

Universidad de Granada
E.T.S. DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS
Departamento de Ingeniería Civil

Universidad de Almería. Campus Internacional de excelencia CIA₃
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
Departamento de Producción Vegetal
Departamento de Ingeniería Rural

TESIS DOCTORAL

Sistema híbrido de iluminación para el desarrollo de plantas

Aplicación en Invernaderos

Eva M^a Almansa Espín



Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Eva María Almansa Espín
D.L.: GR 1220-2012
ISBN: 978-84-695-1175-6

SISTEMA HÍBRIDO DE ILUMINACIÓN PARA EL DESARROLLO DE PLANTAS APLICACIÓN EN INVERNADEROS

Memoria presentada para aspirar al Grado de Doctora por la
Universidad de Granada

EVA MARÍA ALMANSA ESPÍN

Fdo.: Eva M^a Almansa Espín

LOS DIRECTORES DE TESIS

Prof. Dra. Rosa M^a Chica Moreno¹

Dr. D. Antonio Espín Estrella²

Prof. Dra. M^a Teresa Lao Arenas³

¹Departamento de Ingeniería Rural. Escuela Superior de Ingeniería.
Universidad de Almería. Campus Internacional de excelencia CIA₃

²Departamento de Ingeniería Civil. E.T.S. de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos. Universidad de Granada.

³Departamento de Producción Vegetal. Escuela Superior de Ingeniería.
Universidad de Almería. Campus Internacional de excelencia CIA₃

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Dr. Antonio Espín Estrella, por ofrecerme la oportunidad de realizar esta investigación bajo su apoyo y tutela.

A la profesora Dra. Rosa M^a Chica Moreno, por su iniciación en la luminotecnia y sus aportaciones en dicho campo, además de su interés por conseguir enfocar este trabajo en su principio.

A la profesora Dra. M^a Teresa Lao Arenas, por sus impagables correcciones y sugerencias, por su colaboración en el laboratorio y por su inestimable amistad. Gracias a su empeño este trabajo se ha podido realizar.

A mi compañera de análisis y amiga Blanca M^a Plaza Herrada, por sus consejos y su apoyo en esta investigación.

A la profesora Dra. Silvia Jiménez Becker, por poner sus conocimientos a mi disposición y su inestimable apoyo.

A Dr. Francisco Javier Barbero Francisco, por su préstamo de tiempo y de LICOR (espectrorradiómetro), gracias a él pudimos tomar datos espectrales necesarios para este trabajo.

A mi queridísimo marido, por su paciencia, apoyo, colaboración en el trabajo de campo y de laboratorio y por todas las horas que le he robado.

A mi familia, gracias por entender mis aspiraciones y compartir conmigo mis ganas de “saber más” para “hacer mejor”.

A ALMERIPLANT, empresa productora agrícola por sus importantísimas aportaciones de material vegetal para los ensayos de este trabajo.

“Hay dos maneras de difundir la luz... ser la lámpara que la emite, o el espejo que la refleja”

Lin Yutang

RESUMEN

Los injertos de tomate, melón y sandía tienen su mayor desarrollo en el sector hortícola almeriense. Viveros y semilleros son los que más han apostado por invertir en el acondicionamiento de cámaras de germinación de plántulas, cultivo para planta injertada y propagación de esquejes, además de plantas ornamentales, con uso de iluminación artificial, ya que la luz es uno de los factores medioambientales más limitantes para el crecimiento vegetal.

El tipo de lámparas más difundido en los semilleros corresponde a las fluorescentes estándares TLD y fluorescencia de alta eficacia TL5. Ambas presentan ventajas como amplio espectro y bajo coste frente al espacio que ocupan, sin embargo, tienen un alto impacto ambiental por el alto contenido en Hg y su espectro es pobre en la región del azul.

En este trabajo se apuesta por otras técnicas de iluminación más eficientes y actuales que mejoren la calidad espectral sobre el dosel vegetal y, como consecuencia, un mejor desarrollo de las plántulas de tomate, y la influencia de la luz cuando éstas son injertadas y, en el caso de ciertas plantas ornamentales, mejor conocimiento de las necesidades lumínicas. Para ello nos propusimos usar fuentes de luz fluorescentes estándares, lámparas fluorescentes compactas o de bajo consumo y tecnología LED. Teniendo en cuenta la distribución espectral de las lámparas usadas optamos por buscar la posibilidad de mejorar la zona del espectro en longitudes de onda (λ) comprendidas entre 300-500 nm y 600-700 nm. Para ello, los LEDs debían presentar su máxima emisión en dichas regiones.

Para poder hacer un estudio de la materia vegetal (plántulas, planta injertada y ornamentales) en el laboratorio, diseñamos una mesa de pruebas basada en las bandejas portadoras de injertos usadas en semilleros y viveros. Recurrimos a un software informático de iluminación para la planificación de los ensayos, donde son importantes salidas tales como disposición y número de lámparas, iluminancia, imágenes virtuales de la instalación y eficiencia energética para contrastar estos ensayos. Tras estos ensayos se ha conseguido una evaluación del efecto de la luz artificial sobre plántulas de tomate, injertos de tomate y plantas ornamentales, *Dieffenbachia compacta* y *Fittonia verschoffeltii*, a través de parámetros fisiológicos y químicos.

Palabras clave: fluorescentes, LED, PAR, MAR, injertos, ornamentales, biomasa, auxina, prolina, carbohidratos, almidón, nutrientes.

ABSTRACT

Grafted plants like tomato, melon and watermelon, have their greatest development in the horticulture sector in Almería. Nurseries and nurseries-stocks opted to invest in the refurbishment of seedling germination chambers, and culture for plant propagation of cuttings grafted, as well as ornamental plants, with the use of artificial lighting, due light is one of the factors more restrictive environment for plant growth.

The most widespread type of lamps in nurserystock corresponds to standard fluorescent lamps TLD and high-efficiency fluorescent TL5. Both have advantages like low cost and broad spectrum against the space they occupy, however, have a high environmental impact by the high content of Hg and poor spectrum in the blue region.

In this work, commitment by other more efficient lighting techniques that enhance current and spectral quality on plant canopy and, consequently, a better vegetative growth of seedlings for grafting, graft highest quality to increase yields of plant production horticulture and in the case of certain ornamental plants, improved knowledge of lighting needs. To do this we decided to use standard fluorescent light sources, compact fluorescent or low energy and LED technology.

Taking into account the spectral distribution of the lamps used chose to seek the possibility of improving the area of the spectrum at wavelengths (λ) between 300-500 nm and 600-700 nm. For this, the LEDs should submit their maximum emission in these regions. To make a study of plant material (seedlings, grafted plants and ornamentals) in the laboratory, we designed a table-based test grafts carrying trays used in nurseries and greenhouses. We use computer software for planning lighting of the trials. Output such as layout and number of lamps, illuminance, virtual images of the installation, energy efficient lighting and other calculations are important to contrast our tests. Following these tests has been has achieved an evaluation of the effect of artificial light on tomato seedlings, grafts of tomato and ornamental plants, *Dieffenbachia compact* and *Fittonia verschaffeltii* through physiological and chemical parameters.

Keywords: fluorescent, LED, PAR, MAR, grafts, ornamental, biomass, auxin, proline, carbohydrates, starch, nutrients.

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE GENERAL	9
ÍNDICE DE FIGURAS	14
ÍNDICE DE TABLAS	17
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	19
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	23
1. <i>El sector agrícola en Andalucía. Sistemas de producción agrícola en Almería</i>	23
2. <i>Aplicación de iluminación artificial en la producción agrícola</i>	26
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	28
1. <i>La luz y las plantas</i>	28
1. 1. <i>Conceptos básicos de la luz y la radiación solar</i>	28
1. 2. <i>Importancia de la luz en el desarrollo de plantas y cultivos: Fotosíntesis, PAR y MAR</i>	32
1. 3. <i>Iluminación artificial en sistemas de producción agrícola</i>	34
1. 3. 1. <i>Magnitudes y unidades de medida: fotométricas y radiométricas</i>	34
1. 3. 2. <i>Fuentes de iluminación artificial comunes en uso agronómico</i>	37
1. 3. 2. 1. <i>Lámparas incandescentes</i>	39
1. 3. 2. 2. <i>Lámparas de alta intensidad de descarga</i>	40
1. 3. 2. 3. <i>Lámparas fluorescentes</i>	41
1. 3. 2. 4. <i>Nuevas fuentes de iluminación: LED o diodo emisor de luz</i>	43
1. 3. 3. <i>Luminarias</i>	45

2. <i>Técnicas de producción agrícola con iluminación artificial</i>	46
2. 1. <i>El injerto</i>	46
2. 2. <i>Plántulas hortícolas. Tomate</i>	49
2. 3. <i>Plantas ornamentales. D. compacta y F. verschaffeltii</i>	51
3. <i>Algunos parámetros fisiológicos en producción vegetal y su relación con la luz</i>	51
3. 1. <i>Biomasa, azúcares y almidón</i>	51
3. 2. <i>Auxinas y prolina</i>	53
3. 3. <i>Macronutrientes: N, P, K</i>	55
CAPÍTULO III. OBJETIVOS	57
CAPÍTULO IV. DESARROLLO METODOLÓGICO DE LOS TRABAJOS	59
1. <i>Estudio de la situación actual de las entidades agrícolas almerienses respecto al uso de iluminación</i>	59
1. 1. <i>Encuesta</i>	59
1. 2. <i>Toma de datos</i>	59
2. <i>Simulaciones con Dialux</i>	60
2. 1. <i>Cámara de cultivo</i>	60
2. 2. <i>Ajardinamiento de interior</i>	61
2. 2. 1. <i>Lámparas de descarga</i>	62
2. 2. 2. <i>Lámparas incandescentes estándares</i>	62
2. 2. 3. <i>Lámparas LEDs de colores</i>	62
3. <i>Diseño de una mesa de ensayo</i>	63
4. <i>Implantación de un sistema solar fotovoltaico</i>	64
4. 1. <i>Cálculo de los consumos medios diarios en corriente continua</i>	64
4. 2. <i>Cálculo del sistema de acumulación</i>	65
4. 3. <i>Cálculo del número de módulos fotovoltaicos</i>	65
4. 4. <i>Cálculo del número de reguladores</i>	66
5. <i>Materia vegetal y tratamiento lumínico</i>	66
5. 1. <i>Injertos de tomate</i>	66

5. 2. <i>Plántulas de tomate</i>	67
5. 3. <i>Plantas ornamentales: D. compacta y F. verschaffelti</i>	70
6. Análisis específicos	71
6. 1. <i>Calidad espectral de las fuentes de iluminación y caracterización agronómica</i>	71
6. 2. <i>Biomasa</i>	72
6. 3. <i>Determinación de Auxinas</i>	73
6. 4. <i>Determinación de Prolinas</i>	73
6. 5. <i>Determinación de Carbohidratos y Almidón</i>	74
6. 6. <i>Determinación de N, P y K</i>	75
6. 7. <i>Determinación de Clorofilas y Carotenos</i>	77
6. 8. <i>Análisis estadístico</i>	77
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	79
1. Resultados de la encuesta y medidas realizadas en entidades agrícolas	79
2. Resultados del programa de iluminación	80
2. 1. <i>Cámara de cultivo adaptada a nuestros ensayos</i>	80
2. 2. <i>Ajardinamiento de espacios de interior sin radiación luminosa natural con:</i>	84
2. 2. 1. <i>Lámparas de descarga</i>	84
2. 2. 2. <i>Lámparas incandescentes estándares</i>	86
2. 2. 3. <i>Lámparas LEDs de colores</i>	89
3. Validación del diseño de la mesa de ensayo	92
4. Viabilidad de un sistema solar fotovoltaico para la alimentación de LEDs	96
5. Ensayos	97
ENSAYO 1 <i>Calidad espectral de la iluminación artificial sobre el desarrollo de tomate injertado</i>	97
1. <i>Calidad espectral de las fuentes de luz</i>	97

2. Respuesta a la luz de plántulas injertadas de tomate	100
2. 1. Evaluación de la biomasa.....	100
2. 2. AIA y el desarrollo de la planta.....	102
2. 3. Prolina en el desarrollo de la planta.....	103
2. 4. Los hidratos de carbono, PAR y el crecimiento de las plantas	104
ENSAYO 2	105
1. Cambios en la concentración de auxina endógena en plántulas de cultivares de tomate bajo iluminación artificial	105
1. 1. Calidad espectral de las fuentes de luz.....	105
1. 2. Evaluación de la biomasa.....	107
1. 3. AIA y el desarrollo de la planta.....	112
2. Comportamiento de los bioasimilados de cultivares de tomate bajo diferentes fuentes de iluminación artificial	114
2. 1. Calidad espectral de las fuentes de luz.....	114
2. 2. Evaluación de la biomasa, carbohidratos y almidón.....	117
3. Test de prolina para la evaluación del estrés lumínico en plántulas de tomate	123
3. 1. Calidad espectral de las fuentes de luz.....	123
3. 2. Prolina en el desarrollo de la planta y relación con la luz	123
4. Contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio en plantas de tomate bajo tratamientos lumínicos	129
ENSAYO 3	136
1. Respuesta fisiológica de <i>D. compacta</i> y <i>F. verschaffeltii</i> bajo tres fuentes de iluminación artificial continua	136
1. 1. Calidad espectral de las fuentes de luz.....	136
1. 2. Evaluación de la biomasa.....	138
1. 3. AIA y el desarrollo de la planta.....	140
1. 4. Prolina en el desarrollo de la planta.....	141

1. 5. Carbohidratos totales: azúcares reductores y almidón.....	142
2. Clorofilas y carotenos bajo iluminación artificial en <i>D. compacta</i> y <i>F. verschaffeltii</i>	143
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES	146
CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	149
CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
ANEXO I. PUBLICACIONES	170
ANEXO II. ENCUESTA	176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Onda electromagnética polarizada.....	28
Figura 2. Espectro electromagnético.....	29
Figura 3. Distribución espectral de la radiación solar.....	30
Figura 4. Energía incidente sobre un metro cuadrado de superficie horizontal en un día medio de cada mes, por tramos horarios. Unidades: kilovatios-hora.....	31
Figura 5. Espectro de acción fotosintética.....	38
Figura 6. Espectro de emisión de una lámpara incandescente.....	40
Figura 7. a) Distribución espectral de la lámpara HQL® de Luxe (OSRAM) b) Distribución espectral de la lámpara Floralux (OSRAM).....	41
Figura 8. Espectros de emisión de lámparas: a) fluorescente TL-D/830 (PHILIPS) b) fluorescente compacta LUMILUX/830 (OSRAM); c) fluorescente de alta eficacia TL5/830 (PHILIPS).....	42
Figura 9. Espectro de emisión de distintos LEDs.....	44
Figura 10. Esquema de la relación entre el carbono fijado durante el día en presencia de luz, formación y almacenamiento de almidón y crecimiento en respuesta a la noche.....	52
Figura 11. Esquema de la instalación fotovoltaica para alimentar los LEDs de una mesa de ensayo	64
Figura 12. Calidad espectral medida a nivel del dosel vegetal de los diferentes tratamientos.....	70
Figura 13. Interpretación en 3D de la <i>simulación 1</i> en la mesa ensayo.....	81
Figura 14. Ejemplos de iluminación en cámaras de cultivo.....	81
Figura 15. Interpretación en 3D de la <i>simulación 2</i> en la mesa ensayo.....	82
Figura 16. Imagen tridimensional virtual del recinto ajardinado con iluminación artificial, lámparas de descarga y de bajo consumo.....	85
Figura 17. Gráfico de valores del plano S ₁ , los valores están expresados en Lux y la escala empleada es 1:63.....	85
Figura 18. Isolíneas del plano S ₂ , los valores están expresados en lux, la escala empleada es 1:21	86
Figura 19. Isolíneas del plano S ₃ , los valores están expresados en lux, la escala empleada es 1:63	86
Figura 20. Imagen tridimensional virtual del recinto ajardinado con iluminación artificial, lámparas incandescentes ORNALUX VP14E27 1xA65/E27.....	87
Figura 21. Isolíneas del plano S ₃ , los valores están expresados en lux, la escala empleada es 1:62	87
Figura 22. Isolíneas del plano S ₂ , los valores están expresados en lux, la escala empleada es 1:62	87
Figura 23. Isolíneas del plano S ₁ , los valores están expresados en lux, la escala empleada es 1:23	88
Figura 24. Izq.: curva de sensibilidad del ojo humano. Dcha.: curva de absorción de radiación por los pigmentos fotosintéticos.....	88

Figura 25. Imagen tridimensional virtual de la propuesta ajardinada. Módulos LED adosados en paredes ajardinadas e iluminación ambiental con incandescentes adosadas en techo. Superficies de cálculo vistas como planos a distintas alturas del ajardinamiento.....	90
Figura 26. Gráfico de valores de Superficie de cálculo 1, altura 1.4 m desde el suelo. Valores en Lux, Escala 1:62.....	90
Figura 27. Isolíneas de Superficie de cálculo 2, altura 1.9 m desde el suelo. Valores en Lux, Escala 1:21.....	91
Figura 28. Isolíneas de Superficie de cálculo 3, altura 2.4 m desde el suelo. Valores en Lux, Escala 1:62.....	91
Figura 29. Espectro de emisión de la lámpara LED azul.....	91
Figura 30. Espectro de absorción de clorofilas a, b y carotenoides. Espectro de visión humana.....	92
Figura 31. Imágenes de dos ensayos tomadas en mesa de pruebas. Izq.: Fluorescentes estándares combinados con LED en rojo. Dcha.: Iluminación con LED RGB en mezcla color rojo-azul (violeta).....	95
Figura 32. Espectros de lámparas comerciales tipo fluorescentes (estándar, alta eficiencia y bajo consumo) y LED obtenidos con LICOR 1800 en la mesa de pruebas.....	96
Figura 33. Calidad espectral medida con espectrorradiómetro sobre el dosel vegetal de los cuatro tratamientos lumínicos a los que se sometieron las plantas injertadas de tomate.....	98
Figura 34. a) Peso fresco (fresh weight) y b) Peso seco (dry weight), medidos en gramos, de los órganos de las plantas injertadas.....	101
Figura 35. Estatus hídrico (water status) y respuesta al estrés hídrico.....	101
Figura 36. Auxina medida en hojas a) concentración; b) capacidad de síntesis.....	103
Figura 37. Prolina en hojas de planta injertada de tomate.....	104
Figura 38. Concentración de azúcares reductores en hojas de planta injertada de tomate expresada en (a) Glucosa en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso fresco (FW: fresh weight), (b) Glucosa en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de hoja (organ).....	105
Figura 39. Ratio TDW:TFW frente TDW respecto (a) los cultivares y (b) tratamientos.....	111
Figura 40. Concentración de auxinas en hojas de plántulas de tomate ($\text{mg}\cdot\text{órgano}^{-1}$).....	113
Figura 41. Relación entre el peso seco total (TDW) y concentración de Auxina.....	114
Figura 42. Calidad espectral medida sobre el dosel vegetal (plántulas de tomate).....	115
Figura 43. Pesos de las particiones en cultivares: hoja (L), tallo (S), raíz (R) y TDW.....	118
Figura 44. Distribución de la biomasa (%) entre órganos dependiendo de la fuente de iluminación.....	119
Figura 45. Estatus hídrico expresado como TFW:TDW dependiente de la fuente de luz utilizada. El programa Excel se usó para representar este parámetro en gráfica tipo radial.....	120
Figura 46. Capacidad de síntesis de: azúcares, almidón e hidratos de carbono (TCHs) medidos en $\text{mg}\cdot\text{organ}^{-1}$ (eje izquierdo); Peso seco total en g (eje derecho).....	122
Figura 47. Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate.....	125

Figura 48. Relación porcentual de la capacidad de síntesis de prolina en hoja (LPSC) respecto a la media de LPSC estudiada en los cultivares	126
Figura 49. Coeficientes de correlación entre las regiones espectrales (nm) y la concentración de prolina en hojas medida en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ FW	128
Figura 50. Relación del Nitrógeno total (N) y peso seco (DW) en el crecimiento de tomates bajo iluminación artificial	131
Figura 51. Relación entre Fósforo total (P) y peso seco (DW) en el crecimiento de tomates bajo iluminación artificial	132
Figura 52. Relación N:P:K de los cultivares bajo iluminación artificial con lámparas fluorescentes de bajo consumo (CF), alta eficacia (TL5) y estándares (TLD)	135
Figura 53. Peso fresco total (a) y peso seco total (b) de <i>D. compacta</i> y <i>F. verschaffeltii</i> tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5... ..	139
Figura 54. Pesos de las particiones en % de <i>D. compacta</i> (a) y <i>F. verschaffeltii</i> (b) tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5... ..	140
Figura 55. Ácido 3-indol-acético (AIA), niveles en hojas tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5	141
Figura 56. Niveles de prolina en hojas tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5	142
Figura 57. Contenidos en hoja de almidón y azúcares en <i>D. compacta</i> y <i>F. verschaffeltii</i> tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial (fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5)	143
Figura 58. Capacidad de producción en % de Clorofila A	144
Figura 59. Capacidad de producción en % de Clorofila B	145
Figura 60. Capacidad de producción en % de carotenos	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Regiones del espectro electromagnético	29
Tabla 2. Desglose de la influencia de la longitud de onda en la fisiología de las plantas por Coene	33
Tabla 3. Tabla de equivalencia de unidades de intensidad de luz.....	36
Tabla 4. Tipos y características de lámparas empleadas en iluminación de invernaderos.....	39
Tabla 5. Características básicas de los LEDs.....	44
Tabla 6. Datos de partida para las simulaciones con programa informático Dialux.....	61
Tabla 7. Iluminación por tratamientos ordenados por nivel para los injertos	67
Tabla 8. Características comerciales e industriales de los cultivares de tomates	68
Tabla 9. Características de lámparas y luminarias instaladas.....	69
Tabla 10. Iluminación de <i>D. compacta</i> y <i>F. verschaffeltii</i>	71
Tabla 11. División del espectro de una fuente de iluminación	72
Tabla 12. Gráfico de valores de iluminancia obtenidos en las 8 simulaciones con Dialux.....	83
Tabla 13. Iluminancias medias (E_m), rendimiento luminoso (η) y eficiencias energéticas (VEEI) estimadas con Dialux.....	84
Tabla 14. Resultados luminotécnicos HQL®-R 80 W DE LUXE+TC-TEL/GX24 q-5.....	85
Tabla 15. Resultados luminotécnicos ORNALUX VP14E27 1xA65/E27	87
Tabla 16. Resultado luminotécnicos ORNALUX VP14E27 1xA65/E27 100 W + GHIDINI 6503.26F.T 1x20 LED BLUE 2W.....	90
Tabla 17. Gráfico de valores en lux tomados en el suelo de uno de los niveles de la mesa de ensayo	93
Tabla 18. Iluminancias medias (E_m) y eficiencias energéticas (VEEI) en mesa de ensayo	93
Tabla 19. Diferencias porcentuales en valor absoluto de E_m y VEEI entre simulaciones y medidos en mesa de ensayo.....	94
Tabla 20. Cálculos realizados para una instalación fotovoltaica para alimentar LEDs en una mesa de ensayo situada en la provincia de Almería.....	96
Tabla 21. Caracterización agronómica de la calidad lumínica de los tratamientos en planta injertada (Wm^{-2}).....	98
Tabla 22. Ratios entre las diferentes regiones del espectro de radiación de los tratamientos lumínicos en planta injertada.....	99
Tabla 23. Caracterización agronómica de la calidad espectral de los tratamientos lumínicos sobre plántulas de tomate (Wm^{-2}).....	106
Tabla 24. Peso fresco y seco (g) de todas las particiones de las plantas y diversos ratios.....	109

