51:268-271.
- Wojciechowska, R., O. Dlugosz-Grochowska, A. Kolton, M. Zupnik. 2015. Effects of LED supplemental lighting on fiend and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. *Sci Hortic* 187:80-86.
- Yang, J.H. y D.K. Park. 2015. A study on growth of the Plant depends on PPF and Wavelength of LED lighting module. *J. Korean Soc. Mechan. Technol.* 17:31-37.
- Zhang, T., Y. Shi, F. Piao, Z. Sun. 2018. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce. *Plant Cell.* 134:231-240.

En la actualidad, la agricultura se ha vuelto más exigente con las tecnologías aplicadas en ella, ya que constituyen un factor importante para la solución de problemas y de cambios con la producción, todo ello cubriendo las demandas de los consumidores. Las lámparas LED significan uno de los avances más importantes en tecnología de iluminación artificial para la horticultura. Estos sistemas, están irrumpiendo como técnica limpia y eficiente en la producción de alimentos en beneficio de la salud humana. El objetivo general de este trabajo fue evaluar el uso de iluminarias para aumentar su eficiencia y eficacia en la producción de hortalizas y ver su efecto en frutos o en hortalizas de hoja y raíz, tanto en calidad como en cantidad. Para el cumplimiento de este objetivo general planteado se realizaron cuatro objetivos específicos en experimentos diferentes: 1) Evaluar la eficiencia agronómica y energética de las lámparas de diodos emisores de luz (LED) fabricadas para uso hortícola utilizando un espectro continuo ajustado a una respuesta fotosintética máxima contra luces blancas convencionales a dos intensidades de luz diferentes. Los resultados demostraron que, las lámparas LED específicas para horticultura con un espectro mejorado de luz en comparación con las lámparas LED convencionales aumentaron la eficiencia energética de las hortalizas evaluadas en un 26%. En las dos intensidades de luz estudiadas, el crecimiento de las plantas estaba más relacionado con el ajuste espectral de la luz a la respuesta fotosintética. 2) Evaluar el espectro de iluminación de tres diferentes tipos de lámparas LED sobre los parámetros de calidad organoléptica, comercial y calidad dietética en postcosecha de seis variedades de frutos de tomate. Todas las variedades aumentaron la proporción del contenido de licopeno entre un 30% y un 60% frente a la oscuridad. Las iluminarias de mayores ratios R:FR favorecieron los parámetros de firmeza frente a otra iluminaria blanca LED, siendo la iluminaria LED de mayor ratio R:FR la que favoreció también a la acidez titulable. 3) Evaluar el efecto de espectros de LED usados en iluminación artificial en horticultura, sobre la acumulación de nitratos en hortalizas de hojas y raíz en comparación con iluminarias de LED blanca convencional. El contenido de nitrato disminuyó generalmente al incrementar la intensidad. Solo en un caso, la intensidad alta en el cultivo de remolacha, el tratamiento control mostró una reducción del contenido de nitratos frente al tratamiento de luz LED evaluado. Por lo que en general se registró una significativa e importante reducción del contenido de nitratos a favor del tratamiento LED evaluado. Las disminuciones de nitrato fueron entre un 10% y 35% en las hortalizas evaluadas. 4) Evaluar los efectos de la cantidad y calidad de la luz LED en la producción y calidad nutricional de forraje verde hidropónico en tres cereales comerciales y su efecto en la eficiencia energética y productiva en condiciones controladas. La utilización de iluminación LED con espectros específicos del T2 y T3 en la producción de forraje verde hidropónico beneficia la productividad e incrementa la eficiencia del uso de agua y energía, y potencia la conversión de semillas a forraje en las tres especies forrajeras evaluadas. Como conclusión general de este trabajo se puede decir que, en el futuro, la cantidad y la homogeneidad de los nutraceuticos y la fisiología podrá ser determinada y elegida para los diferentes cultivares y una luminotecnica medioambientalmente sostenible nos permitirá modular la naturaleza y contenidos saludables de la producción agrícola sostenible.