Tabla 25. Relación parte aérea y radicular de los cultivares de tomate bajo iluminación artificial	111
Tabla 26. Caracterización agronómica de la calidad lumínica (Wm^{-2})	116
Tabla 27. Capacidad de síntesis de prolina en la hoja (LPSC) en ($\mu g \cdot g^{-1}$ LFW) por peso fresco de hojas (LFW) (g) de diferentes cultivares y tratamientos lumínicos	124
Tabla 28. Concentración de N, P y K en plantas de tomate en periodo de germinación y crecimiento antes de su trasplante	130
Tabla 29. Valores y análisis estadístico (Test de Tukey $p < 0.05$) de los ratios N:P, N:K y P:K	132
Tabla 30. Caracterización agronómica de la radiación recibida por el dosel vegetal en distintos tratamientos lumínicos con fluorescentes de alta eficiencia, fluorescentes estándares y fluorescentes estándares enriquecidos con LEDs mezcla color	136
Tabla 31. Niveles de clorofilas y pigmentos encontrados en <i>D. compacta</i> y <i>F. verschaffeltii</i> bajo tratamiento continuo de luz artificial de diferentes fuentes de luz: fluorescentes estándares (TLD), fluorescentes estándares enriquecidos en R y B con LEDs (TLD+LEDs), fluorescentes de alta eficacia (TL5)	144

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A	Amperio
‘A’	Atlético
Ah	Amperio-hora
AIA	Ácido 3-indol-acético, auxina
ALUM	Aluminum
‘A_N’	Anemon
ARNm	Ácido ribonucleico mensajero
ASIF	Asociación de la industria fotovoltaica
ATP	Adenosina-5'-trifosfato
B	Blue, radiación comprendida entre los 400-500 nm (región espectral del azul)
B	Campo magnético
‘B’	Bigram
BR-LEDs	Blue Red Light Emitting Diodes
C	Capacidad necesaria del sistema de acumulación
C	Carbono
‘C’	Cornabel
CA	Corriente alterna
cd	Candela
CaOx	Oxalato de calcio
CC	Corriente continua
CF	Fluorescentes compactas
Chla	Clorofilas a
Chlb	Clorofilas b
‘C_{ON}’	Conquista
CTE	Código técnico de la edificación
D	Día
‘D’	Delizia
DN	Denon electronics brand
DW	Peso seco
DWLS	Peso seco de hoja + peso seco de tallo
(E)	Campo eléctrico
E	Iluminancia
E	Energía en Wh
Ecc	Consumo medio diario en continua
EIE	Energía inteligente para Europa
Et	Energía total consumida en Wh/día
Ff5	<i>Cladosporium 5</i>

FIAPA	Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería
Fig	Figura
Fol	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i>
For	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>radicis lycopersici</i>
FR	Radiación comprendida entre 700-800 nm (región espectral del rojo lejano)
Fs	Factor de seguridad de la instalación fotovoltaica
FW	Peso fresco
Godm	Media diaria de la irradiación global por metro cuadrado
h	Hora
Hg	Mercurio
HID	Lámparas de alta intensidad de descarga
HIR	Respuestas de alta intensidad
HISP	Lámparas que aportan alta radiación y corto fotoperiodo
HPS	Lámparas de alta presión sodio
HR	Humedad relativa
HRGP	Glicoproteínas ricas en hidroxiprolina
Hz	Hertzio
I	Intensidad luminosa
‘I’	Ikram
Imp	Corriente a máxima potencia de celdas fotovoltaicas
IP	Índice de protección
Ir	Intensidad del regulador fotovoltaico
IRC	Índice de reproducción cromática
IRCoRa	Rendimiento de color de una fuente de luz
Isc	Corriente de cortocircuito
Isr	Intensidad a soportar el regulador
J	Julio
K	Potasio
K_B	Constante de Boltzman ($1.380658 \cdot 10^{-23}$ J/K)
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulio
kWh	Kilovatio-hora
L	Luminancia
‘L’	Linna
LED	Light-Emitting Diode (diodo emisor de luz)
LFW	Peso fresco de hoja
LILP	Lámparas que aportan baja radiación y fotoperiodo largo
lm	Lumen
LPSC	Capacidad de síntesis de prolina de la hoja
LSD	Prueba de mínima diferencia significativa (análisis estadístico)

LSDW	Pesos secos de hojas y tallos (peso seco de la parte aérea vegetal)
lx	Lux
m	Metro
M	Calibre de fruto del tomate
M	Concentración Molar
MAR	Radiación morfogenéticamente activa
MARM	Ministerio de medio ambiente, medio rural y marino
min	Minuto
‘M_o’	Montenegro
‘M_y’	Myriade
N	Nitrógeno
NAD⁺	Nicotinamida adenina dinucleótido en su forma oxidada
NADH	Nicotinamida adenina dinucleótido en su forma reducida
NADP	Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato
NIR	Infrarrojo cercano (700-1100 nm)
nm	Nanómetro
N_p	Número de módulos fotovoltaicos
N_{pp}	Número de módulos en paralelo
N_r	Regulador por instalación
P	Potencia en vatios
P	Fósforo
‘P’	Prodigy
Pac	Pérdidas de rendimiento en el sistema acumulador
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
Pcc	Potencia real
P5CS	Enzima sintetasa pirrolina-5-carboxilato
PDH	Enzima prolina deshidrogenasa
PE	Polietileno
P_{FR}	Pigmentos que absorben rojo lejano
Phys	Sistema fitocromo
PPF	Flujo de fotones fotosintéticos
ppm	Partes por millón
P_R	Pigmentos que absorben en rojo
PSII	Fotosistema II
R	Radiación comprendida entre 600 -700 nm (región espectral del rojo)
‘R’	Rambo
RDW	Peso seco radicular
Re	Relación mes consumo/radiación mensual
RGB	Red - green - blue colors
Rm	Radiación mensual

ROS	Especies reactivas de oxígeno
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo
S	Superficie
‘S’	Saladar
SMD	Surface Mount Device
sr	Estereorradián
T	Temperatura (K)
T_n	Tratamiento lumínico donde n=1, 2, 3, 4
TCS	Transmission Control System
TDW	Peso seco total
TFW	Peso fresco total
TL5	Tubular Lamp with the diameter of the bulb in eighths of an inch 5/8”
TLD	Tubular Lamp Don’sbulb
T_{n=1-4}	Tratamiento lumínico
ToMV	<i>Tomato mosaic virus</i>
TOV	Tomate en la vid
TSWV	<i>Suntan Tomato Spotted Wilt Virus</i>
TYLC	<i>Spoon Tomato Spotted Wilt Virus</i>
UV	Radiación ultravioleta comprendida entre 200-400 nm
V	Tensión del sistema de acumulación, voltio
V	Volumen en litros
V	<i>Verticillium</i>
‘V’	Velasco
Va	<i>Viral amplicon</i>
Var	Variedad
Vd	<i>Verticilium dahliae</i>
VEEI	Eficiencia energética
v/v	Relación en volumen
W	Vatio
Wh	Vatio-hora
‘Z’	Zaino
α	Ángulo
Ø	Diámetro
μ	Micro
μE	Microeinsteins
η	Rendimiento luminoso
λ	Longitud de onda (nanómetros)
Φ	Flujo luminoso
ω	Ángulo sólido

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. El sector agrícola en Andalucía. Sistemas de producción agrícola en Almería

Andalucía es la principal región hortofrutícola europea, representando entorno al 8% de la producción total agraria. Presenta una enorme diversidad que le permite obtener una amplia gama de frutas y hortalizas. El sector de la agricultura andaluza, es vital para la economía general, ya que presenta el 39% del valor de la producción total agraria, alcanzando en 2005 los 4.090 millones de euros. Su papel en el comercio exterior es también fundamental, con exportaciones que en el año 2006 alcanzaron la cifra de 2.461 millones de euros, frente a los 197 millones de euros de importaciones. El 97 por ciento de las exportaciones hortofrutícolas andaluzas tienen como destino alguno de los países de la Unión Europea siendo, por tanto, residual las relaciones comerciales con países terceros (De Pablo y García, 2007).

La importancia económica de las especies ornamentales también es muy elevada. Las cifras de la exportación de planta y flor en los últimos años rondan los 218 millones de euros anuales (ICEX, 2009). No hay que olvidar el escaso número de hectáreas dedicadas a planta y flor respecto a otras producciones mayoritarias como hortalizas, cítricos y frutales. Según MARM (Ministerio de medio ambiente, medio rural y marino) en el año 2007, la distribución de la producción y la superficie de especies ornamentales en Andalucía corresponden al 35% y al 18% respectivamente.

No obstante, la comercialización y la producción en Almería presenta cifras cada vez mejores, pero la realidad es que el sector se encuentra en situación de descenso lento de la rentabilidad, tanto productiva como comercial (De Pablo y Pérez, 2002a, 2004b). En los últimos años el incremento de los costes productivos supera el de los ingresos, dando como resultado un descenso en el margen de beneficio del agricultor en un 33%. En el 2008, se estimaron en Almería 47531 ha de cultivos hortícolas del total en Andalucía estimado en 122865 ha; sólo 10000 ha fueron destinadas al cultivo de tomate protegido bajo invernadero, con un rendimiento 106434 kg·ha⁻¹ dando una producción de 10.643.400 kg. (Anuario de Estadística 2009 del MARM). La producción almeriense presenta como productos típicos: berenjena, calabacín, judías verdes, melones, pepino, pimiento, sandía y tomate. Hortalizas como el tomate a pesar de la

competencia se ha mantenido con buenos resultados al igual que el pepino, sin embargo, la sandía y el melón sufren constantes oscilaciones de precios (Colomina y Pérez, 2007).

El sistema de producción tradicional necesita cambios que no se están produciendo con la rapidez necesaria, pues hoy día existe una gran competencia en el mercado agrícola, creando necesidades de adaptación de nuestros productos hortícolas y ornamentales, tanto en producción como en calidad de productos. Por ello, Organizaciones de Productores Hortícolas junto con la Universidad de Almería, FIAPA y la Delegación Provincial de Agricultura y Pesca realizaron un análisis técnico-financiero de los sistemas de producción en los invernaderos de Almería (Salazar, 2000).

Hasta ahora, la producción agrícola en invernaderos se ha realizado de forma económica debido al uso del sistema tipo “Parral”, que es el invernadero estrella en nuestra provincia. Pero con este sistema es difícil implantar con eficacia nuevas tecnologías por ejemplo en climatización (iluminación, calefacción, etc.) para la mejora de la producción, puesto que son caras. A través de planes de modernización, han ido apareciendo nuevos sistemas de producción capaces de incluir mayor tecnología para poder competir con las necesidades de los mercados. Este trabajo comenzó por el interés que causa el uso de iluminación artificial complementaria en sistemas de producción agrícola, concretamente en invernaderos, semilleros y viveros (nurserystock).

Las estructuras de invernaderos predominantes en la provincia de Almería es el parral multicapilla simétrico (raspa y amagado) y el parral plano, este último tiende a desaparecer. El invernadero parral es una protección para cultivos muy simple, de construcción artesanal y bajo coste económico, con una estructura vertical semirrígida a base de soportes de madera (u otros materiales) ligados en su parte superior por estructura horizontal flexible como una malla doble de alambres que sujeta al material de cerramiento. Son explotaciones de pequeño tamaño con una superficie media de 2.4 ha, aunque esta dimensión se ha aumentado en los últimos años en un 30%. La altura media de estos invernaderos suele ser de 3.2 m, aunque en cumbre pueden alcanzar los 3.6 m (multicapilla simétricos), 2.7 m (parral plano) y en los nuevos multicapilla hasta 4.2 m.

Para mejorar la ventilación (cenital y lateral), disponen de ventanas en la estructura y así actuar de forma económica sobre la temperatura, la humedad relativa y niveles de CO₂. La automatización de dichas ventanas es muy cara. Los invernaderos

multicapilla, más modernos y con mayor altura en cumbrera, son los que presentan automatización de apertura y cierre de las ventanas (Pérez *et al.*, 2002).

Otra característica de este sistema es el empleo de mano de obra familiar y sólo puntualmente (recolección, levantamiento del cultivo, limpieza y siembra o trasplante) aumenta el número de trabajadores ajenos al ámbito familiar.

Los problemas fitosanitarios por la entrada de plagas al invernadero han generalizado el uso de mallas anti-insectos en las ventanas. Destaca la malla mosquitera, aunque se están introduciendo mallas de menor tamaño de poro que pueden evitar la mosca blanca (*Bemisia tabaci* y *Trialeurodes vaporariorum*) y trips (*Frankliniella occidentalis*) (Biurrun *et al.*, 2007), con el inconveniente de reducción de la ventilación, por ello el uso de ventanas cenitales abatibles como ejemplo.

Los materiales de cubierta o cerramiento más usuales que van a condicionar el microclima interior y la respuesta vegetal son el polietileno de 720 galgas de espesor (180 µm), el polietileno de 800 galgas (200 µm), el tricapa y el térmico (PE-800), donde el plástico amarillo (PE-720) predomina sobre el incoloro. La lámina de plástico también puede ser usada como acolchado, doble techo, tunelillo y material de solarización (Cobos y López, 1998).

Como sistema de cultivo, el enarenado es el más característico en invernaderos almerienses. Consiste en incorporar al suelo desnudo 10 cm de arena. Con esto se rompe la subida del agua por capilaridad, hay menor evaporación y ascenso de sales, mejor estabilidad térmica y ayuda al crecimiento radicular en superficie (Bretones, 1999). Los sustratos más comunes son lana de roca, perlita y fibra de coco. Actualmente se incorpora el cultivo hidropónico aunque sigue siendo minoritario frente al cultivo en suelo.

El sistema de riego por excelencia en superficies bajo plástico es el riego por goteo, necesario y útil frente a la escasez de recursos y las necesidades de agua de los cultivos.

Este sistema productivo es el de menor consumo de agua ya que mediante el sistema de distribución no se moja toda la superficie de suelo, las dosis de aplicación son bajas disminuyendo las pérdidas por lixiviación; la arena evita las pérdidas por evaporación y la cubierta semitransparente reduce la demanda hídrica de la atmósfera y confina la humedad. La balsa, como elemento de riego, permite regular los riegos y pueden recoger aguas pluviales para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos (Castilla, 2005).

En la actualidad, muchos de los invernaderos disponen ya de equipamientos como sistemas de refrigeración, calefacción y maquinaria. Los generadores de aire caliente (combustión directa o indirecta) y los sistemas de tuberías con agua caliente (30-45 °C) son los sistemas de calefacción más baratos y más empleados, ya que otro tipo de calefacción en las condiciones ambientales de Almería tiene dudosa rentabilidad.

El tractor y la maquinaria auxiliar son incorporados en las labores agrícolas para mantenimiento del suelo, tratamientos fitosanitarios, transporte del producto dentro de la explotación y al centro de comercialización. También para la mejora de la productividad en labores de transporte y carga dentro de la explotación. Para los tratamientos fitosanitarios se ha generalizado el uso de pulverizadores hidroneumáticos.

Los invernaderos “industriales” como el multitúnel con mejor equipamiento de control de clima se están utilizando más actualmente. Incorporan el cerramiento rígido (invernadero de vidrio tipo Venlo) con la desventaja de implicar largos períodos de amortización y exigencia técnica para su gestión. En definitiva, los sistemas de producción bajo invernadero deben dirigirse hacia un modelo productivo racional del uso de los recursos y respeto del medio ambiente con garantías de salud para consumidores y productores (Pérez et al., 2002).

2. Aplicación de iluminación artificial en la producción agrícola

La luz es un factor limitante en la producción de hortícolas y ornamentales. En ciertas ocasiones es preciso aplicar iluminación artificial o simplemente regular la iluminación natural en el interior del invernadero. Esto puede hacerse con el fin de:

- Aumentar la asimilación neta, forzando una mayor tasa de fotosíntesis durante los meses invernales. La iluminación otoño-invernal supletoria ayuda a incrementar los rendimientos productivos en la mayor parte de las especies hortícolas y en numerosas ornamentales (*Dianthus*, *Anthurium*, *Gerbera*, orquídeas, etc.).
- Aumentar la duración del día, bien incrementando las horas de luz recibidas por la planta o mediante la rotura del periodo oscuro para:
 - a) Inducción floral en plantas de día largo durante el periodo otoño-invierno. Destaca su empleo en plantas ornamentales como *Anthirrinum*, *Dahlia*, *Calceolaria*, *Begonia tuberosa*, etc.

- b) Inhibición de la inducción floral para favorecer el crecimiento vegetativo en el periodo en que se vería incrementada la floración sin que las plantas tuvieran el adecuado tamaño y/o mantener la planta en estado vegetativo para la obtención de esquejes (crisantemo, Poinsetia, Kalanchoe, etc.).

Aunque los invernaderos multitúnel y tipo parral presentan una transmisividad lumínica aceptable, en algunos casos, es necesario aumentar la radiación solar incidente dentro de los invernaderos de la costa mediterránea española, especialmente en otoño e invierno. Esto se ha debido a las mayores pendientes de la cubierta en su construcción (orientación) y en la incorporación de mayor nivel tecnológico en cuestión de equipamiento (Castilla, 2001). Para ello habría que mejorar su transmisividad o en su defecto, aportar iluminación artificial complementaria. Pero el mayor inconveniente que nos encontramos es que las tecnologías para las mejoras en las estructuras de los invernaderos, automatización de los riegos y métodos eficientes del control climático (calefacción, refrigeración, incorporación de CO₂, iluminación artificial, etc.) con el objeto de sacar productos de mayor calidad y alargar las campañas de producción durante todo el año (Castilla, 2005) son muy caras, con lo que añadido al valor del suelo en estas zonas de litoral y debido al valor del producto resulta en algunos casos inviable su implantación para la mayoría de los agricultores.

Sin embargo, en Almería, viveros y semilleros (nurserystock) son los que más han apostado por invertir en el acondicionamiento de cámaras de germinación de plántulas, cultivo para planta injertada y propagación de esquejes, además de plantas ornamentales, con uso de iluminación artificial, ya que la luz produce respuestas morfológicas en las plantas (Hayward, 1984; Sager et al., 1988; Smith, 1994; Ballaré y Casal, 2000; Lin, 2000; Taiz y Zeiger, 2002; Pérez et al., 2006; Runkle y Heins, 2006), y es un factor de estrés (fotoinhibición y/o efecto fotodestructivo) (Larcher, 2001).

De aquí, que nuestro trabajo se haya centrado en el estudio y análisis sobre la respuesta tanto de plántulas de tomate, como de injertos y algunas plantas ornamentales ante su exposición a iluminación artificial con varios tipos de lámparas y distinta calidad espectral, con el fin de obtener productos de máxima calidad para su posterior comercialización.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

1. La luz y las plantas

1. 1. Conceptos básicos de la luz y la radiación solar

La imagen clásica de la luz (Fig. 1) es la de la onda compuesta de campos eléctrico (E) y magnético (B) oscilantes cuyos vectores son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección en la que viaja la onda.

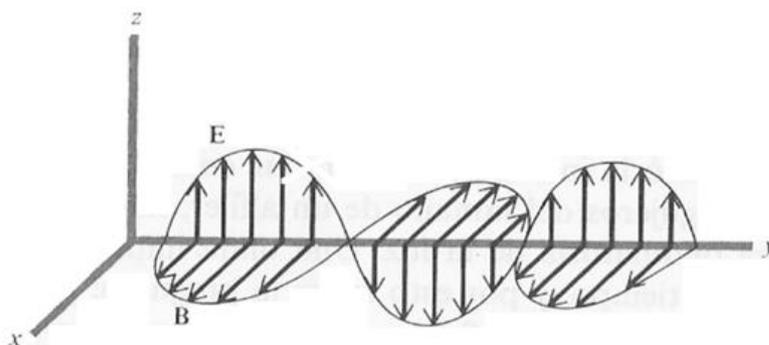


Figura 1. Onda electromagnética polarizada (Levine, 1992)

La luz emitida por átomos o moléculas calentados (como en la luz solar) es no polarizada, con los vectores de campo eléctrico apuntando en diferentes direcciones para diferentes puntos del espacio debido a que las partículas actúan independientemente unas de otras. Una onda electromagnética puede tener cualquier frecuencia (Hz o s^{-1}) que es el número de ciclos que pasan por un punto dado en la unidad de tiempo. Un ciclo es la parte de la onda que hay entre dos crestas sucesivas. La longitud de onda λ (nm) es la distancia entre crestas sucesivas y el espectro electromagnético es el rango de frecuencia y longitudes de onda de las ondas electromagnéticas (Levine, 1992). El espectro electromagnético se divide en varias regiones (Pérez *et al.*, 2006), figura 2 y tabla 1.

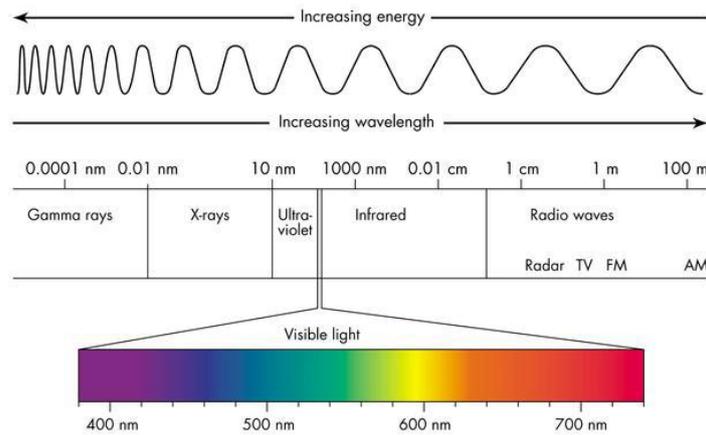


Figura 2. Espectro electromagnético (Army, 2005)

Tabla 1. Regiones del espectro electromagnético (Hernández, 2002)

Color	Rango de longitud de onda (nm)	Longitud de onda representativa	Frecuencia (Ciclos/s) Hz	Energía (kJ/mol)
Ultravioleta	<380	254	11.8×10^{14}	471
Violeta	380-436	410	7.31×10^{14}	292
Azul	436-495	460	6.52×10^{14}	260
Verde	495-566	520	5.77×10^{14}	230
Amarillo	566-589	570	5.26×10^{14}	210
Anaranjado	589-627	620	4.84×10^{14}	193
Rojo	627-730	680	4.41×10^{14}	176
Infrarrojo	>730	1400	2.14×10^{14}	85

El Sol es un astro compuesto por plasma o gases a alta temperatura, sobre todo Hidrógeno y Helio, con una masa total $2.2 \cdot 10^7$ T (unas 334,000 veces la masa de la Tierra) que emite energía $3.76 \cdot 10^{14}$ TW de la cual, el planeta Tierra, sólo intercepta 173,000 TW. Que sólo esta cantidad de energía sea recibida a pesar de la gran cantidad disponible del Sol se debe a obstáculos como la Atmósfera, por los movimientos del planeta y la inclinación del eje terrestre. La radiación solar normal incidente en la atmósfera terrestre tiene la distribución espectral indicada en la figura 3. Los rayos X y otras radiaciones de onda corta del espectro solar, son absorbidos en gran proporción en la ionosfera por el N₂, O₂ y otros componentes atmosféricos. La mayor parte del ultravioleta queda absorbido por el O₃.

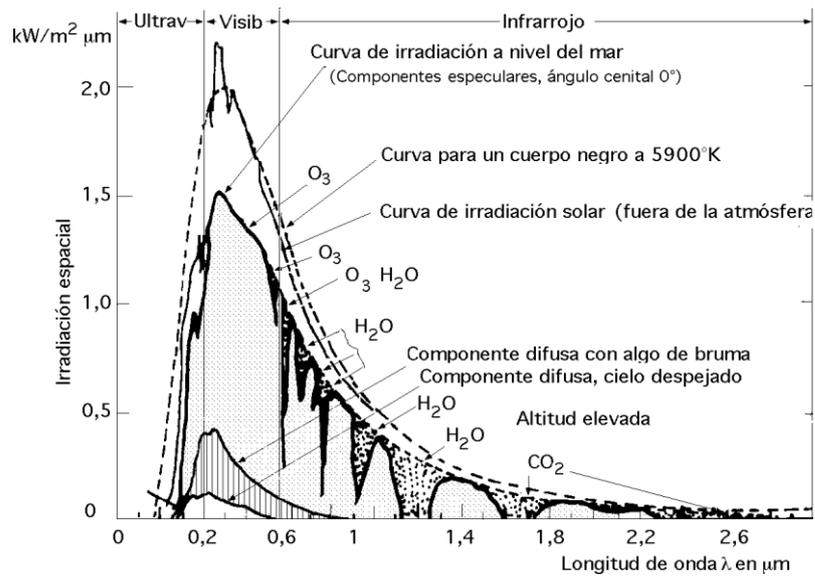


Figura 3. Distribución espectral de la radiación solar (Apuntes de procesos termosolares en alta, media y baja temperatura)

La radiación solar es esencial para el desarrollo de los cultivos de muchas maneras: mediante la fotosíntesis, se produce el crecimiento de los cultivos y el desarrollo de combustibles (Ballaré y Casal, 2000). A través de la fotosíntesis esta energía de la radiación se fija en las plantas en forma de energía química latente. Por lo tanto, la radiación es la principal fuente de energía para la síntesis de materia orgánica, y la regulación del balance de calor y el agua de la tierra que proporciona la energía necesaria para la vida en la tierra. Para las plantas, no es sólo una fuente de energía (efecto foto energético), sino que funciona también como un estímulo para los procesos de desarrollo y, en ocasiones, como un factor de estrés (efecto foto inhibitorio o foto destructivo). Cada uno de estos efectos se desencadena por la absorción de cuantos de luz y cada proceso es mediado por fotorreceptores muy específicos con espectros de absorción que se corresponden con el espectro de acción de los procesos foto biológicos. El tiempo, duración, dirección de incidencia y la composición espectral, son factores importantes de la radiación entrante (Lacher, 2001).

Respecto al aprovechamiento de la energía solar, actualmente existen planes y programas que fomentan la implantación de tecnologías de generación eléctrica a partir de fuentes renovables, para reducir nuestra tasa de dependencia energética del exterior, mejorar la eficiencia y disminuir la aportación al consumo de las fuentes energéticas vinculadas a los combustibles fósiles, habiéndose fijado como objetivos que en el año 2020 el 20% de la energía primaria consumida en España sea de origen renovable y un consumo menor del 20% de CO₂. Con ello se pretende mejorar la situación

medioambiental, contribuir a la mayor calidad de vida de los ciudadanos, y mejorar la competitividad de la economía (ASIF, 2009).

Almería, situada al sureste de España, corresponde a la zona climática V definida por el Código Técnico de la Edificación publicado en el 2007. La Godm o media diaria de la irradiación global por metro cuadrado de superficie horizontal en esta zona corresponde a 5.138 kWh y la total anual, 1875.302 kWh (Fig. 4).

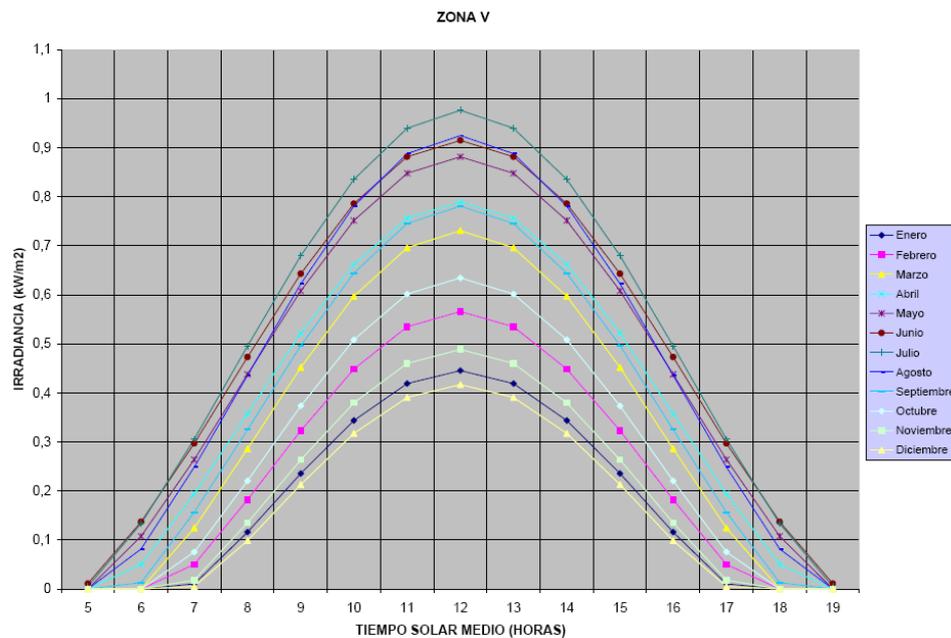


Figura 4. Energía incidente sobre un metro cuadrado de superficie horizontal en un día medio de cada mes, por tramos horarios. Unidades: kilovatios-hora m⁻²

Considerando la distribución de energía solar recibida en Almería, las necesidades energéticas de un diseño de ajardinamiento en interior, el rendimiento de las placas fotovoltaicas y que el actual Código Técnico de la Edificación potencia el uso de energía solar fotovoltaica, se puede estimar la superficie necesaria para la producción energética a través de energía solar fotovoltaica para generar un modelo sostenible.

1. 2. Importancia de la luz en el desarrollo de plantas y cultivos: fotosíntesis, PAR y MAR

La fotosíntesis es un proceso que ocurre en dos fases. La primera fase es donde se depende de la luz (reacciones luminosas), requiere la energía directa de la luz que genera los transportadores que son utilizados en la segunda fase. La fase independiente de la luz (reacciones de oscuridad) se realiza cuando los productos de las reacciones de luz son utilizados para formar enlaces covalentes carbono-carbono (C-C), de los carbohidratos. Las reacciones oscuras pueden realizarse en la oscuridad, con la condición de que la fuente de energía (ATP) y el poder reductor (NADPH) formados en la luz se encuentren presentes (Barceló *et al.*, 2000). Investigaciones recientes sugieren que varias enzimas del ciclo de Calvin son activadas por la luz mediante la formación de grupos -SH, de tal forma que el término reacción de oscuridad no es del todo correcto. Las reacciones de oscuridad se efectúan en el estroma; mientras que las de luz ocurren en los tilacoides (Azcón-Bieto y Talón, 2000). Tanto el estroma como el tilacoide están presentes en los cloroplastos. Son los tilacoides los que contienen pigmentos fotosintéticos o fotosistemas I y II. El fotosistema I está asociado a las formas de clorofila a, que absorbe a longitudes de onda de 700 nm (P700), mientras que el fotosistema II tiene un centro de reacción que absorbe a una longitud de onda de 680 nm (P680). Cada uno de estos fotosistemas se encuentra asociado a polipéptidos en la membrana tilacoidal y absorben energía luminosa independientemente. En el fotosistema II, se produce la fotólisis del agua y la liberación de oxígeno, sin embargo ambos fotosistemas operan en serie, transportando electrones a través de una cadena transportadora de electrones. En el fotosistema I se transfieren dos electrones a la molécula de NADP^+ y se forma NADPH, en el lado de la membrana tilacoidal que mira hacia el estroma (Buchanan *et al.*, 2000; Salisbury y Ross, 2000).

Además, la luz induce respuestas morfogénicas (Hayward, 1984; Sager *et al.*, 1988; Smith, 1994; Ballaré y Casal, 2000; Lin, 2000; Taiz y Zeiger, 2002; Pérez *et al.*, 2006) y ocasionalmente actúa como un factor de estrés (fotoinhibición y/o efecto fotodestructivo) (Larcher, 2001).

Las plantas poseen fotosensibilidad en la que sólo una parte de la luz visible interviene en la fotosíntesis (asimilación) o zona PAR, $\lambda = 400\text{-}700$ nm, siendo PAR la radiación fotosintéticamente activa la cual constituye el 45-50% de la energía recibida

(Castilla, 2005). La radiación PAR participa en la producción de biomasa vegetal (Plénet *et al.*, 2000).

Paralelamente al concepto de PAR apareció la MAR o radiación morfogenéticamente activa. La MAR es una región discontinua del espectro relacionada con la absorción en receptores de ultravioleta, fitocromos y criptocromos. Dentro de la MAR, la región del rojo (R) (600-700 nm) (Taiz y Zeiger, 2002) y rojo lejano (FR) (700-800 nm) influyen fuertemente en la fotomorfogénesis (Pérez *et al.*, 2006). La luz UV es la que más afecta genéticamente al trigo, éste como mecanismo de defensa se adapta a la UV en cada región (Pinto *et al.*, 2000).

La respuesta de las plantas a la longitud de onda se expone en la tabla 2 (Coene, 1995). Dorais (2003) comentó que el sistema fitocromo (Phys, 350-800 nm) regula los eventos metabólicos que se traducen en respuestas de adaptación, tales como la longitud del tallo, forma de hoja y su grosor, y el reparto de carbono entre órganos de la planta. Los receptores del criptocromo (320-500 nm) y UV-B (UV-B, 280-350 nm), son otros dos tipos de fotorreceptores que participan en la apertura de los estomas, en el color de la hoja y su grosor, y en la elongación del tallo.

Tabla 2. Desglose de la influencia de la longitud de onda en la fisiología de las plantas por Coene (1995)

Longitudes de onda (nm)	Respuestas de la planta
280 - 315	Los procesos morfológicos y fisiológicos de la planta se ven influenciados
315 - 400	La clorofila absorbe un poco esta luz, el fotoperiodo es influenciado frenando el alargamiento de las células
400 - 520	Gran absorción de luz por la clorofila y los carotenoides; fotosíntesis muy influenciada
520 - 610	Baja absorción de los pigmentos
610 - 720	Baja absorción en la clorofila, la fotosíntesis y el fotoperiodo están muy influenciadas
720 - 1000	Baja absorción en general; alargamiento de las células estimuladas; la floración y la germinación se ven influenciadas
Por encima de 1000 nm (nanómetro)	La energía absorbida se convierte en calor

1. 3. Iluminación artificial en sistemas de producción agrícola

1. 3. 1. Magnitudes y unidades de medida: fotométricas y radiométricas

Los conceptos más importantes a tener en cuenta en iluminación con lámparas eléctricas desde el punto de vista fotométrico son (Jiménez, 1997; Espín *et al.*, 2009):

a) *Flujo luminoso* Φ , definido como potencia de energía radiante que proporciona una lámpara. Se mide en lúmenes (lm). Un lumen es la unidad de flujo luminoso, y corresponde al flujo luminoso emitido por una fuente puntual con una intensidad luminosa de una candela en un ángulo sólido de un estereorradián.

b) *Rendimiento luminoso* η , es la relación entre el flujo luminoso emitido y la energía eléctrica necesaria para producirla (potencia consumida). Se mide en $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$.

$$\eta = \frac{\phi(\text{lm})}{P(\text{W})} \quad (1)$$

c) *Intensidad luminosa* I, que se mide en candelas. La *candela* es $\frac{1}{60}$ de la luminancia por cm^2 de un cuerpo negro a la temperatura de solidificación del platino. También, se define como intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emita radiación monocromática de frecuencia $540\cdot 10^{12}$ Hz y tenga una intensidad radiante en esa dirección de $\frac{1}{683}$ W por estereorradián (en ángulo sólido ω). También, en 1979 se adaptó una nueva definición de candela, indicando que es la intensidad luminosa de una fuente de 555 nm cuya intensidad de radiación es $\frac{1}{683} \frac{\text{W}}{\text{sr}}$. Su símbolo es cd ($\text{cd} = \frac{\text{lm}}{\text{sr}}$).

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2)$$

d) *Luminancia* L, es la intensidad luminosa por unidad de superficie aparente, procedente de una fuente de luz. Se mide en $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2} = \text{nit}$, y viene dada por:

$$L = \frac{I}{S'} = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha} \quad (3)$$

siendo “I” la intensidad luminosa de la fuente en cd.

Permite medir la cantidad de luz que incide sobre un plano inclinado un cierto ángulo “ α ” con la dirección del rayo de luz que viene de la fuente luminosa.

e) *Iluminancia* E, flujo luminoso (Φ) que incide sobre una superficie dividido por el área de dicha superficie (S). Se mide en lux (lx). $Lx = lm \cdot m^{-2}$

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (4)$$

f) *Eficiencia energética* VEEI, razón entre la potencia instalada P (W), la superficie iluminada (m^2) y la iluminancia media E_m ($W/m^2 \cdot lx$ en 100 lx) (CTE, 2007).

$$VEEI = \frac{P \cdot 100}{S \cdot E_m} \quad (5)$$

Desde el punto de vista radiométrico son importantes destacar las magnitudes (Pérez *et al.*, 2005):

a) *Energía radiante*, energía emitida, transferida o recibida en forma de radiación. Unidades: Julio (J), vatio-segundo ($W \cdot s$).

b) *Energía luminosa*, cantidad de luz, ponderada por su acción sobre el ojo humano, radiada o recibida por un período de tiempo. Unidad: Lumen-segundo ($lm \cdot s$)

c) *Flujo radiante*, la velocidad del flujo de la energía de una fuente de radiación. Unidades: Julio por segundo ($J \cdot s^{-1}$), vatio (W).

d) *Irradiancia*, la densidad de flujo radiante incidente sobre una superficie. Unidades: vatios por metro cuadrado ($W \cdot m^{-2}$).

e) *Eficiencia de radiación*, la relación entre el flujo total de radiación emitida por una fuente de la radiación por energía consumida. Unidades: porcentaje (%), milivatios por vatio ($mW \cdot W^{-1}$).

Algunas constantes de conversión para unidades de luz de las mediciones fotométricas, radiométricas y cuánticas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Tabla de equivalencia de unidades de intensidad de luz (Chaves, 2003)

Multiplicar	Por	Para obtener	Autor
1 Lumen m ⁻²	1	Lux	Philips (1987)
1 lux	1/10.8	fotocandela	Thimijan y Heins (1983)
1 fotocandela	10.8	lux	Thimijan y Heins (1983)
1 lux	1/680 (λ= 555 nm)	W m ⁻²	Savage (1979)
1 W	1	J s ⁻¹	S.I.
1 W m ⁻²	1	J m ⁻² s ⁻¹	S.I.
1 W m ⁻²	680 (λ= 555 nm)	Lux	Savage (1979)
1 W m ⁻²	1	J m ⁻² s ⁻¹	S.I.
1 lumen	0.001496	W	A.C. (1985)
Langley day ⁻¹	0.484	Wm ⁻²	Thimijan y Heins (1983)
1 lux	1/54 (radiación directa)	1 μ mol m ⁻² s ⁻¹ (PAR)	Thimijan y Heins (1983)
1 lux	1/52 (radiación difusa)	1 μ mol m ⁻² s ⁻¹ (PAR)	Thimijan y Heins (1983)
1 μ E m ⁻² s ⁻¹	1	μ mol m ⁻² s ⁻¹	S.I.
1 μ mol m ⁻² s ⁻¹	1	μ E m ⁻² s ⁻¹	S.I.
1 μ mol m ⁻² s ⁻¹ (PAR)	1/4.57 (radiación directa)	Wm ⁻² (PAR)	Thimijan y Heins (1983)
1 μ mol m ⁻² s ⁻¹ (PAR)	1/4.24 (radiación difusa)	Wm ⁻² (PAR)	Thimijan y Heins (1983)

1. 3. 2. Fuentes de iluminación artificial comunes en uso agronómico

Las lámparas son una fuente de radiación electromagnética, y su luz es sólo una parte del espectro total. Todas son producidas por el hombre y pertenecen a las mismas categorías que las naturales. Se pueden clasificar en (Jiménez, 1997):

- a) *Emisores de origen térmico*: utilizan la combustión de un medio oxigenado (bujías, lámparas de aceite y gas).
- b) *Lámparas de incandescencia*: contienen una atmósfera gaseosa (halógenos, xenón, criptón y argón).
- c) *Fuentes de tipo luminiscente*: son lámparas de descarga en atmósfera gaseosa y con adición de metales en forma de halogenuros, yoduros, tierras raras, mercurio, sodio y yodo.
- d) *Fuentes de tipo fotoluminiscente*: como diodos emisores de luz semiconductores (LED), luminarias de emergencia y pinturas luminiscentes.
- e) *Lámparas fluorescentes*: deben su funcionamiento a la luminiscencia y fotoluminiscencia.
- f) *Lámparas de inducción*: donde se integran luminiscencia, fotoluminiscencia e inducción magnética.

No todas las lámparas tienen interés agronómico. La luz artificial en los cultivos puede cumplir tres objetivos importantes:

- 1.- Proporcionar cantidad suficiente de energía para la fotosíntesis.
- 2.- Proporcionar el espectro energético adecuado, es decir, la luz debe tener la composición espectral adecuada.
- 3.- Proporcionar energía durante el fotoperiodo, tanto si se aplica sobre plantas de día corto como largo.

El ajardinamiento de espacios interiores ha sido ampliamente estudiado por el ser humano, desde tiempos antiguos, las distintas civilizaciones han dado muestra de su preocupación por rodearse de un ambiente más o menos decorado con plantas vivas, actitud que refleja una relación clara con la calidad de vida (Segura, 2005).

En la actualidad, los ambientes urbanos buscan dar más protagonismo a los espacios interiores ajardinados sin luz natural con su consecuente mantenimiento. Ello implica una nueva revisión de nuestras necesidades lumínicas y las de las plantas. Por

ahora sólo había importado una iluminación adaptada al ojo humano (visión fotópica máxima para $\lambda = 550$ nm y visión escotópica máxima para $\lambda = 507$ nm) (Martínez, 2006) no teniendo en cuenta aspectos importantes para el dosel vegetal como la intensidad de radiación recibida, calidad de la luz, distribución espectral de dicha radiación y la duración del periodo de luz.

En general, las plantas requieren un periodo de luz entre 10 a 14 horas diarias (fotoperiodo).

Cuando se usa luz artificial como iluminación de asimilación, conviene que su calidad espectral se encuentre en la zona PAR. Las plantas poseen una fotosensibilidad que sólo una parte de la luz visible interviene en la fotosíntesis (asimilación) o zona PAR ($\lambda = 400-700$ nm). Una lámpara eficaz para el crecimiento de las plantas debe transformar tanta energía eléctrica como sea posible en PAR (Fig. 5), pero una radiación menos eficiente en los rangos 300-400 y 700-800 nm puede influir decisivamente en el desarrollo de la planta, fenómeno que se conoce como fotomorfogénesis (Pérez *et al.*, 2006). Como ejemplo, en crisantemos y rosas, un aumento del rojo lejano (FR) es estimulante sobre la elongación del tallo. La reducción del FR obtiene plantas compactas, menos superficie foliar y mayor presencia de clorofila a+b, pero en rosas aumentó el número de brotes considerablemente.

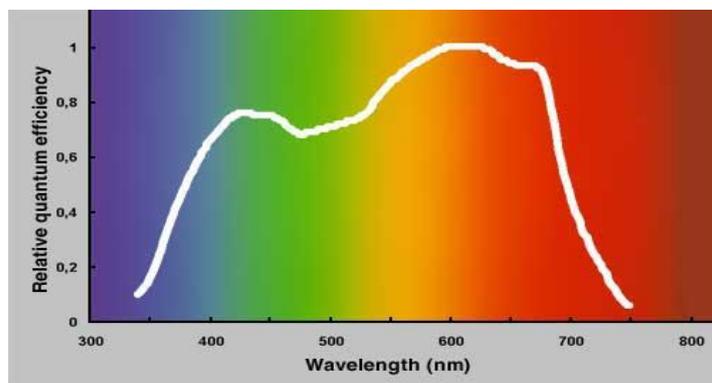


Figura 5. Espectro de acción fotosintética (Philips en horticultura, 2006)

En invernaderos se utilizan diferentes tipos de lámparas, cuyas características se recogen en la tabla 4.

Desde el punto de vista del agricultor, las lámparas deben ser eficaces energéticamente, o sea, la cantidad de energía destinada al cultivo habrá de ser proporcionalmente elevada en comparación con la energía eléctrica consumida por la propia lámpara, es decir, uso de lámparas de alta eficacia (Alpi y Tognoni, 1987).

Tabla 4. Tipos y características de lámparas empleadas en iluminación de invernaderos
(Serrano, 1990)

Características	Incandescentes	Vapor de mercurio	Incandescentes y vapor de mercurio	Fluorescentes
Luz producida	Rojo-infrarrojo (elevado poder calorífico)	Visible y ultravioleta	Mixta	Mixta con preponderancia de azul y rojo
Potencia Wm ⁻²	3	150-200	-	-
Rendimiento luminoso (%)	10	90	30	90 (emana poco calor)
Duración (h)	1000	3500	2000	3500
Aplicación	Invernadero de grandes dimensiones. Adelanto/retraso de la floración	Crecimiento de plantas	Adelanto de la floración	Crecimiento de plantas
Observaciones	Bajo costo de instalación; elevado uso	Atención al tipo comercial que se elige	Elevado costo de uso	Débil intensidad luminosa, colocación en batería de 3-4

1. 3. 2. 1. Lámparas incandescentes

Las *lámparas incandescentes* son fuentes de luz continua que poseen una calidad de luz con un espectro continuo (Fig. 6), sin omitir ninguna de las frecuencias intermedias, rica en rojos y pobre en azules (Jiménez, 1997), por lo que en periodos de ausencia de luz natural pueden aportar cantidad y calidad de luz apropiados para el mantenimiento de un ajardinamiento interior.

Han sido de uso común hasta ahora debido a su bajo precio, adaptabilidad, comodidad, variedad de formas, funcionalidad en corriente continua (CC), corriente alterna (CA) y para cualquier tensión, buena reproducción cromática (rendimiento de color de una fuente de luz, índice de reproducción cromática IRC, prácticamente 100%), conexión directa a red, posibilidad de encendido y reencendido instantáneos y elevado flujo luminoso.

Son altamente contaminantes, de bajo rendimiento luminoso ($\eta=8-18$ lm/W, solo el 10% de la energía consumida por la lámpara se transforma en luz, el resto se disipa en forma de calor), tiempo de vida útil corto (500-1000 h), fuerte depreciación del flujo

luminoso a lo largo de su vida útil y sensibilidad a cambios de tensión en red. Por ello, la tendencia actual es sustituirlas por fluorescentes de bajo consumo.

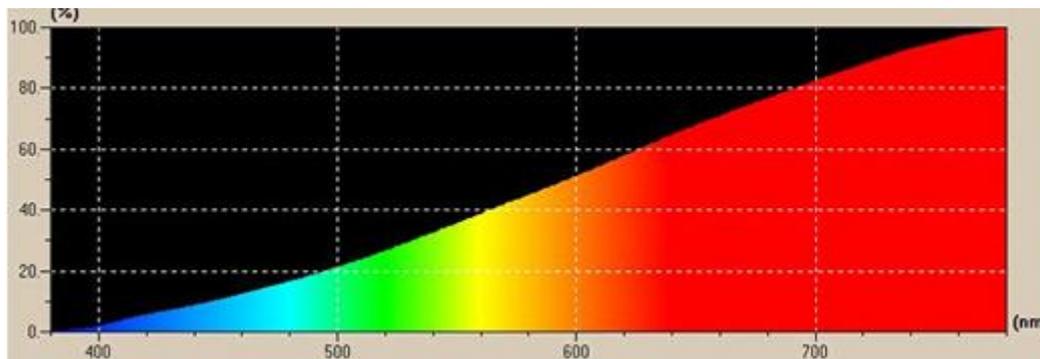


Figura 6. Espectro de emisión de una lámpara incandescente (Color & Vision Database)

La directiva de la Unión Europea 2009/125/CE estableció la retirada gradual de estas lámparas hasta septiembre de 2016. El objetivo fundamental de su retirada es disminuir el consumo de energía, ser más eficientes energéticamente y contaminar menos disminuyendo las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

1. 3. 2. 2. Lámparas de alta intensidad de descarga

Las necesidades luminosas de las especies hortícolas y florales requieren programar una continua variación en la cantidad y calidad de la luz suministrada y, por tanto, las fuentes luminosas empleadas (Alpi y Tognoni, 1987). Las *lámparas de alta intensidad de descarga* (HID) se usan para suplementar la luz durante el día o reemplazar a ésta parte de la noche. Dentro de las HID se encuentran las lámparas de mercurio de alta presión, de sodio de alta y baja presión y las de halogenuro metálico (Dole y Wilkins, 1999). Las modernas lámparas de descarga a alta presión tienen un principio de funcionamiento completamente distinto al de las lámparas incandescentes. Destacan por su gran economía en el funcionamiento, gracias a que generan un flujo luminoso sumamente alto en un espacio muy pequeño, mínima radiación térmica, excelente reproducción cromática y larga duración son otras de las ventajas de las lámparas de descarga a alta presión, además de su construcción compacta, que facilita la orientación de la luz.

Los focos de vapor de mercurio Floraset y Floralux de OSRAM tienen como principal característica el ahorro de energía: equivalencia Flora-set HQL-R DE LUXE 80 W con incandescentes de 160 W (Cascón, 2006). Su espectro se muestra en la figura

7 a. Aunque es un espectro discontinuo, presenta picos importantes en las regiones azul y roja que asegurará un crecimiento equilibrado de las hojas.

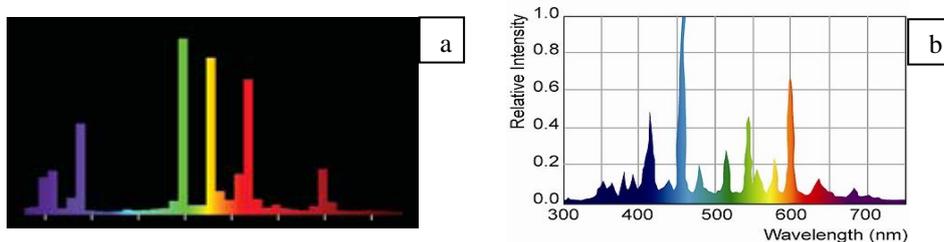


Figura 7. a) Distribución espectral de la lámpara HQL® de Luxe (OSRAM). b) Distribución espectral de la lámpara Floralux (OSRAM)

1. 3. 2. 3. Lámparas fluorescentes

Las *lámparas fluorescentes*, están constituidas por un tubo de vidrio o bulbo tubular recubierto interiormente de un material fluorescente, que tiene en sus extremos los electrodos y en su interior un relleno de gas formado por gas inerte (argón o kriptón) y vapor de mercurio. Producen luz (principalmente azul y roja, aunque depende mucho del modelo) mediante fenómenos de fluorescencia del gas sometido a un arco voltaico. Esto ocurre cuando dicho arco aumenta la temperatura y presión del mercurio contenido en forma líquida dentro del tubo, provocando su vaporización y empezando éste a emitir luz.

Para conseguir el funcionamiento se necesitan los siguientes elementos:

- Reactancia (permite reducir el voltaje hasta el valor requerido).
- Cebador (permite iniciar el arco en la luminaria).
- Condensador (normalmente está integrado con la reactancia y permite aumentar el factor de potencia hasta el valor requerido (0.8 en los tubos de Ø 26 mm)).

Son muy adecuadas para el crecimiento, para los vástagos y para enraizar esquejes, por lo que se recomiendan especialmente durante las primeras etapas de las plantas (Dole y Wilkins, 1999). Son bastante económicas (para igual flujo luminoso, consume 20% menos que la incandescente), tienen un elevado rendimiento luminoso ($\eta = 95-105 \text{ lm/W}$), vida útil (6000-20000 h) muy superior a la de las lámparas de incandescencia, amplia variedad de tonalidades de color, la luz es difusa (supone una gran comodidad visual evitando en buena medida los deslumbramientos y una menor cantidad de sombras) y no emiten demasiado calor. El principal problema es que ocupan

mucho espacio, precio más elevado de primera instalación que las lámparas incandescentes, fragilidad mecánica, tiempo de encendido apreciable, no son aptas para múltiples encendidos y apagados (disminuirían su vida útil) y originan en el usuario cierto “parpadeo” debido a la corriente alterna (originando una fatiga mayor en el ojo, teniendo incluso cierto efecto estroboscópico). Hoy se soluciona con las modernas reactancias y autotransformadores electrónicos, y disponiendo los tubos por parejas o tríos en las luminarias. Al arrancar, consumen aproximadamente 1.8 veces la potencia nominal, lo cual debe ser tenido en cuenta a la hora de dimensionar la instalación eléctrica.

Las de uso más difundido son las fluorescentes TLD, TL5 y compactas o de bajo consumo (CF). Las TL5 se consideran de alta eficacia, hasta 104 lm/W, presentan hasta un 40% menos de contenido en mercurio respecto a las TLD estándares y se consideran ahorradoras de energía.

Si observamos el espectro de emisión de una lámpara fluorescente estándar y de luz blanca tipo TLD/830 (Fig. 8 a), vemos un pico en azul que está entre los 430 y 440 nm, y no presenta apenas emisión en el rango del rojo 660-680 nm; muy similar es el espectro de una lámpara fluorescente compacta (CF) LUMILUX/830 y TL5/830 alta eficacia, figuras 8 b y 8 c respectivamente. Esta última, a diferencia de las TLD y CF, presenta una ligera radiación en la región del UV a 360 nm.

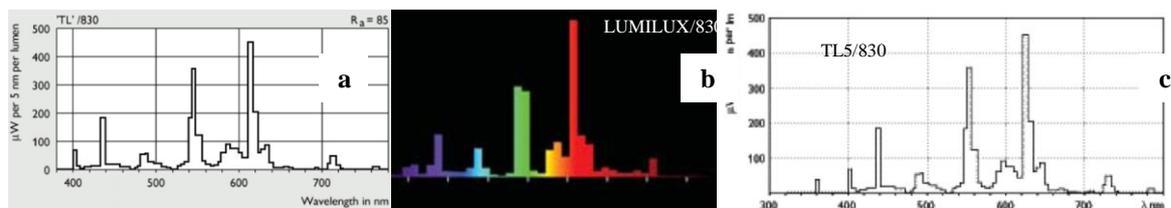


Figura 8. Espectros de emisión de lámparas: a) fluorescente TL-D/830 Philips; b) fluorescente compacta LUMILUX/830 Osram. Zona visible de 380 hasta 780 nm, emisión espectral relativa por 10 nm; c) fluorescente de alta eficacia TL5/830 Philips

Las lámparas fluorescentes compactas (CF) o de bajo consumo presentan las siguientes ventajas frente a las anteriores: bajo consumo, elevado rendimiento luminoso, poca emisión de calor, pequeñas dimensiones, calidad espectral y larga vida entre otras. Como inconveniente destaca su alto precio aunque, por su longevidad y eficiencia energética, se obtiene rentabilidad a largo plazo.

1. 3. 2. 4. Nuevas fuentes de iluminación: LED

Un *diodo emisor de luz (LED)* es un dispositivo que convierte energía eléctrica en lumínica. Al aplicarle un voltaje superior a cierto valor, los electrones de conducción se excitan, pero, al intentar regresar al estado de equilibrio, ceden esta energía en forma de fotones. La explicación de este proceso es muy compleja, abarcando desde modelos teóricos de conducción y bandas prohibidas hasta técnicas de fabricación y diseño de sus componentes (Morehead, 1967).

El uso de diodos emisores de luz ha sido escaso hasta hace muy pocos años. Sólo destacó en señalizaciones, pilotos de todo tipo, balizamientos de peldaños y cambios de nivel. Los LEDs presentan características atractivas y ventajas tales como el poder elegir el color de luz emitida (longitud de onda específica), rápida conmutación (200 ns), diversidad de formas, fácil manipulación, pequeño tamaño (masa y volumen) y gran ahorro de energía gracias al bajo consumo, alta luminosidad, larga vida (Bula *et al.*, 1991; Barta *et al.*, 1992), dureza y bajo mantenimiento, por ello en la actualidad se ha impuesto su desarrollo (Jiménez, 1997; Espín *et al.*, 2009). Como inconvenientes, señalar que son poco manejables debido a su funcionamiento con voltajes muy reducidos, 2-4 V, solucionándose este problema mediante su disposición en serie para una alimentación a 12 o 24 V; los LEDs también presentan los inconvenientes de ser unidireccionales, con un área de visión restringida al ángulo frontal estrecho y su alto precio.

La característica básica de la luz emitida por los LEDs es ser monocromática, es decir, la luz que emiten se encuentra en un estrecho rango de longitud de onda del espectro. En términos de la longitud de onda, la anchura espectral de un LED puede calcularse mediante la expresión (Saleh y Teich, 1994)

$$\Delta\lambda \approx 1.45\lambda_p^2 k_B T \quad (6)$$

Donde λ es la longitud de onda (nm), λ_p longitud de onda del pico de emisión espectral (nm), K_B es la constante de Boltzman ($1.380658 \cdot 10^{-23}$ J/K) y T la temperatura (K). Hasta ahora, los colores más utilizados son el rojo, amarillo/naranja, verde y azul, considerándose raros otros tonos (Fig. 9).

En la tabla 5 se recogen algunas características básicas de los LED y los materiales empleados en su construcción.

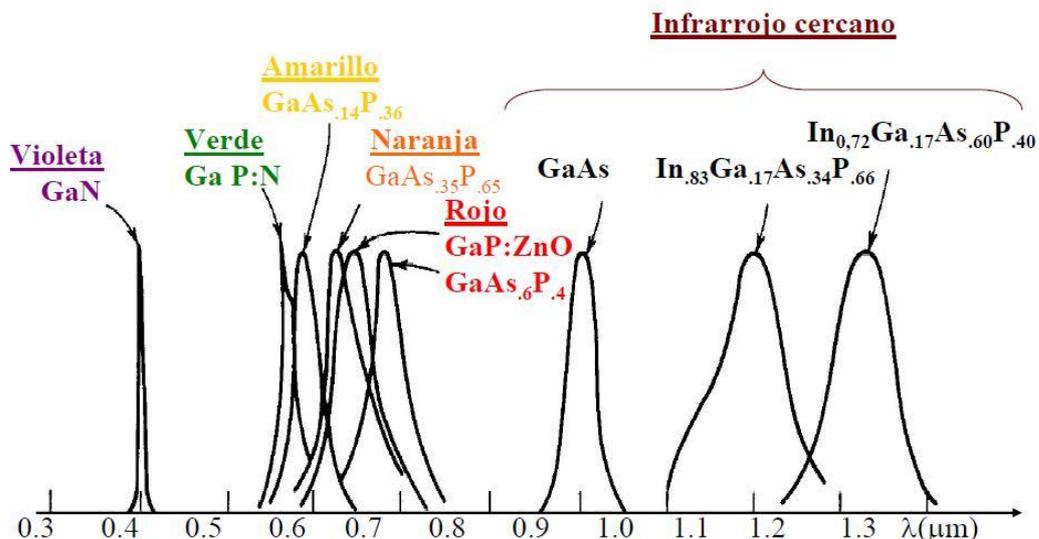


Figura 9. Espectro de emisión de distintos LEDs (<http://www.iluminated.com>)

Tabla 5. Características básicas de los LEDs (Espín *et al.*, 2009)

Material	Longitud de onda	Color	Tensión
GaAs	904 nm	IR	1 V
InGaAsP	1300 nm	IR	1 V
AlGaAs	750-850 nm	Rojo	1.5 V
GaAsP	590 nm	Amarillo	1.6 V
InGaAlP	560 nm	Verde	2.7 V
SiC	480 nm	Azul	3 V

Existen numerosos trabajos del empleo de LEDs en el cultivo de plantas, utilizándolos como fuente única de iluminación o como complemento lumínico (Yanagi *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 2006; Shimomachi, 2006), en áreas de investigación como síntesis de clorofila, fotosíntesis, foto-biorreactor de algas y foto morfogénesis (Jao y Fang, 2003). Estas investigaciones se basan en que existe un equilibrio entre los pigmentos cuyas formas son interconvertibles cuando absorben en rojo P_R y rojo lejano P_{FR} , la relación P_{FR}/P_R ha sido definida (Hayward, 1984; Sager *et al.*, 1988), basada en la distribución espectral comprendida en el intervalo de 300-800 nm y asociada a respuestas morfológicas según la calidad de la luz (Smith, 1994).

Pigmentos como los criptocromos (Lin, 2000), absorben luz azul (400-500 nm) y participan en la inhibición de la extensión del tallo, lo cual es dramático en la mayoría de las especies vegetales (Runkle y Heins, 2006), lo mismo ocurre con los fitocromos P_R (660 nm) activándose a P_{FR} y generando respuestas biológicas (Taiz y Zeiger, 2002).

La combinación de luz roja y azul procedente de LEDs permite un buen crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que se encuentra en las regiones de máxima capacidad de absorción fotosintética, aunque la luz roja monocromática a 680 nm es un 36% más eficiente en el proceso de fotosíntesis que la luz monocromática azul a 460 nm (Hall y Rao, 1999).

Si tenemos en cuenta que la emisión de luz de los LEDs es monocromática, que su variabilidad de colores es cada día más amplia y que las anchuras típicas de espectros para un LED van de 20 nm a 60 nm, podemos elegir aquellos que nos proporcionen una emisión en la longitud de onda donde los pigmentos vegetales absorben radiación más eficientemente, como R (660-680 nm) y B (440-460 nm).

Sin embargo, las regiones de emisión de los LEDs son percibidas por el ojo humano en bajo porcentaje, lo que condiciona su empleo como fuente única de iluminación.

1. 3. 3. Luminarias

Los *reflectores* o *luminarias* son aparatos de alumbrado que reparten, filtran o transforman la luz emitida por una o varias lámparas y que comprenden todos los dispositivos necesarios: el soporte, la fijación y la protección de las lámparas y, en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación (UNE-EN60598-1 y CEI598-1). Ayudan a aumentar la eficacia de la iluminación adicional. Están diseñados para maximizar la cobertura con niveles uniformes de luz y para optimizar la cantidad de luz (Espín *et al.*, 2009).

Los componentes más característicos son:

a) *Armadura o carcasa*. Elemento físico que sirve de soporte y que contiene los dispositivos necesarios para el funcionamiento. No todos los reflectores son iguales pero la mayoría están producidos en aluminio Micro 9-10 (EIE). Otro material empleado es el poliéster con fibra de vidrio, que presenta el peligro de pérdida de resistencia mecánica por acción degradante de las radiaciones UV. Otros materiales plásticos empleados presentan el inconveniente del envejecimiento prematuro.

b) *Sistema óptico*. Elementos que distribuyen la luz producida por la lámpara. Consta de reflector (aluminio y materiales plásticos), refractor (poliestireno y acrílico), difusor (en lámparas fluorescentes se usa plástico translúcido) y dispositivo de apantallamiento y filtros.

c) *Equipo eléctrico*. Elementos eléctricos adecuados para el funcionamiento de los distintos tipos de lámparas.

Las luminarias se pueden clasificar según:

1. Sus aplicaciones: alumbrado viario, deportivo y de grandes áreas, industrial, oficinas, acentuación y decoración.
2. Su distribución de luz: simétricas y asimétricas, directas o indirectas, difusas, para alumbrado de proyección.
3. Su grado de protección eléctrica hacia las personas y bienes: clase 0, I, II, III.
4. Su grado de protección mecánica o índice de protección (IPXY): penetración de cuerpos sólidos y polvo, y penetración del agua.

El tipo de fuente de luz para un cultivo determinado, potencia, disposición y luminaria deben de ser estudiados con detenimiento para que la iluminación sea eficaz.

2. Técnicas de producción agrícola con iluminación artificial

2. 1. El injerto

El injerto es la unión de dos porciones de tejido vegetal de modo que se unan, crezcan y se desarrollen como una sola planta (Hartmann y Kester, 1991; Camacho y Fernández, 1997; Acosta, 2005; De Miguel y Cebolla, 2005; Hoyos, 2007). La razón del injerto en España se debió a la necesidad de evitar las enfermedades del suelo, hongos y nematodos limitando la continuación del cultivo que sólo era posible por la realización de la desinfección, mayoritariamente con bromuro de metilo (Camacho y Fernández, 1997; De Miguel y Cebolla, 2005; Hoyos, 2007). Por ejemplo, en el tomate se producen alteraciones nutricionales por *Nacobbus aberrans* (Cristobal *et al.*, 2001).

Con el objetivo de conocer el efecto del uso de portainjertos resistentes sobre la incidencia de enfermedades ocasionadas por nematodos y patógenos del suelo en cultivo de tomate bajo cubierta, se ensayó la combinación de dos cultivares ‘Superman’ y ‘Fortaleza’ injertados sobre el portainjerto ‘Heman’, híbrido inter específico de *L. hirsutum* por *L. esculentum* (Mitidieri *et al.*, 2005) obteniendo en un aumento en la resistencia a patógenos del suelo. La prohibición del uso de bromuro de metilo como tratamiento para estas enfermedades en el 2005 incrementó el desarrollo de las técnicas de injerto en España (De Miguel y Cebolla, 2005; Hoyos, 2007) como había ocurrido en el Sur de Italia (Morra *et al.*, 1998) y concretamente en Almería, por ser una de las mayores provincias productoras de injertos de tomate (Hoyos, 2007).

Otras finalidades del injerto son perpetuar clones, acelerar la madurez reproductora, obtener formas especiales de crecimiento, estudiar enfermedades virales, obtención de fruta de calidad superior, un mayor rendimiento, mayor eficiencia en el uso de agua y nutrientes y el aumento de la tolerancia al estrés abiótico (Hartmann y Kester, 1991; Acosta, 2005; De Miguel y Cebolla, 2005; Rivard y Louws, 2008). Como ejemplo, el injerto de tabaco en tomate dio lugar a una planta más ligera en nicotina y tolerante a suelos salinos (Ruiz *et al.*, 2005; Ruiz *et al.*, 2006).

El injerto sobre plantas de tomate puede reducir el estrés termal (Rivero *et al.*, 2003). El *Citrullus Lanatus* fue injertado en melón y tomate para encontrar una planta con mayor vigor (Rivero *et al.*, 2004).

En definitiva, el efecto práctico que se consigue del injertado hortícola es la obtención de frutos con demanda en el mercado, sustituyendo la parte de la planta que es sensible al patógeno que se quiere combatir por otro tejido vegetal resistente o tolerante al mismo. El uso masivo de plantas injertadas se ha generalizado en las últimas décadas como consecuencia de la industrialización de los procesos agrícolas en ciertos tipos de plantas (Acosta, 2005).

El desarrollo del injerto en etapas de cohesión, formación del callo o cambium y diferenciación del sistema vascular se describieron en Moore (1984), Hartmann *et al.* (1991), Turquois y Malone (1996), Acosta (2005), De Miguel y Cebolla (2005); que además ilustraron los tejidos del callo, floema y xilema. Turquois y Malone (1996), establecieron que el aumento gradual de la unión patrón-variedad se produce entre los días 1 al 11 del injertado.

Las técnicas de injertado empleadas en horticultura son aproximación, púa, adosado y empalme (Hartmann *et al.*, 1991; De Miguel, 1997; Acosta, 2005; De Miguel y Cebolla, 2005). La técnica de aproximación es la más difundida entre las empresas (De Miguel, 1997). Rojas y Riveros (2001) realizaron experimentos para determinar el efecto de la edad de plántulas y de diferentes técnicas de injerto en melón (*Cucumis melo*), en el primero se compararon cuatro técnicas de injertado (aproximación, empalme, púa y tubo) en dos variedades botánicas, *C. melo* variedad *reticulatus* y *C. melo* variedad *Inodorus*, concluyendo que la técnica de aproximación ayuda a la supervivencia de las plantas injertadas independientemente de la edad del portainjertos.

El *patrón* o portainjertos es la planta de la cual van a usarse sus raíces y es resistente a enfermedades o plagas, mientras que se conoce como *variedad* (var.) a la planta de la cual van a aprovecharse las hojas y que finalmente será la responsable de

dar el fruto. Las técnicas de injerto para cucurbitáceas descritas por De Miguel y Cebolla (2005) son tres:

- a) *Aproximación*: donde la lengüeta del hipocolito del patrón se hace coincidir con otra similar de la variedad. Ambas plantas conservan sus raíces. Establecida la conexión se corta el tallo de la variedad para aislarla del suelo (De Miguel, 1997).
- b) *Púa*: donde una púa de la variedad cortada en bisel por debajo de los cotiledones se incrusta en el corte vertical efectuado entre los cotiledones del patrón.
- c) *Adosado*: método recientemente implantado en España. Es fácilmente mecanizable. La variedad se corta como en el injerto de púa, en ángulo. En el patrón, el corte se realiza eliminando los cotiledones y el ápice vegetativo y otro en la parte inferior del tallo, eliminando la raíz. En el corte superior, junto al cotiledón que permanece, se adosa la variedad, haciendo coincidir ambos cortes. Mientras que se establece la unión del injerto se produce también el enraizamiento del patrón.

En solanáceas se emplea el método del *empalme* donde se corta el tallo del patrón por debajo o por encima de los cotiledones, en ángulo y el de la variedad, con el mismo ángulo y donde tenga sección similar a la del patrón. Con una pinza especial en forma de tubo se unen los dos cortes.

Para que el injerto entre dos plantas tenga éxito, estas plantas deben ser compatibles o "afines". La afinidad viene dada en dos niveles (Acosta, 2005):

- 1) *Afinidad morfológica*, anatómica y de constitución de sus tejidos, lo que quiere decir que los haces conductores de las dos plantas que se unen tengan diámetros semejantes y estén en igual número aproximadamente.
- 2) *Afinidad fisiológica*, de funcionamiento y analogía de savia, en cuanto a cantidad y constitución.

Entre las especies hortícolas sólo se injertan las cucurbitáceas (sandía, melón, pepino) y las solanáceas (tomate, berenjena, pimiento).

En un injerto completo, el flujo de agua, envío de señales y coordinación entre raíz y parte aérea debe realizarse como si de una sola unidad se tratase (Turquois y Malone, 1996). El desarrollo del injerto comienza con la cohesión patrón-variedad al ponerse en contacto tejidos del patrón y de la variedad con las regiones cambiales estrechamente unidos. Se produce por la deposición y polimeración de materiales de las membranas celulares (Moore, 1984). Las condiciones de temperatura y humedad deben estimular el prendimiento en las células en contacto y las adyacentes. Se forma un tejido de callo por las células de parénquima (variedad) y del cambium (patrón) que se

entremezclan. Las células del callo se pueden diferenciar en nuevas células de cambium las cuales producen nuevo tejido vascular (Acosta, 2005). La diferenciación vascular es el episodio final propio de injertos compatibles en respuesta a las auxinas liberadas en los vasos lesionados. Normalmente se diferencian nuevos elementos de xilema lesionado desde el callo a ambas partes del injerto a partir de los 4-7 días. El aumento gradual de unión es evidente desde 5^o al 6^o día por la aparición de puentes entre xilemas de ambas partes (Turquois *et al.*, 1996).

La fuerza de unión del injerto evoluciona en tres fases: entre los días 1-4 aumenta lentamente; en los días 4 al 8 aumenta rápidamente y del 8 al 11 puede crecer más lentamente (De Miguel y Cebolla, 2005). En este período, desde el día 1 al 11, puede aplicarse iluminación artificial ya que son plantas muy jóvenes y la luz es un factor limitante importante en el proceso de fotosíntesis. Los tratamientos de luz artificial se utilizan para mejorar el éxito de injerto (Shuangxia *et al.*, 2006), de ahí su uso en semilleros hortícolas, ya que el número de plantas injertadas dispuestas para trasplante se pueden producir de forma “casi industrial” en menor tiempo y con gran calidad.

2. 2. Plántulas hortícolas. Tomate

Hay un gran número de cultivares de tomate utilizado en la producción comercial bajo condiciones de invernadero. Su crecimiento está influido por las condiciones ambientales, las técnicas de cultivo, los requisitos y las exigencias del mercado (Moreno, 1993a, 2002b).

El tamaño del fruto, el color, la textura y la acidez pueden ser seleccionados por la variedad, y a su vez las variedades han sido adaptadas a las condiciones del campo o invernadero y a la duración del día (Jones, 1999).

Se han utilizado técnicas de ingeniería genética aplicada a la cría de tomate para producir la fruta con una larga vida útil (Della Vecchia y Koch, 2000), resistente a enfermedades y con alto contenido de licopeno.

La producción en invernaderos es la tendencia más desarrollada enfocada hacia una mejor calidad y más diversificada oferta de tomate: racimos de madurez, de cultivo ecológico, TOV (tomate en la vid), con tamaños de cereza y en forma de pera, de varios colores; esta tendencia creciente proporciona un valor añadido para la selección de productos de consumo.

Por otra parte, las respuestas fisiológicas de los diferentes cultivares no son similares (Goykovic y Saavedra, 2007) y, por tanto, es necesario hacer un estudio detallado de cada variedad por separado. Los factores ambientales más estudiados y usados para diferenciar entre cultivares y plántulas son: la luz y la temperatura (Leopod y Kriedman, 1975; Allen y Rudich, 1978; El Ahmadi y Allen, 1979; Daie y Campbell, 1981; Bartsur et al., 1985; Dinar y Rudich, 1985; Parker, 1994; Makishima y Miranda, 1995; Ohyama *et al.*, 2003), la resistencia a la salinidad (Letey y Dinar, 1986; Shani y Dudley, 2001), plagas y/o enfermedades (Hanafi y Schnitzler, 2004) y factores nutricionales.

La producción de plántulas para trasplante se ha incrementado en los últimos años como resultado de las enormes ventajas de este sistema de producción en comparación con la producción de plántulas a raíz desnuda. En el cultivo de plántulas de tomate, la radiación incidente en la copa afecta a la fotosíntesis (Papadopoulos y Ormrod, 1990). Esta energía determina el rendimiento de la planta (Mpelkas, 1989) y a la productividad del tomate en el invernadero (Papadopoulos y Pararajasingham, 1997). En el desarrollo de las plántulas, la iluminación artificial complementaria es económicamente factible (Resh, 2001). Para el tomate, en general, la iluminación suplementaria ha demostrado tener un efecto beneficioso sobre el crecimiento y rendimiento de acuerdo con el estado fisiológico de la planta y el nivel de luz natural (Yelle *et al.*, 1987; Dorais *et al.*, 1992). No obstante, dada la demostrada existencia de interacciones genotipo-medio, las distintas variedades, en circunstancias particulares pueden presentar alguna sensibilidad especial a la calidad espectral o a otros parámetros de cultivo (Tomás *et al.*, 1999).

Los parámetros de biomasa para definir la calidad de plántulas de tomate fueron reportados por Hoyos (1990) y Carbonell (1995) destacando, entre ellos, el peso seco total (parte aérea y raíces), el peso fresco total (parte aérea y raíces), partición de peso seco/peso fresco, la altura total, número de hojas, superficie foliar, diámetro del tallo, la longitud de la raíz. Rendimiento y biomasa se han correlacionado con la absorción de agua de la planta en varios cultivos (Hanks, 1974), así como una serie de condiciones de estrés, como la salinidad (Letey y Dinar, 1986; Shani y Dudley, 2001).

La luz continua aumenta el contenido en azúcar almidón y de las hojas, mejora el sabor de la fruta por las altas concentraciones de azúcar y ácidos relativamente altos (Grierson y Kader, 1986). La clorosis en hojas de las plantas de tomate cultivadas bajo

luz continua se puede explicar por la acumulación de almidón y azúcar (Demers *et al.*, 1998).

2. 3. Plantas ornamentales. *Dieffenbachia compacta* y *Fittonia verschaffeltii*

Existen dos especies de plantas ornamentales de fácil adquisición en viveros de Almería son *Dieffenbachia compacta* y *Fittonia verschaffeltii*.

D. compacta se describe como una planta de follaje como *Anthurium*, *Philodendron* y *Syngonium* (Buldewo y Jaufeerally-Fakim, 2002) y son cultivadas popularmente en los interiores de las casas, oficinas y jardines alrededor del mundo por su hoja pigmentada de gran belleza y por la inflorescencia llamativa, larga y duradera (Pataky, 2001; Buldewo y Jaufeerally-Fakim, 2002). También es conocida su naturaleza irritante (tóxica) causada por la combinación de cristales de oxalato de calcio (CaOx) y una enzima proteolítica. La distribución de los cristales CaOx en toda la planta, la relación entre los cristales y los niveles de soporte de nutrición, sistemas de riego, y la intensidad de la luz no han sido investigados previamente (Cao, 2003).

F. verschaffeltii pertenece a la familia *Araceae*. Es una planta ornamental pequeña, atractiva por sus hojas coloreadas, ideal para lugares umbríos. Su distribución ecológica se localiza en viviendas, a través de viveros, mientras que su distribución geográfica se localiza en las regiones del centro norte americano. El interés en su producción está en su fisiología llamativa, de pigmentos variados, de impacto visual además de económica reproducción (Berroterán y García, 1986; Baruch *et al.*, 1989; Espinosa y Argenti, 1990; Ojasti, 2001).

Las técnicas de propagación de plantas ornamentales en viveros comerciales suelen ser asexuales debido a que se obtiene mayor cantidad de plantas regeneradas, bajo costo y uniformidad (Castillo *et al.*, 2005).

3. Parámetros fisiológicos en producción vegetal y su relación con la luz

3. 1. Biomasa, azúcares y almidón

La biomasa es la masa total de toda la materia que forma la planta. La interceptación por las hojas de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) es un gran proceso de producción de biomasa (Plénet *et al.*, 2000). La biomasa suele expresarse en

función de la materia seca vegetal. Las plantas con mayor contenido de materia seca son más resistentes al trasplante y presentan una adaptación más fácil (Cornillon, 1999).

Las plantas deben lograr un equilibrio entre la asimilación de carbono, su almacenamiento y el crecimiento. La compleja interacción de la disponibilidad de carbono en la fuente (órganos de asimilación), la demanda de carbono por los sumideros (órganos no fotosintéticos) y la tasa de crecimiento se ven influidas por el suministro de carbono. La asimilación fotosintética de carbono se produce sólo en presencia de luz; el crecimiento y el mantenimiento del carbono puede ocurrir durante todo el ciclo día-noche (Nozue y Maloof, 2006). Los productos inmediatos de la asimilación fotosintética de carbono se dividen entre la sacarosa (inmediatamente disponible para el crecimiento) y el almidón, que se acumula en las hojas durante la noche y es degradado para producir sacarosa.

Se puede hacer un esquema de la relación entre la fijación de carbono, la rotación de almidón y el crecimiento en respuesta a la noche (Fig. 10). En un ciclo normal de luz/oscuridad (12 h luz/12 h oscuridad), las reservas de almidón están presentes hasta el final de la noche, lo que permite un suministro continuo de los azúcares.

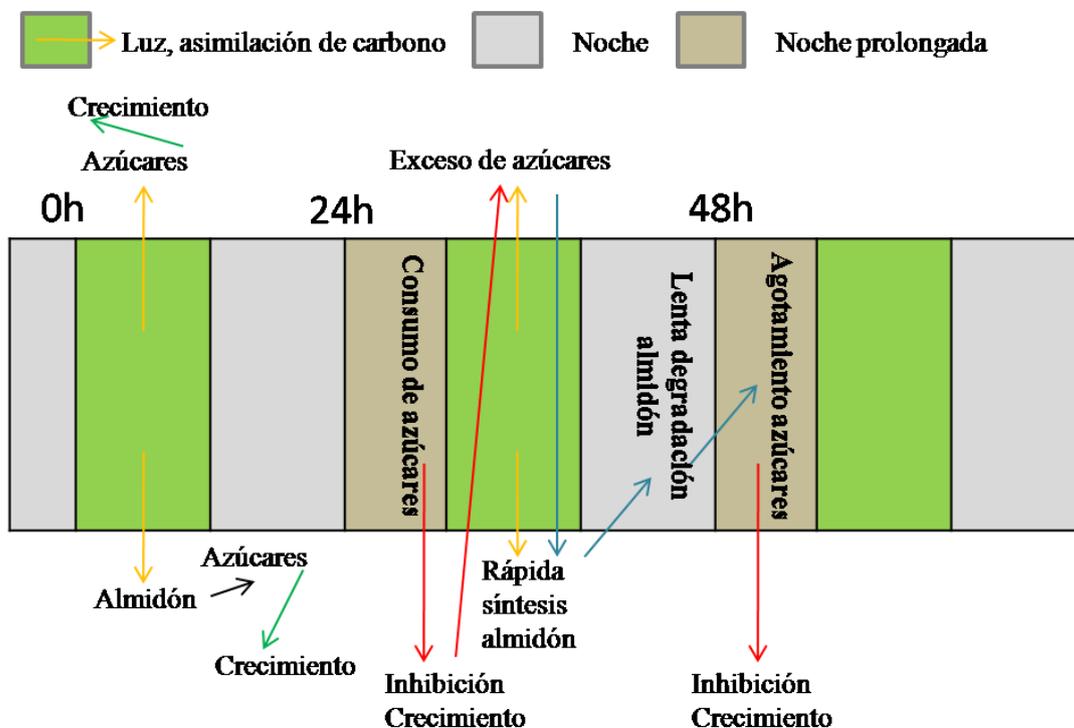


Figura 10. Esquema de la relación entre el carbono fijado durante el día en presencia de luz, formación y almacenamiento de almidón y crecimiento en respuesta a la noche (elaboración propia)

El crecimiento continúa durante todo el día y la noche. Si la noche se alarga, el almidón se agota antes de que finalice el período de oscuridad. Esto conduce al agotamiento de azúcares y una inhibición del crecimiento al final del período de oscuridad. Esta inhibición no se revierte hasta que las plantas se vuelven a iluminar. El carbono recién asimilado se acumula como azúcares, debido a que no están siendo utilizados para el crecimiento. Altos niveles de azúcares estimulan la síntesis de almidón. Durante la noche siguiente, este estímulo, junto con una menor tasa de degradación del almidón permite que las reservas de almidón duren hasta el final del período de oscuridad, evitando así el agotamiento de los azúcares y una inhibición aguda de crecimiento (Smith y Stitt, 2007). Sin embargo, cuando no hay fotoperiodo (ciclo normal día-noche), la planta almacena almidón para cubrir necesidades de crecimiento futuras (Walter y Schurr, 2005).

3. 2. Auxinas y prolinas

La *auxina* o *ácido 3-indol-acético (AIA)* es una hormona vegetal que participa en la división celular (Mapelli *et al.*, 1978; Bohner y Bangerth, 1988), expansión celular (Cleland, 2004), formación de las raíces (Weaver, 1998; Hartmann *et al.*, 2002; Campbell y Reece, 2007), crecimiento de las plantas (Campbell *et al.*, 2001), desarrollo del injerto (ShanFa, 2001), la retención de flores y fruta (Erner, 1989), la transición de la flor a fruta (Raghavan, 2003), follaje joven (compleja interacción) (Zeiger y Taiz, 2007), y los tropismos (Campbell *et al.*, 2001; Evert y Eichhorn, 1992; Starr-Taggart *et al.*, 2004; Zeiger y Taiz, 2007). Las formas de auxina en plantas fueron estudiados por Normanly *et al.* (2004).

El efecto de la auxina (AIA) en la longitud y el peso fresco y seco se ha estudiado en plántulas de tomate (Saniewski *et al.*, 2005) y en cultivares de trigo (Akbari *et al.*, 2007), en ambos estudios se determinó el aumento en dichos parámetros por efecto de la auxina, sin embargo, ésta no influyó en el porcentaje de germinación de las semillas ni en la longitud de la radícula. En las técnicas de propagación asexuales de plantas ornamentales, la auxina participa mejorando el enraizamiento debido a que esta hormona induce al desarrollo celular y estimula el crecimiento de las raíces (Kompen y Torres, 1987; Weaver, 1998; Rogel *et al.*, 2000; Hartmann *et al.*, 2002; Buitrago y Ramírez, 2003). Los niveles de auxina se relacionan con la calidad (Kurepin *et al.*, 2007) e intensidad de la radiación (Pacheco, 2001; Tofiño *et al.*, 2007; Kurepin *et al.*, 2008). La auxina puede ser sintetizada en las hojas y viajar por transporte polar

promoviendo el crecimiento de las plantas (Hartman y Kester, 1983). La luz es un factor ambiental que tiene un fuerte efecto en el transporte lateral del AIA y por lo tanto en la distribución de las auxinas en la planta (Yi y Guilfoyle, 1991; Horwitz, 1994; Salisbury y Ross, 1994; Boerjan *et al.*, 1995; Romano *et al.*, 1995; Jensen *et al.*, 1998).

Una vía de biosíntesis es a través del triptófano de los plástidos y citoplasma (Srivastava, 2002). La actividad de las auxinas se produce cuando la luz produce una transferencia de electrones a la molécula de AIA, bloqueando su síntesis donde recibe luz, el gradiente de concentración aumenta en el lado sin luz (Thornton y Thimann, 1967). La luz azul (B) produce una mayor cantidad de auxinas en las hojas; esta producción puede ser atribuida a la diferenciación celular (Horwitz, 1994) y al crecimiento de raíces secundarias (Günes, 2000) para asegurar la supervivencia de las plantas jóvenes (Geßner *et al.*, 1999).

La *prolina* es un aminoácido que actúa como un agente osmótico, protegiendo a la planta de la deshidratación. Está implicada en múltiples funciones de tolerancia al estrés de las plantas, actuando como mediador del ajuste osmótico (Delaunay y Verma, 1993; Kavi Kishor *et al.*, 1995; Yoshida *et al.*, 1997) en la recuperación y señalización (Szabados y Saviouré, 2009), también como estabilizador de estructuras subcelulares, protegiendo de la desnaturalización enzimática, regulando la acidez citosólica y manteniendo el equilibrio entre las formas oxidadas y reducidas del dinucleótido de nicotinamida y adenina (relación $\text{NAD}^+:\text{NADH}$) (Alia y Sharadi, 1991, 1993). La prolina ha demostrado que proporciona protección contra los radicales libres inducidos por el daño solar como el singlete de oxígeno ($^1\text{O}_2$), radicales hidroxilos, en general, con la extinción de especies reactivas de oxígeno (ROS), que se neutralizan por transferencia de carga reversible (Alia *et al.*, 1991; Alia *et al.*, 1993; Alia *et al.*, 2001), es un amortiguador del potencial redox (Schobert y Tschesche, 1978; Hare y Cress, 1997; Matysik *et al.*, 2002; Molinari *et al.*, 2004). Es decir, en condiciones de estrés como la sequía, la salinidad, temperaturas extremas, alta intensidad de luz, la cantidad y la calidad de luz juegan un papel en la promoción de la acumulación de prolina (Waldren *et al.*, 1974; Aspinall y Paleg, 1981; Hanson y Hitz, 1982; Delauney y Verna, 1993; Arora y Saradhi, 1995; Hare *et al.*, 1999; Mansour, 2000; Pacheco, 2001; Claussen, 2005; Tofiño *et al.*, 2007), aunque, la fotosíntesis no está relacionada con la concentración de prolina (Arora y Saradhi, 2002). El catabolismo de la prolina produce energía y cada molécula al oxidarse puede producir 30 equivalentes de adenosina-5'-trifosfato (ATP) (Atkinson, 1977). Demir (2000) y Amal *et al.* (2006) sugirieron la

prolina como protectora de las células contra el daño inducido por la generación de oxígeno reactivo, en los diferentes niveles de UV (radiación ultravioleta) en la *Malva parviflora* L., *Plantago major* L., *Rumex L. vesicarius* y *Sisymbrium erysimoids* Desf. Pardha Saradhi *et al.* (1995) informaron de la acumulación de prolina en las plantas superiores expuestas a radiación ultravioleta (UV). También se ha demostrado que la radiación UV induce la peroxidación de las micelas de ácido linolénico por promover la producción de singlete de oxígeno ($^1\text{O}_2$) (Bose y Chatterjee, 1993). Alia *et al.* (1997) indicaron que la prolina está involucrada en la reducción del nivel de $^1\text{O}_2$ y, por tanto, previene el daño a las membranas tilacoides durante la exposición a la luz fuerte.

Concretamente, en plantas de tomate se ha relacionado la prolina con la sal y la tolerancia a la sequía. Sánchez-Rodríguez *et al.* (2010) relacionaron el estrés oxidativo con los parámetros de crecimiento bajo estrés hídrico moderado de cinco cultivares de tomate cherry.

3. 3. *Macronutrientes: N, P, K*

El nitrógeno (N) y potasio (K^+) son de gran influencia en el crecimiento y desarrollo de la planta (Pettigrew y Meredith, 1997). La asimilación en la planta de N en forma de NO_3^- por la raíz (Dijkshoom, 1958) y el aumento de los compuestos de nitrógeno están favorecidos por altas dosis de K^+ (Ben Zioni *et al.*, 1971; Sáchez *et al.*, 2006). En el tomate, el K^+ no controla este mecanismo de absorción y distribución de NO_3^- hacia la parte aérea (Armstrong y Kirkby, 1979) sino que está influido por la luz (Armstrong y Kirkby, 1979), alta radiación estimula su metabolismo y baja radiación incrementa la concentración de NO_3^- y K^+ en relación a SO_4^{2-} y Mg^{2+} (Steiner, 1973).

En vivero, las semillas y plántulas de tomate necesitan una nutrición rica en P, Ruiz y Rathgeb (1990) encontraron que el contenido de P (%) obtenido con la fertilización fosfatada en plántulas de tomate fue de 0.18 a 0.25 %. De Groot *et al.* (2001), informaron que la deficiencia de P afecta al crecimiento, la fotosíntesis y la materia seca de las plantas de tomate jóvenes. Fujita *et al.* (2003) discutieron acerca de la P-deficiencia en relación con el agua y los efectos en tallo y diámetro de la fruta en la planta de tomate. Llegaron a la conclusión de que el diámetro del tallo de la planta se reduce durante el día expandiéndose durante la noche y P-deficiencia indujo a la contracción durante el día (por reducción de la influencia lumínica) y redujo la expansión de la fruta durante la noche.

Tremblay *et al.* (1997) utilizaron en la planta de tomate iluminación artificial por medio de lámparas de alta presión de sodio (HPS) aportando baja radiación y fotoperiodo largo (LILP) $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, esta iluminación causó una ligera disminución en la absorción de agua por unidad de materia seca, y un aumento de P y K^+ . La alta radiación y el corto fotoperiodo (HISP) $225 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ produjo la disminución de la absorción de N-P-K después de ocho semanas desde el trasplante. Esta iluminación disminuyó significativamente la concentración de N en la planta debido a que la luz estimula la producción de materia seca y causa la escasez de N. La relación N:K se redujo con la iluminación suplementaria, siguiendo probablemente un efecto depresivo de la planta en la región apical debido al efecto que la iluminación afecta a la absorción de N. Sin embargo, el efecto de los tratamientos de luz sobre el contenido de P en los brotes no fue significativo.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS

En este trabajo de investigación nos planteamos el objetivo genérico de estudiar la influencia de la iluminación artificial en sistemas de producción hortícola en Almería y el comportamiento de injertos hortícolas, plántulas de tomate y dos plantas ornamentales al variar la fuente de iluminación artificial.

Para cumplir con este objetivo general nos planteamos los siguientes objetivos específicos:

1. En primer lugar, estudiar la situación actual, en cuanto al empleo de luz artificial (calidad y datos luminotécnicos) en los sistemas de producción de invernaderos en la provincia de Almería.
2. En segundo lugar, ensayar con programa informático de simulación de instalaciones lumínicas (Dialux 4.8) posibles escenarios de cultivo (cámara de germinación y post injerto de hortícolas) y ajardinamientos de interior.
3. En tercer lugar, diseñar una mesa de ensayo para comparar y validar los datos de salida del programa informático con las medidas reales tomadas en nuestro propio diseño experimental. Para ello se propuso:
 - a) Estudiar la eficiencia energética de las simulaciones y de las pruebas realizadas en la mesa de ensayo.
 - b) Analizar los espectros de lámparas fluorescentes TLD y TL5, fluorescentes de bajo consumo, LEDs y combinaciones de fluorescentes con LEDs en rojo o azul y mezcla color rojo - azul).
4. En cuarto lugar, realizar un estudio teórico y de viabilidad para implantar un sistema solar fotovoltaico para alimentar las fuentes de luz instaladas en la mesa de ensayo.
5. En quinto lugar, una vez estudiadas energéticamente las disponibilidades de la mesa, se trata de evaluar la calidad de los injertos de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo cuatro tratamientos con fuentes de luz: fluorescentes compactas (CF), fluorescentes de alta eficiencia (TL5), fluorescente estándares (TLD) y diodos emisores de luz azul puro, (B-LED).

Para ello se analizaron la calidad espectral de las fuentes de iluminación así como factores morfológicos y fisiológicos de las plantas: biomasa, concentraciones de AIA y prolina en el desarrollo de las plantas además del contenido de hidratos de carbono.

6. En sexto lugar, se analizaron y evaluaron la calidad de las plántulas de tomate para posterior trasplante o para injertado al variar las fuentes de luz, mediante análisis morfológicos, fisiológicos y nutricionales: biomasa y de los hidratos de carbono, concentraciones de AIA en hoja, contenidos de prolina en hoja relacionados con el estrés lumínico generado por las distintas regiones espectrales, extracciones de N, P y K en plántulas.
7. En séptimo lugar, se evaluó la calidad de dos plantas ornamentales de interior (*D. compacta* y *F. verschaffeltii*) al variar las fuentes de luz, mediante análisis morfológicos y fisiológicos: biomasa, auxina endógena, prolina, carbohidratos y pigmentos fotosintéticos: clorofilas y carotenos.

CAPÍTULO IV. DESARROLLO METODOLÓGICO DE LOS TRABAJOS

1. Estudio de la situación actual de las entidades agrícolas almerienses respecto al uso de iluminación artificial

1. 1. Encuesta

Se realizó seleccionando entidades agrícolas a partir de un registro procedente de la Delegación de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. El número de entidades encuestadas fue alrededor de 50. Dicha encuesta aporta datos sobre (ver ANEXO II):

- el uso de luz artificial en invernaderos, viveros y semilleros.
- tipo de lámpara y potencia, disponibilidad de electricidad y usos, posibilidad de alimentación eléctrica mediante sistemas de energía solar fotovoltaica.
- características del invernadero, especies vegetales ornamentales y hortícolas cultivadas bajo condiciones de iluminación artificial adicional, tipo de energía usada para los sistemas de calefacción.
- comentarios sobre las próximas mejoras previstas en las explotaciones consultadas.

En función de la participación de las entidades agrícolas y los resultados de las encuestas, se seleccionaron varias entidades de producción agrícola que están usando luz artificial para su posterior visita y toma de datos.

1. 2. Toma de datos

En las entidades agrícolas visitadas se tomaron las referencias del tipo de lámparas y luminarias para conocer la calidad espectral. Se realizaron medidas de iluminancia con un luxómetro GOSSEN MAVOLUX 5032C USB, Faithful FT-710 y Lutron LX-100. Las medidas se realizaron a distintas alturas entre las plantas y las lámparas, estando éstas encendidas y apagadas.

2. Simulaciones con Dialux

2. 1. Cámara de cultivo

A través del programa informático Dialux 4.8, realizamos el dimensionamiento de la mesa de ensayo, teniendo en cuenta las lámparas, luminarias y niveles de iluminación más comunes en las cámaras de cultivo de los semilleros y viveros visitados. El programa Dialux presenta catálogos de lámparas y luminarias disponibles.

Las medidas de iluminancia tomadas *in situ* en las cámaras de cultivo de las entidades agrícolas visitadas se tomaron como datos de partida en el programa. Las salidas obtenidas mediante el Dialux van a servir como datos de partida para el diseño de nuestra mesa de ensayo.

Como las dimensiones de las bandejas portadoras de plantas suelen ser 1.80 x 1.50 x 0.80 m, también se tendrán en cuenta para el diseño.

Introducimos como datos de partida en el programa de simulación Dialux: tipo, potencia, disposición y número de lámparas y luminarias (Tabla 6).

Las lámparas de estas simulaciones, fluorescentes estándares y de alta eficacia con sus respectivas luminarias (TLD 18W /830 $\Phi=1350$ lm, TCS097 $\Phi=2700$ lm; TLD 58 W/840, $\Phi=2600$ lm, TMS022 2xTL-D IC $\Phi=5200$ lm y TL5 HE 35W/830, $\Phi=1650$ lm, 4MX691 2xTL5 HFP SI, $\Phi=3300$ lm), fueron escogidas mediante catálogo online de la casa comercial Philips e incluido como plugin (herramienta) en el software de simulación, al igual que de OSRAM y de Sylvania. Las lámparas fluorescentes compactas (CF) se obtuvieron de Sylvania (Mini-Lynx T 23 W $\Phi=1500$ lm), sus luminarias de OSRAM (GmbH 73210-43 DULUX® CARRÉ EL/P 2x24 W $\Phi=1500$ lm). Los LEDs RGB (mezcla color rojo-azul) GmbH OS-LM01A-W1 proceden de la casa OSRAM.

Los niveles de iluminación se establecieron en el rango de 2000 - 18000 lux, por ser valores medidos en semilleros y viveros de Almería.

La salida del programa nos proporcionó: datos luminotécnicos y evaluación energética, tablas de intensidad luminosa e imágenes tridimensionales, isolíneas de iluminancia con sus respectivos gráficos de valores.

Tabla 6. Datos de partida para las simulaciones con programa informático Dialux

Simulación	Lámpara/Color Potencia	Disposición de luminarias por nivel:		Φ total (lm)	P total (W)	η (lm/W)
		n ^o de líneas	n ^o de luminarias x línea			
1 ^a	TLD/830 18W	1	3	8100	153	52.94
2 ^a	TL5/830 35W	1	3	19800	234	84.61
3 ^a	TLD/840 58W	1	3	31200	399	78.19
4 ^a	CF/840 23W	1	4	6000	184	32.6
5 ^a	TLD/830 18W	1	3	8100	153	
	LED RGB	4	28 módulos	224	36	44
	TOTAL			8324	189	
6 ^a	TL5/830 35W	1	3	19800	234	
	LED RGB	4	28 módulos	224	36*	74.16
	TOTAL			20024	270	
7 ^a	TLD/840 58W	1	3	31200	399	
	LED RGB	4	28 módulos	224	36	72.24
	TOTAL			31424	435	
8 ^a	Mini-Lynx T	1	4	6000	184	
	LED RGB	4	28 módulos	224	36	28.3
	TOTAL			6224	220	

2. 2. Ajardinamiento de interior

Para el estudio del acondicionamiento lumínico de espacios interiores para ajardinamiento sin iluminación natural se procedió de la siguiente manera:

A través del programa informático Dialux, realizamos simulaciones teniendo en cuenta, el espacio iluminado, dimensiones del ajardinamiento, lámparas, luminarias y niveles de iluminación deseadas sobre el dosel vegetal. Como primera entrada del programa se introdujeron los datos del espacio que deseamos iluminar, 10 x 8 x 3 m, tomando como modelo espacios comunes de la propia Universidad de Almería. Fijamos una intensidad de iluminación general de 300 lux teniendo en cuenta el Código Técnico de la Edificación (CTE) para áreas comunes como entradas, pasillos, salas de espera, etc., que recomiendan valores de iluminancia de 50-300 lux (CTE, 2007). Como complemento para los espacios ajardinados la intensidad de iluminación media se fijó en 2000 lux.

Diseñamos el ajardinamiento e introducimos como superficies de cálculo las distintas alturas del dosel vegetal: S_0 a nivel del suelo, S_1 a 1.4 m del suelo, S_2 a 1.9 m desde el suelo, y S_3 a 2.4 m.

Los datos de salida del programa y su análisis se valoraron en función del menor número necesario de lámparas y menor potencia consumida así como de la homogeneidad de la luz.

Las simulaciones se hicieron con las siguientes tipos de lámparas:

2. 2. 1. Lámparas de descarga

Elegimos para los espacios ajardinados lámparas de descarga de alta presión de mercurio con sus respectivas luminarias: OSRAM GmbH 76110 FLORASET®-P 1 x HQL®-R 80 W DE LUXE de flujo luminoso 3000 lm, potencia 90 W. En el espacio no ajardinado optamos por iluminar con ORNALUX VNAC12C157 Pendular Nora para lámparas compactas de bajo consumo 1 x TC-TEL/GX24 q-5 cuyo flujo luminoso es 4300 lm y potencia 60 W.

2. 2. 2. Lámparas incandescentes estándares

Elegimos lámparas incandescentes estándar con sus respectivas luminarias: ORNALUX VP14E27 Pendular Cristal para lámparas estándar 1 x A65/E27 100 W y flujo luminoso 2200 lm. Que presentan un espectro continuo en la región del visible.

2. 2. 3. Lámparas LEDs de colores

A partir de la simulación anterior y con el fin de enriquecer el espectro de las lámparas incandescentes elegidas anteriormente, procedimos a complementar con LEDs. Añadimos, a las 35 lámparas estándar 1 x A65/E27 100 W (2200 lm), luminarias GHIDINI 6503.26F.T Margin Wall 20 Led 92° flood con lámparas: 1 x 20 LED BLUE 2W y flujo luminoso 24 lm.

3. Diseño de una mesa de ensayo

Las dimensiones de las bandejas portadoras de plantas en viveros y semilleros suelen ser 1.80 x 1.50 x 0.80 m. Basándonos en estas dimensiones, construimos una mesa modelo adaptado a las necesidades de nuestros futuros ensayos. El material elegido para su construcción es aluminio ya que es un material resistente a los cambios de temperatura y humedad, aunque la estructura metálica se mantenga en una cámara de dimensiones similares con condiciones de temperatura y humedad controlada.

Esta mesa constará de 4 niveles. Cada nivel debe contar con luminarias adosadas y bandeja de cultivo, para ello se colocaron conexiones en raíles en el techo de cada nivel para dar movilidad a los anclajes de las luminarias y adosar las luminarias.

Las lámparas seleccionadas para nuestros ensayos son: fluorescentes TLD 18W/830, fluorescentes TL5 35/830 (alta eficacia), fluorescentes compactas de bajo consumo Master PL Electronic 23W/840 y LEDs con luminaria ALUM 40·25 LED SMD RGB, consola DN-RGB FIBER LIGHT. Las salidas obtenidas por el programa se compararon con los datos tomados sobre cada bandeja de cultivo con el fin de validar los primeros como datos de partida a la hora de dimensionar una cámara de cultivo.

Posteriormente se procedió al montaje de las luminarias de fluorescentes y LEDs en la mesa de ensayo construida. Con el controlador DN-RGB para LEDs, se consiguieron colores puros (rojo, azul) y una mezcla de color rojo-azul con máxima intensidad equivalente a un violeta para el ojo humano. Se tomaron medidas de iluminancia con luxómetro GOSSEN MAVOLUX 5032C USB, habiendo previamente dividido el suelo de la bandeja de ensayo en cuadrículas similares a las que aparecen en el programa de ordenador (21x16 cm), marcando los puntos centrales para la toma de valores. Las medidas de irradiancia se tomaron con el espectro radiómetro portátil LI-COR 1800, (LI-COR inc. P.O. Box 4425 Lincoln, Nebraska 68504 USA). Se obtuvieron las curvas del espectro de emisión de las distintas fuentes de iluminación en el rango de longitudes de onda 300 a 1100 nm.

La eficiencia energética (VEEI) se calculó según la expresión (5) (ver apartado 1.3.1 del *capítulo II*). El análisis de estos datos se valoró en función de la homogeneidad de la luz y mejor eficiencia energética.

4. Implantación de un sistema solar fotovoltaico

Teóricamente se trata de estudiar la viabilidad para implantar un sistema solar fotovoltaico para alimentar los LEDs en nuestra mesa de ensayo. Establecimos que la instalación de tipo fotovoltaico fuese sencilla, económica y constase de módulos fotovoltaicos (orientados al Sur), acumuladores y regulador (Fig. 11). Toda la energía que se consume es en forma de corriente continua con tensión 12 V.

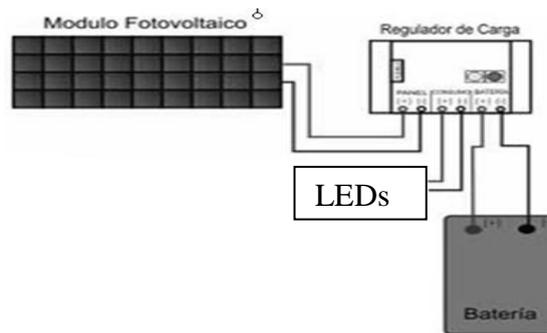


Figura 11. Esquema de la instalación fotovoltaica para alimentar los LEDs de una mesa de ensayo

Para calcular la instalación necesaria para alimentar nuestra mesa de ensayo, se siguió el procedimiento propuesto por la Agencia Andaluza de la Energía (2007). Por comparar dos situaciones con un consumo permanente de uso anual en Almería (zona V consultada en ASIF), elegimos el mes de agosto y de diciembre como representativos de las necesidades fotovoltaicas en épocas de máxima y mínima radiación. Los pasos a seguir son los siguientes:

4. 1. Cálculo de los consumos medios diarios en corriente continua

Siendo P la potencia en W del elemento consumidor (LEDs),

$$P1 = P \cdot n^{\circ} \text{ unidades LED} \quad (7)$$

La energía que se consumiría al día sería:

$$E1 = P1 \cdot 24h \text{ en Wh} \quad (8)$$

Si se considera un factor de seguridad de la instalación $F_s=15\%$, para tener en cuenta las distintas pérdidas eléctricas que puedan surgir en la instalación, el consumo medio diario en continua E_{cc} que en nuestro caso coincide con el total E_t (9) y potencia real P_{cc} (10) responden:

$$E_t = E_{cc} = E_l \left(1 + \frac{F_s}{100} \right) \text{ en Wh/día} \quad (9)$$

$$P_{cc} = P_l \left(1 + \frac{F_s}{100} \right) \text{ en W} \quad (10)$$

Por otra parte, para los meses de agosto y diciembre la radiación mensual R_m (kWh)/día para una inclinación de 45°, óptima en los paneles fotovoltaicos en Almería, le corresponde a 6.25 y 3.22 kWh/m² respectivamente.

Se define la relación mes consumo/radiación mensual como:

$$R_e = \frac{E_t}{R_m} \text{ en Wh/kWh/m}^2 \quad (11)$$

4. 2. Cálculo del sistema de acumulación

Se establecen las pérdidas de rendimiento en el sistema acumulador P_{ac} 10%, los días de autonomía D , 5 recomendado para instalaciones permanentes, la profundidad de carga 80%, tensión del sistema de acumulación $V=12$ V y capacidad necesaria del sistema C (Ah).

$$E_T = E_t \left(1 + \frac{P_{ac}}{100} \right) \text{ en Wh/día} \quad (12)$$

$$C = \frac{E_T \cdot D \cdot 100}{P_d \cdot V} \text{ en Ah} \quad (13)$$

Se ha elegido el modelo acumulador Hoppecke Energy 12V/250Ah.

$$N^{\circ} \text{ acumuladores} = \frac{C}{250} \cdot D \quad (14)$$

4. 3. Cálculo del número de módulos fotovoltaicos

Se ha elegido el modelo BP 3230N Generación Endura $P_{max}=230$ W por ser uno de los productos más ligeros del mercado que favorecen la instalación. Sus características pueden ser consultadas en los catálogos online de BP Solar. El número de módulos N_p se estima por la ecuación siguiente

$$N_p = \frac{R_e}{P_{max} \cdot 0.9} \quad (15)$$

La potencia a instalar corresponde a:

$$P_t = P_{max} \cdot N_p \text{ (Wp)} \quad (16)$$

4. 4. Cálculo del número de reguladores

Como lo recomendable es que exista un regulador por instalación, $N_r = 1$, se calculará en cada caso la intensidad a soportar por cada regulador. Como el módulo escogido BP3230N presenta $I_{mp} = 7.9$ A y corriente de cortocircuito $I_{sc} = 8.7$ A, la intensidad a soportar el regulador I_{sr} se obtiene según:

$$I_{sr} = I_{mp} \cdot N_{pp} \cdot 1.56 \text{ (A)} \quad (17)$$

Donde N_{pp} es el número de módulos en paralelo

1.56 es un coeficiente del módulo fotovoltaico.

Debe cumplirse, por lo tanto, que la intensidad del regulador elegido (I_r) sea:

$$N_r = \frac{I_{sr}}{I_r} = 1 \quad (18)$$

5. *Materia vegetal y tratamiento lumínico*

5. 1. *Injertos de tomate*

Las plantas injertadas fueron proporcionadas por la empresa ALMERIPLANT. El método de injerto de tomate (*Solanum lycopersicum*) utilizado fue púa y empalme, tubo con clip pequeño. Se han cultivado un centenar de injertos de tomate (cultivar ‘Myla’, como variedad, y ‘Maxifort’ como patrón) en bandejas de polietileno expandido para plántulas. Se utilizó sustrato turba cubierta con vermiculita. Las plantas fueron regadas diariamente con una solución nutritiva Steiner (1961), pH=5.5. La densidad de la plantación fue de 421 plantas·m⁻².

En la sala de crecimiento se montó un sistema de flujo de aire ascendente para la distribución suficiente de aire y para proporcionar las condiciones ambientales de CO₂. La temperatura del aire y la humedad relativa se mantenía en 17.5/19.8 °C (0.8 ± 0.2/0.1 °C) y 56.44/72.40% (6.65 ± 0.01%), respectivamente, y se mide con el instrumento digital de humedad-temperatura Testo 625 (Testo 625 modelo 0563 6251 Cabrils, Barcelona, 08348, España).

El experimento duró cinco días en febrero de 2009. El diseño experimental consistió en 4 tratamientos de iluminación con 20 repeticiones por tratamiento. La experiencia se llevó a cabo colocando las fluorescentes compactas (CF) en el nivel superior y el resto según el orden indicado en la tabla 7.

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) en el dosel vegetal se mantuvo en 46, 45.4, 27 y 6 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ con CF, TL5, TLD y B-LEDs, respectivamente, bajo un sistema de iluminación continua.

Tabla 7. Iluminación por tratamientos ordenados por nivel para los injertos

Tratamiento	Iluminación	Potencia (W)
CF	Fluorescente Compacta 23 W (4 lámparas)	92
TL5	Fluorescente Alta Eficiencia 35 W (1 luminaria MAXOS 4M691 x 2 lámparas)	70
TLD	Fluorescente estándar 18W (1 luminaria Philips TCS097 x 2 lámparas)	36
B-LED	Pure Blue-Light-Emitting Diodes (B-LEDs) RGB(4 líneas ALUM 40·25 LED SMD RGB x 9 W con consola DN-RGB FIBER LIGHT)	36

5. 2. *Plántulas de tomate*

Las plantas fueron proporcionadas por la empresa ALMERIPLANT. El ensayo comenzó el 16 de julio de 2009 con la plantación de 15 cultivares de tomate (Tabla 8) en cuatro bandejas de polietileno expandido. En cada plato, se distribuyeron 10 semillas de cada variedad.

Como sustrato se utilizó turba cubierta con vermiculita. La densidad de plantación fue de 421 plantas·m⁻². En el período previo del experimento, durante dos días, las bandejas se mantuvieron en una cámara de germinación a 27 °C con 90% de humedad relativa (HR) sin iluminación. Los brotes fueron trasladados al invernadero entre 34 a 35 °C y 53% a 55% HR. Después de 8 días, las plántulas tenían un aspecto vigoroso y estaban preparadas para su seguimiento en una cámara de cultivo donde fueron asignadas aleatoriamente a cada tratamiento de luz. La cámara se mantuvo a una temperatura y humedad constantes (34°C y 55% HR, respectivamente) y se utilizó una solución nutritiva completa (en g/20 l de agua: 11.2 KNO₃, 14.1 NH₄NO₃, 21.2 Ca-12S (0-20-0), 9 MgSO₄, 3 FeSO₄) para evitar la limitación de nutrientes o agua. La cámara estaba equipada con cuatro fuentes de luz como se describe en la tabla 9.

Tabla 8. Características comerciales e industriales de los cultivares de tomates

Cultivares	Planta	Fruto	Calibre	Alta Resistencia (HR)
Ikram (I)	Vigorosa, semi abierta, buena puesta a punto, incluso a bajas temperaturas	En ramos, muy uniforme, sabor firme, buen color	M-MM	ToMV 0-2; Fol 1- 2, V
Saladar (S)	Apta para agua salada, una larga vida útil, muy productiva durante todo el ciclo de cultivo	En ramos, ideal para la exportación	M-MM	M, TSWV, TYLC
Atlético(A)	Híbrido, larga conservación, hojas pequeñas de media, gran fecundación	En ramos, lisos, de color rojo muy atractivo	G-GG	ToMV, Fol 0-1, Va, Vd.
Delizia (D) y Conquista (C _{ON})	Buena producción, cultivo corto, ciclo híbrido	Cuello negro, sabor dulce	M-G	<i>fusarium</i>
Cornabel (C)	Rendimiento medio, tolerante al calor	Buena forma de la fruta de pera, de color rojo	G	Va, Vd, Fol 0- 1.
Rambo (R)	Planta vigorosa, de escasa distancia entre ramilletes, cultivo en invernadero	Buen sabor y color	G-GG	ToMV 0-2; V; Fol 1-2; For; Intermediate Resistance (IR): M
Anemon (A _N)		Torre de color de excelente calidad		TYLCV, M, For
Velasco (V)	Carnosa, vigor extraordinario, excelente cuajado con temperaturas bajas	Consistente, uniforme, cuello blanco	G-GG	ToMV; Ff:1-5; Va; Vd; Fol: 0,1; For
Bigran (B)	Vigorosa	En ramos	M	TYLCV
Myriade (M _Y)	Vigorosa, muy precoz	Alarga la buena conservación en la	G-GG	TMV, M, V, For, Fol2, Ff5.

		postcosecha		
Montenegro RZ (M _O)	Cultivo homogéneo	Grande, verde, gran sabor, excelente conservación en la postcosecha	G-GG	M, TYLC
Prodigy RZ (P)	Muy equilibrado en relación con la longitud de los entrenudos y la vegetación	Cuello verde, buena uniformidad y conservación, rojo en la maduración, firme	G-GG	ToMV, Va., Fol 0-1, For, My, TSWV, TYLCV
Zayno RZ (Z)	Compacta	Cuello notablemente negro, en ramo, excelente sabor, firmeza y conservación	GG	ToMV, Va, Fol 0-1, For, M, IR: TYLCV
Lynna RZ (L)	vigorosa, cultivo uniforme	Rojo, recogida en grupo o individualmente, gran firmeza, larga vida comercial	M-MM	ToMV, Goes, Fol 0-1, My, TSWV, TYLCV

Tomato mosaic virus (ToMV 0-2); *Fusarium oxysporum f.sp lycopersicil* (Fol 1, 2), *Verticillium* (V); nematodos (M), *suntanTomato Spotted Wilt Virus* (TSWV) y *spoon* (TYLC); *viral amplicon* (Va), *Verticilium dahliae* (Vd); *Fusarium oxysporum f.sp. radicis lycopersici*. (For); *Cladosporium 5* (Ff5).

Tabla 9. Características de lámparas y luminarias instaladas

Tratamiento	Lámparas y luminarias	Potencia (W)
T ₁	Fluorescente Compacta (8 Lámparas 23 W)	184
T ₂	Fluorescente TL5 (2 luminarias x 2 Lámparas 35 W)	140
T ₃	Fluorescente TLD (3 luminarias x 2 Lámparas 18 W)	108
T ₄	Pure Blue-Light-Emitting Diodes (B-LEDs) RGB (4 líneas ALUM 40*25 LED SMD RGB x 9 W con consola DN-RGB Fíber Light)	36

Aunque T₄ muestra menos energía que los otros tratamientos, nos permite estudiar la reacción morfogénica de los cultivos, reacción generada por la radiación

PAR y B que, según Dougher y Bugbee (2001), permite que el efecto de la luz B a nivel de fotoequilibrio del fitocromo y de la radiación PAR puedan ser separados.

El diseño experimental consistió en cuatro tratamientos de luz (Tabla 9, Fig. 12), con 10 repeticiones de cada variedad y tratamiento. Todas las plantas fueron cultivadas bajo un fotoperiodo de 24 h. El experimento finalizó el 24 de agosto 2009 cuando se dispuso el muestreo.

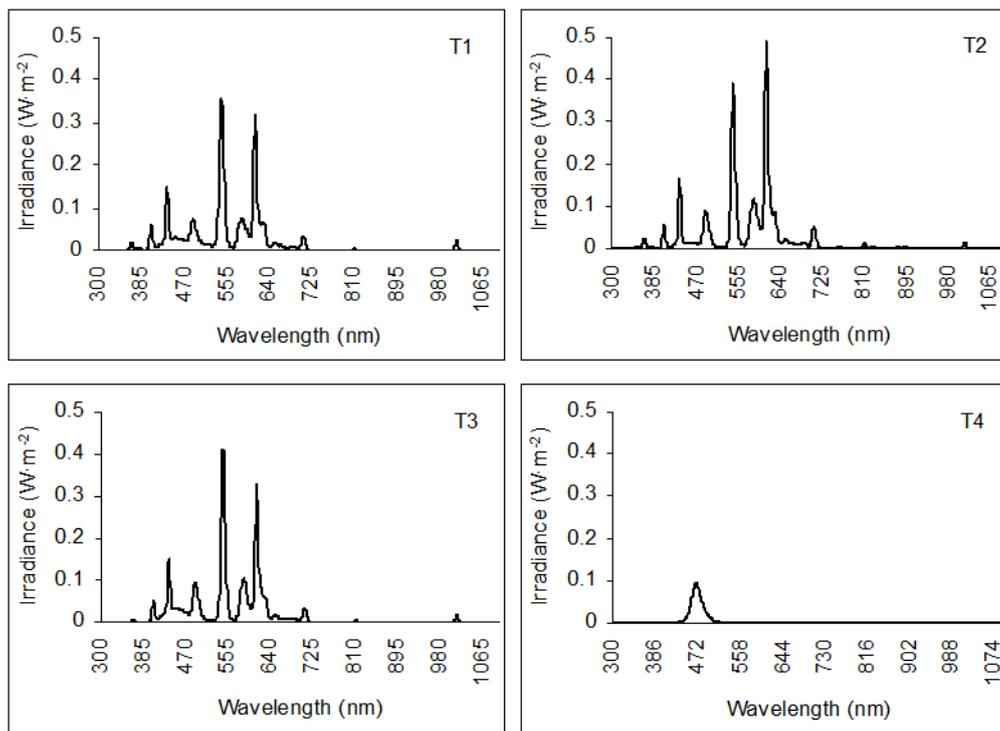


Figura 12. Calidad espectral medida a nivel del dosel vegetal de los diferentes tratamientos

5. 3. Plantas ornamentales: *Dieffenbachia compacta* y *Fittonia verschaffeltii*

D. compacta y *F. verschaffeltii* se obtuvieron de un vivero de la zona directamente en macetero y previa propagación asexual.

El experimento comenzó el 29 de Julio de 2010 con el traslado de ambas especies vegetales desde vivero a la cámara de cultivo. La cámara se mantuvo a temperatura (T^a) y humedad constante (RH) de 25 °C y 55% respectivamente. La cámara de cultivo (dimensiones 1.80 x 1.50 x 0.80 m) consta de varios niveles de donde se distribuyeron 10 plantas por nivel, 5 de cada especie. En cada nivel se colocaron previamente luminarias y lámparas para los tratamientos lumínicos según se describen en la tabla 10. El diseño experimental consistió en 3 tratamientos de iluminación

artificial continua con 4 repeticiones cada uno. El experimento terminó el 25 de Septiembre de 2010.

Tabla 10. Iluminación de *D. compacta* y *F. verschaffeltii*

Tratamiento	Iluminación	Potencia (W)	PPF ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
TL5	Fluorescente Alta Eficiencia 35 W (2 luminarias MAXOS 4M691 x 2 lámparas)	140	116
TLD	Fluorescente estándar 18W (4 luminarias Philips TCS097 x 2 lámparas)	144	106.8
TLD + LEDs	Fluorescente estándar 18W (3 luminarias Philips TCS097 x 2 lámparas) + Pure Blue and Pure Red Mix-Light-Emitting Diodes (BR-LEDs) RGB (4 líneas ALUM 40-25 LED SMD RGB x 9 W con consola DN-RGB FIBER LIGHT)	144	79.3

6. Análisis específicos

6. 1. Calidad espectral de las fuentes de iluminación y caracterización agronómica

El espectro de la radiación se midió en cada estante o nivel en el dosel vegetal con un espectrorradiómetro Licor 1800 (LI-COR inc. PO Box 4425 Lincoln, Nebraska 68504 EE.UU). Este instrumento descarga los datos medidos en software Excel 7.0 (o similar) que permite trabajar gráficos y tratamientos de los mismos. Todos los datos de irradiancia son medidos en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ y pueden ser transformados a otras unidades usando factores de conversión (ver Tabla 3).

La caracterización agronómica de los espectros obtenidos se basó en determinar los valores de radiación relevantes que caracterizan la calidad de la luz (Baille *et al.*, 2003). Para ello se estudiaron las regiones espectrales y ratios de interés agronómico como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. División del espectro de una fuente de iluminación

Regiones espectrales	Longitudes de onda λ (nm)	
Ultravioleta A	UV-A	320-400
Azul	B	400-500
Rojo	R	600-700
Rojo lejano	FR	700-800
Fotosintéticamente activa	PAR	400-700
Infrarrojo cercano	NIR	700-1100
TOTAL		300-1100
Ratios espectrales		
PAR:TOTAL		
PAR:NIR		
B:R		
B:FR		
R:FR		

6. 2. Biomasa

Al final de cada ensayo se procedió a extraer la muestra de las plantas necesarias para realizar el estudio de las variables morfológicas, para lo cual se extrajeron aleatoriamente una planta por tratamiento y repetición, que fueron introducidas en bolsas de plástico, y debidamente identificadas. Previamente, de cada planta se tomó una muestra de hoja, que tras su pesada se congela a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para realizar los análisis posteriores. Con una balanza de precisión (Mettler Toledo clásico PB303-S, CH-8606 Greifensee, Suiza), se midió la biomasa fresca de las siguientes fracciones (tejido fotosintético, tejido conductor y tejido radical).

Para poder obtener los pesos secos de los sistemas radicales se limpiaron los cepellones, separando las raíces del sustrato. Esta operación se realizó con mucho cuidado para romper el menor número posible de raíces y no dejar entre el sustrato raíz alguna. El material vegetal fue introducido en la estufa de ventilación forzada, durante 48 horas a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta su secado. Una vez seco el material, y antes de ser pesado, fue depositado en una campana de secado con gel de sílice, aproximadamente durante media hora, para evitar que captara humedad ambiental. Una vez pesados, las muestras se guardaron para realizar el análisis de nutrientes tras su molienda.

6. 3. Determinación de Auxinas

La extracción se realizó homogeneizando una cantidad entre 0.25-0.5 g de material vegetal fresco, con un 95%+70% (1:1 v/v) de etanol. Después de filtrar y centrifugar las muestras a 5500 rpm durante 10 minutos, se cuantificó el AIA en la fracción sobrenadante por colorimetría (Tien *et al.*, 1979), mediante un espectrofotómetro (Shimadzu UV-1201, Shimadzu, Kyota, Japón). Para ello se preparó una solución madre de AIA a 1 mg/ml (1000 ppm) tomando 50 mg de AIA grado reactivo para disolver con NaOH 1N en un vaso de precipitados, y aforando con agua hasta 50 ml. Esta disolución se llevó a matraz de 1 L y se aforó con agua. La solución se guardó en un frasco limpio, protegida de la luz, ya que la auxina es fotodegradable, correctamente etiquetada.

Curva patrón. A partir de la solución madre, se hicieron diluciones para tener una serie de 100, 80, 60, 40, 20, 10 y 0 ppm.

A partir de la serie preparada, así como de las muestras correspondientes a los ensayos descritos, se tomó 1 ml y transfirió a un tubo nuevo y etiquetado. Se añadieron 4 ml del reactivo de Salkowski y el color se desarrolló entre 30 y 60 minutos. Tras el desarrollo del color, se procedió a la lectura de la absorbancia a 550 nm, previo calibrado el espectrofotómetro con un blanco. El cálculo de la concentración de auxina en mg·L⁻¹ se obtuvo a partir de los datos de la ecuación de la recta ($Y=a+bX$). Posteriormente, se tuvo en cuenta el peso de hoja fresca en la extracción y de la planta completa.

6. 4. Determinación de Prolinas

La extracción para la determinación de la concentración de prolina, azúcares solubles y almidón se realiza según el método propuesto por Irigoyen *et al.* (1992).

Una cantidad entre 0.25-0.5 g de material vegetal fresco se homogeneiza con 5 ml de etanol al 95 % y, posteriormente, el mortero se lava dos veces con 5 ml de etanol al 70%. El homogeneizado se centrifuga a 5500 rpm durante 10 min y el sobrenadante obtenido se utiliza para la determinación de las concentraciones de prolina y azúcares solubles. El residuo se deseca durante 48 horas a 40 °C para, posteriormente, ser utilizado en el análisis de la concentración de almidón.

La mezcla de reacción consiste en:

- 2 ml de sobrenadante o extracto vegetal.

- 4 ml de agua desionizada.
- 2.5 ml de REACTIVO DE NINHIDRINA, preparado de la siguiente manera: 6.25 g de ninhidrina + 100 ml de ácido fosfórico 6 M + 150 ml de ácido acético glacial al 60 %.
- 2.5 ml de ácido acético glacial al 99%.
- Posteriormente se agitan bien los tubos y se introducen en un baño de agua a 100 °C durante 45 min.
- Pasado este tiempo, los tubos se introducen en un baño de hielo.
- A continuación se añaden 5 ml de benceno.
- Los tubos se agitan vigorosamente durante 1 min cada uno.
- Transcurridos 15 min, se lee la absorbancia a 515 nm de la fase líquida más elevada en el tubo frente a un patrón de prolina mediante un espectrofotómetro.

Curva patrón. Se parte de una solución madre de 25 $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$. A partir de esta solución madre se hicieron diluciones para tener una serie de 25, 12.5, 6.25, 3.125 y 0 $\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$.

6. 5. Determinación de Carbohidratos y Almidón

Para la determinación de la concentración de glucosa, sacarosa y fructosa se utiliza el mismo extracto vegetal que el utilizado para la determinación de la concentración de prolina.

La mezcla de reacción consistió en:

- 0.1 ml de extracto vegetal.
- 3 ml de REACTIVO DE ANTRONA, preparada de la siguiente manera: 300 mg de antrona se disuelven en 300 ml de ácido sulfúrico H_2SO_4 al 70%.
- Agitación de los tubos.
- Posteriormente, baño de agua a 100 °C durante 10 min.
- Nuevamente, agitación de los tubos.
- Para la determinación de la concentración de azúcares solubles (carbohidratos) las muestras se midieron frente a patrón de glucosa a 650 nm mediante un espectrofotómetro (Shimadzu UV-1201, Shimadzu, Kyota, Japón).
- Se realiza un blanco en el cual se sustituye la cantidad de extracto vegetal por mezcla etanólica (50% etanol al 95% y 50% etanol al 70% v/v).

Para la determinación de la concentración de almidón se utiliza el residuo procedente de la centrifugación descrita anteriormente. A dicho residuo se le añade:

- 2.5 ml de agua desionizada.
- 2.5 ml de buffer acetato 4 M pH 4.5 (se necesitan 200 ml).
- 2.5 ml de α -glucoamilasa al 0.5 % (0.5 g/100 ml de agua).
- Las muestras se incubaron durante 48 horas en oscuridad a 38°C.
- Tras dicho tiempo, las muestras se filtraron con embudos de papel.
- Posteriormente, la mezcla de reacción consistió en:
 - 0.1 ml de alícuota.
 - 3 ml de reactivo de antrona.
 - Baño de agua a 100 °C durante 10 min.
 - Enfriamiento (sin hielo).
 - Agitación de los tubos.
 - Medida de la absorbancia frente a una curva patrón de glucosa a 650 nm mediante el mismo espectrofotómetro.

6. 6. Determinación de N, P y K

Para la mineralización de las muestras vegetales el procedimiento a seguir es el siguiente (Wolf, 1982):

- Se pesó entre 0.15-0.2 g (o toda la muestra como en el caso de nuestras plántulas de tomate) de material vegetal seco en un trocito de papel celofán transparente.
- Una vez pesado, se introdujo junto al material vegetal una bolita de vidrio y todo envuelto a modo de caramelo.
- El envuelto se introduce en un tubo de mineralización.
- Posteriormente, se añadió a cada tubo de mineralización 3 ml de ácido sulfúrico puro y se dejó reposar durante 48 horas.
- Los tubos se colocaron en un baño de arena con una temperatura entre 90-100 °C durante 24 horas.
- Transcurrido este tiempo, la temperatura del baño de arena se aumentó a 325-350 °C.
- Alcanzada esta temperatura, se adicionó a los tubos entre 0.1 y 0.3 ml de peróxido de hidrógeno cada 30 min aproximadamente. Este procedimiento se

repitió tantas veces como fue necesario hasta que las muestras vegetales quedaron totalmente transparentes.

- Una vez obtenido un color totalmente transparente, los tubos se sacaron del baño de arena y enfriaron durante 24 horas. Se añadieron a cada uno de ellos 12 ml de agua desionizada.
- Agitación enérgica de los tubos.

Para la determinación de la concentración del N orgánico seguimos el método propuesto por Krom (1980).

Para ello en un tubo de ensayo:

- 0.1 ml de alícuota (tomada directamente de la mineralización de las muestras vegetales explicada anteriormente).
- 1 ml de REACTIVO 1, preparado de la siguiente manera: 8.5 g de salicilato sódico + 0.06 g nitroprusiato sódico, todo ello disuelto en 100 ml de agua desionizada.
- 1 ml de REACTIVO 2, preparado de la siguiente manera: 4 g de NaOH + 0.625 g dicloroisocianurato sódico, todo ello disuelto en 100 ml de agua desionizada.
- A los 45 min, se procedió a la lectura de la absorbancia de las muestras a una longitud de onda de 630 nm mediante el mismo espectrofotómetro. La concentración de N orgánico se expresa como $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ peso seco.

La concentración de P total de una muestra vegetal se determina siguiendo el método propuesto por Hogue *et al.* (1970).

Para dicha determinación se tomó:

- 0.5 ml de alícuota tomada del mineralizado 1.5 ml de agua desionizada.
- 3 ml de reactivo de fósforo, preparado de la siguiente manera: 800 ml de agua desionizada a hervir + 10 g de molibdato amónico + 5 g de vanadato amónico. Enfriado en hielo. Se añaden 4 ml de ácido nítrico gota a gota + 134 ml de ácido nítrico con una bureta. Finalmente, enrase a 1 L con agua desionizada.
- Añadido el reactivo de fósforo, los tubos deben ser bien agitados.
- Medida de la absorbancia de las muestras a 430 nm mediante el espectrofotómetro señalado frente a una curva patrón de fósforo tras 1 hora. La concentración de P total se expresa como $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ peso seco.

K^+ se estimó mediante espectroscopia de emisión de llama.

6. 7. *Determinación de Clorofilas y Carotenos*

El método utilizado para la extracción y cuantificación de los pigmentos foliares fue el descrito por Wellburn (1994). Consistió en:

- Pesar entre 0.2-0.3 g de material vegetal fotosintético (hojas sin nervios) fresco en taleolas eligiendo el radio de un sacabocados. Se anota el número de taleolas contenidas en el material vegetal pesado.
- Añadir 10 ml de metanol puro (CH₃OH).
- Las muestras se incuban a temperatura ambiente en oscuridad durante 24 h.
- Tras ese período de tiempo, se mide la absorbancia a 470 nm (carotenoides), 653 nm (clorofila b, Chl b) y 666 nm (clorofila a, Chl a).
- Debe realizarse un blanco que contenga únicamente metanol.

El cálculo de la concentración de pigmentos se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Chl a: } [15.65 \cdot (A_{666}) - 7.34 \cdot (A_{653})] = \text{mg l}^{-1} \text{ (conc. tubo de ensayo)} \quad (19)$$

$$\text{Chl b: } [27.05 \cdot (A_{653}) - 11.21 \cdot (A_{666})] = \text{mg l}^{-1} \quad (20)$$

$$\text{Carotenoides: } [1000 \cdot (A_{470}) - 2.86 \cdot (\text{Chl a}) - 129.2 \cdot (\text{Chl b})] / 221 = \text{mg l}^{-1} \quad (21)$$

Expresión por 100 g de peso fresco (mg por 100 g de FW)

$$\text{Pig (mg l}^{-1}) \cdot V \text{ (ml)} / 10^2 \text{ (100 g FW)} / 10^3 \text{ (ml l}^{-1}) \text{ P (g)} \quad (22)$$

Expresión en superficie (mg·cm⁻²)

$$\text{Pig (mg l}^{-1}) \cdot V \text{ (ml)} / 10^3 \text{ (ml l}^{-1}) \cdot \pi r^2 \cdot n \text{ (cm}^2) \quad (23)$$

V: Volumen de la extracción (10 ml)

P: peso total de la muestra (g)

n: número de taleolas

r: radio de la taleola

6. 8. *Análisis estadístico*

El análisis de los datos se realizó mediante los paquetes de software Excel 7.0 y Statgraphics (Stat-Point, Herndon, VA) plus 4.0.

Se utilizaron el análisis de la varianza y la prueba de Tukey para p<0.05 de separación de medias para evaluar el efecto de las lámparas empleadas en los siguientes parámetros: peso fresco (FW) y el peso seco (DW) para todas las fracciones de las plantas, concentraciones y capacidad de síntesis de AIA, prolina, azúcares y almidón,

además del contenido de N, P y K. Se utilizó la prueba de mínima diferencia significativa (LSD) para $p < 0.05$ para evaluar la importancia de la relación en los tratamientos estudiados entre la parte aérea y radicular del suelo [pesos secos de hojas y tallos/peso seco de raíz (LSDW: RDW)].

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Resultados de la encuesta y medidas realizadas en entidades agrícolas

Como resultado de la encuesta llevada a cabo podemos destacar:

1) En los invernaderos dedicados tan sólo a la producción hortícola no se está utilizando luz artificial adicional. El 100% de los semilleros y viveros de planta ornamental tienen disponible energía eléctrica para uso general en sus explotaciones, pero tan sólo el 8% de las 50 entidades consultadas están utilizando luz artificial tanto para iluminación complementaria como fotoperiódica. Concretamente en los semilleros hortícolas, se usa en cámaras de germinación y de injerto, en este último caso fundamentalmente se lleva a cabo en tomate, constituyendo el 80% del total de las entidades que sí usan iluminación artificial adicional. El 20% restante, en ornamentales, trata de incrementar la fotosíntesis e inducir la floración en especies como *Stephanotis floribunda* o jazmín de Madagascar.

En cuanto a la posibilidad de alimentación eléctrica mediante energía solar fotovoltaica, todos los encuestados están interesados en su uso, pero lo consideran poco rentable puesto que disponen de red eléctrica muy cerca de sus explotaciones.

Entre las próximas mejoras previstas en las explotaciones consultadas casi todas están relacionadas con el control ambiental (sistemas de calefacción, refrigeración, CO₂). La iluminación de los invernaderos para controlar tanto la producción como la calidad de las hortícolas lo ven como algo interesante pero no rentable. Sólo apuestan por este sistema de control ambiental los viveros de ornamentales y los semilleros.

2) En segundo lugar, los resultados de las visitas realizadas podemos agruparlos en dos apartados, según pertenezcan a uno de estos dos tipos de instalaciones:

- Viveros de producción de plantas ornamentales.
- Semilleros hortícolas.

En los viveros de producción de plantas ornamentales, las especies cultivadas dominantes, *Rosa sp* y *Stephanotis floribunda*, sometidas a una iluminancia media de 4430 y 4850 lx respectivamente. Las lámparas utilizadas en este tipo de instalaciones son de sodio de alta presión de 400 W. La iluminación complementaria que se lleva a cabo está dentro del rango de iluminancia recomendada por Philips de 3000-8000 lx y también por el sugerido por Osram de 2000-5000 lx. En cuanto a la calidad espectral de

las lámparas empleadas en estas instalaciones, presentan máxima intensidad en $\lambda = 600$ nm y un flujo fotónico fotosintético (PPF) de $660 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y la radiación PAR en 1000 lx corresponde a $2.55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ adecuada para mejorar la fotosíntesis y por consiguiente el crecimiento de las plantas.

En semilleros de Almería, la planta injertada mayormente producida es tomate, sometida a una iluminancia media de 1558 a 18000 lx dependiendo de la entidad productora. Las lámparas usadas mayoritariamente en estas instalaciones son fluorescentes tipo TLD 36 y 58 W. En semilleros, no hay uniformidad en la intensidad de radiación suministrada, sobre todo en la evolución de las plantas injertadas y ubicadas en cámara de cultivo, ya que las medidas realizadas en distintas instalaciones nos aportan un rango de 1558-18000 lx en comparación con los rangos sugeridos por Philips y por Osram. Estas diferencias están relacionadas con la distinta disposición, número y potencia de las lámparas, más que al tipo de lámpara. La calidad espectral de las lámparas TLD, presenta máxima intensidad en $\lambda = 615$ nm y una luminancia de $1.25\text{-}1.50 \text{ cd}\cdot\text{cm}^{-2}$ adecuada para mejorar la fotosíntesis y, por consiguiente, la actividad metabólica de la planta injertada. Podría usarse otro tipo de lámparas con mejor rendimiento lumínico, sin embargo, la necesidad de no aumentar excesivamente la temperatura de las cámaras hace aconsejable este tipo de fuentes de luz.

2. Resultados del programa de iluminación

2.1. Cámara de cultivo adaptada a nuestros ensayos

Comenzamos realizando dos simulaciones. En ambas, se eligieron cuatro superficies de cálculo coincidentes con la base de cada bandeja.

Simulación 1: se trata de tener en cada ensayo el mismo tipo de lámpara en todos los niveles de la mesa e ir repitiéndolos con todos los tipos de lámparas seleccionadas. Así, por ejemplo, en el caso de simular una iluminancia de 18000 lx en nuestra mesa de ensayo virtual (Fig. 13), seleccionando lámparas TLD 58W/840, el programa calculó seis lámparas por nivel, que dispuso en el espacio virtual de forma casi exacta a la observada en alguno de los semilleros visitados (Fig. 14 centro). Se cumplieron nuestras expectativas cuando comprobamos que la iluminancia y el diseño de la cámara eran coincidentes en nuestro ensayo virtual con semilleros visitados (Almansa *et al.*, 2007).

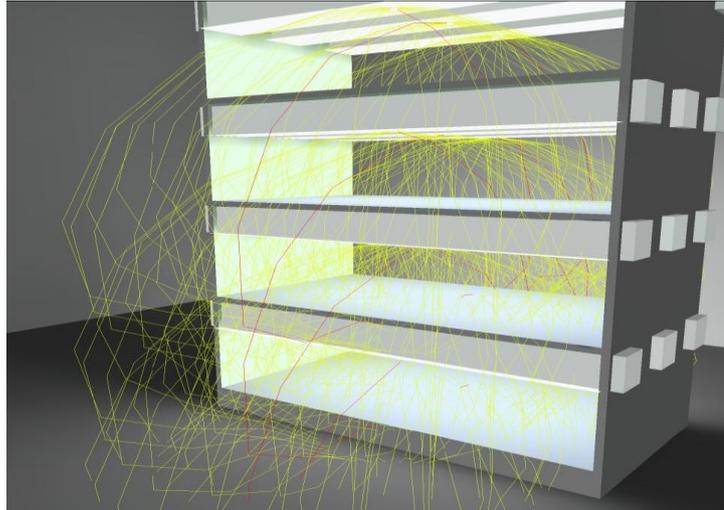


Figura 13. Interpretación en 3D de la *simulación 1* en la mesa ensayo



Figura 14. Ejemplos de iluminación en cámaras de cultivo

Simulación 2: en esta simulación, cada nivel de la mesa de ensayo correspondía a tratamientos distintos, es decir, distintas lámparas y luminarias, distinta intensidad de luz. En un principio, no se eligió ningún criterio en el orden de las lámparas pero sí en el número de unidades por nivel, que correspondió a tres, basándonos en la simulación anterior. Se observó que había mucha diferencia en cuanto a la iluminancia media en las distintas superficies del ensayo (simulación), que posteriormente podría perjudicarnos a la hora de hacer los ensayos con plantas.

Analizando los datos obtenidos para ambas simulaciones, se observó que existía solapamiento en los bordes de las superficies de cálculo en ambos casos, pero en el caso de la *simulación 2* (Fig. 15), al ser distintas fuentes de luz con distinta calidad espectral, ésto no es deseable para el ensayo. En todos los casos, el incremento indirecto sobre la intensidad luminosa media fue bastante apreciable. A la hora de programar ensayos con material vegetal en la futura mesa diseñada, habría que tener en cuenta este efecto.

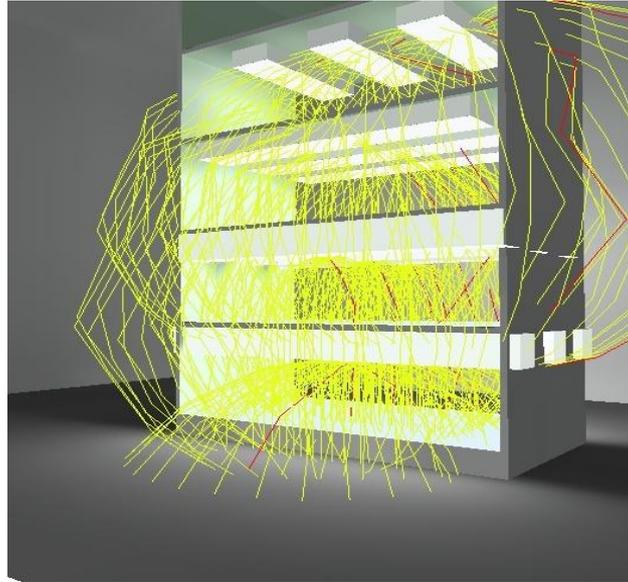


Figura 15. Interpretación en 3D de la *simulación 2* en la mesa ensayo

Se simularon todas las lámparas detalladas en el capítulo IV (apartado 2.1, Tabla 6), obteniendo los gráficos de valores de iluminancia, por nivel de mesa, indicados en la tabla 12.

Las iluminancias lumínicas medias sobre la base de la bandeja de cultivo y los valores de eficiencias energéticas de la instalación (VEEI) estimada por el programa se incluyen en la tabla 13.

El mayor nivel de iluminancia media (E_m) se consigue con la simulación 3ª que corresponde con la realizada con las lámparas TLD de 58 W.

El valor VEEI más alto corresponde a la simulación CF 23 W + LEDs RGB (mezcla color) de 8.59 Wm^{-2} por 100 lx. El menor valor pertenece a TL5 35 W y TLD 58W + LEDs RGB (mezcla color) ambos de 3.99 Wm^{-2} por 100 lx, ambos valores están dentro de los valores límites de eficiencia energética de la instalación de iluminación que presenta el Código Técnico de Edificación (CTE) tanto para zonas de no representación como de representación.

Las simulaciones 1ª, 3ª y 6ª muestran VEEI muy próximos, lo que nos puede dar a entender que con estos tres modelos de lámparas obtenemos valores de eficiencia en la instalación similares, aunque destacan las TLD 18 W frente a su análoga de 58 W. Entre las simulaciones 7ª y 8ª, de combinaciones fluorescentes y fluorescentes compactas con LEDs mezcla de color, se obtiene un valor mayor de VEEI con CF + LEDs RGB con un valor de 8.59 Wm^{-2} por 100 lx.

El mejor rendimiento luminoso se obtiene con la 2^a simulación, correspondiente a las lámparas TL5/830 35 W.

Tabla 12. Gráfico de valores de iluminancia (lx) obtenidos en las simulaciones con Dialux

<i>1^a Simulación TLD/830 18 W</i>							<i>2^a Simulación TL5/830 35 W</i>						
<u>1993</u>	2360	2533	2588	2483	2360	2105	3778	4993	5763	5978	5759	4987	3770
2395	2874	3053	3144	2970	2866	2551	4023	5411	6184	6446	6181	5405	4017
2537	3047	3243	<u>3346</u>	3153	3034	2709	4143	5542	6300	<u>6554</u>	6297	5537	4137
2392	2870	3037	3140	2940	2849	2548	3639	4809	5479	5676	5477	4806	3633
2011	2396	2548	2620	2500	2390	2120	2878	3761	4279	4445	4278	3758	<u>2872</u>
<i>3^a Simulación TLD/840 58 W</i>							<i>4^a Simulación CF/840 23 W</i>						
6316	8533	9754	10072	9728	8552	6387	1643	1840	1950	1961	1945	1837	1642
6799	9273	10672	11028	10632	9334	6880	1945	2169	2299	2302	2290	2167	1940
6997	9453	10777	<u>11059</u>	10808	9524	7120	2133	2379	2525	2531	2518	2376	2125
6287	8425	9593	9945	9583	8432	6371	1879	2095	2220	2227	2211	2091	1868
<u>4957</u>	6559	7461	7730	7459	6613	5030	1484	1675	1786	1802	1780	1671	1475
<i>5^a Simulación TLD/830 18 W + LEDs RGB</i>							<i>6^a Simulación TL5/830 35 W + LEDs RGB</i>						
<u>2052</u>	2429	2611	2670	2560	2430	2165	3707	4932	5691	5902	5688	4927	3701
2467	2957	3146	3242	3066	2950	2623	3969	5333	6099	6354	6097	5330	3964
2609	3125	3335	<u>3442</u>	3241	3117	2781	4078	5454	6192	<u>6426</u>	6191	5451	4073
2463	2954	3129	3238	3032	2931	2618	3590	4746	5404	5594	5402	4743	3585
2069	2463	2620	2699	2573	2461	2178	2837	3713	4219	4383	4218	3709	<u>2831</u>
<i>7^a Simulación TLD/840 58 W + LEDs RGB</i>							<i>8^a Simulación CF/840 23 W + LEDs RGB</i>						
6274	8467	9704	10018	9699	8486	6344	1719	1916	2039	2051	2035	1913	1720
6736	9186	10523	10903	10526	9212	6825	2022	2250	2387	2392	2379	2248	2019
6913	9320	10648	<u>10936</u>	10615	9376	7019	2200	2451	2599	2607	2593	2447	2194
6224	8322	9504	9821	9515	8335	6303	1943	2164	2293	2300	2284	2160	1933
<u>4917</u>	6507	7393	7654	7385	6557	4986	1544	1742	1858	1876	1853	1740	1535

Tabla 13. Iluminancias medias (Em), rendimiento luminoso (η) y eficiencias energéticas de la instalación de iluminación (VEEI) estimadas con Dialux

Simulación	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Lámpara	<i>TLD</i> /830 18W	<i>TL5/830</i> 35W	<i>TLD/840</i> 58W	<i>CF</i> /840 23W	<i>TLD/830</i> 18W <i>LEDs</i> <i>RGB</i>	+ 35W <i>LED</i> <i>RGB</i>	+ 58W <i>LEDs</i> <i>RGB</i>	+ 23 W <i>LED</i> <i>RGB</i>
Em (lx)	2677	4885	8404	2060	2756	4815	8319	2134
VEEI (W/m²por 100 lx)	4.76	3.99	4.31	7.44	5.71	4.67	3.99	8.59
η (lm/W)	52.94	84.61	78.19	32.6	44	74.16	72.24	28.3

2. 2. *Ajardinamiento de espacios de interior sin radiación luminosa natural*

2. 2. 1. *Lámparas de descarga*

En la simulación destacamos como salida del programa la disposición y número de las lámparas de bajo consumo como iluminación general del recinto ajardinado: 9 lámparas dispuestas en 3 líneas con 3 unidades cada una, suspendidas del techo. Flujo luminoso total de estas lámparas: 38700 lm. Potencia total: 540 W.

La disposición de las lámparas de mercurio de alta presión se realizó en tres líneas para los espacios ajardinados. Una línea corresponde al menor ajardinamiento, situándose a 50 cm sobre el dosel vegetal. Las otras 2 líneas se colocaron entre la superficie ajardinada, a 50 cm del dosel vegetal cuyas plantas presentan diferente altura. La línea más alta, equipada con 12 lámparas y la más baja con 8, ya que se tuvo en cuenta el solapamiento lumínico de las primeras con las segundas. En total son 25 lámparas HQL-R de Luxe. Flujo luminoso: 75000 lm. Potencia total: 2250 W.

El programa nos proporcionó datos de flujo luminoso total en la simulación aportado por ambos tipos de lámparas, 113700 lm, al igual que la potencia consumida, 2790 W. La eficiencia energética es de 34.88 Wm⁻²; 8.60 Wm⁻² por 100 lx (Base: 80 m²). Los resultados luminotécnicos están contenidos en la tabla 14.

La imagen tridimensional virtual del recinto ajardinado se presenta en la figura 16. Las figuras 17, 18 y 19 corresponden a gráfico de valores e isóneas de iluminancia para distinta altura del dosel vegetal.

Tabla 14. Resultados luminotécnicos HQL®-R 80W DE LUXE+TC-TEL/GX24 q-5

Superficie	Iluminancia (lux)		
	Directo	Indirecto	Total
S ₃	2094	124	2218
S ₂	1993	194	2187
S ₁	1903	117	2020
S ₀	232	71	303

S_n (superficie), n=0-4 (niveles desde el suelo, S₀, a las distintas alturas de las plantas)



Figura 16. Imagen tridimensional virtual del recinto ajardinado con iluminación artificial, lámparas de descarga y de bajo consumo

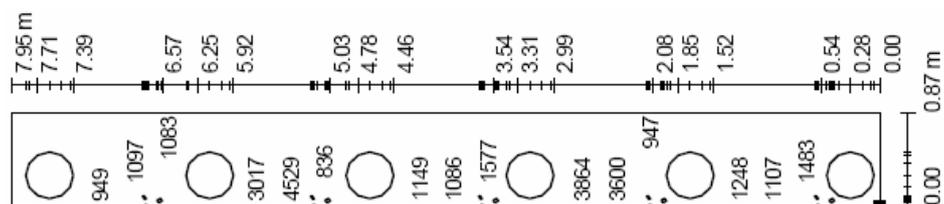


Figura 17. Gráfico de valores del plano S₁ (los valores están expresados en Lux y la escala empleada es 1:63)

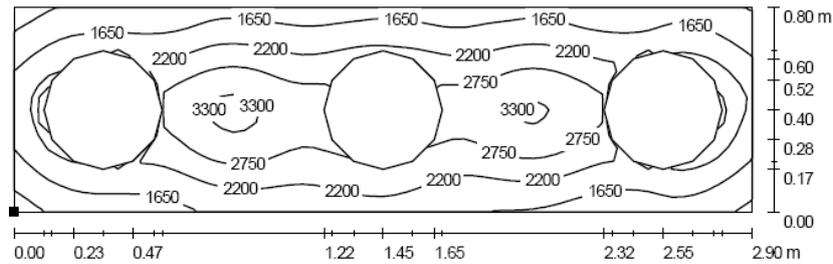


Figura 18. Isolíneas del plano S_2 (valores y escala empleada como en el caso anterior)

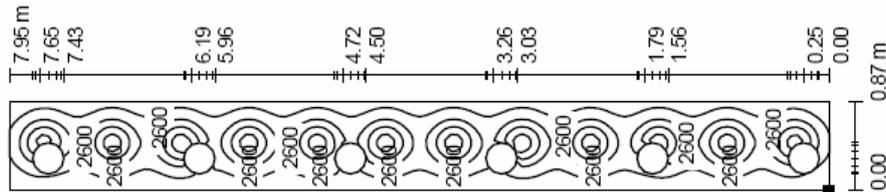


Figura 19. Isolíneas del plano S_3 (valores y escala empleada como en el caso anterior)

Observamos la luz recibida en las distintas superficies de cálculo insertadas, y vemos que la iluminancia recibida varía desde 303 lx en el suelo a 2218 lx en el dosel vegetal más alto. Si tenemos en cuenta el Código Técnico de la Edificación (CTE) vemos que es una iluminación apta para el ojo humano ya que la iluminancia a nivel del suelo es de 303 lx, valor que se precisa en estos ambientes de interior.

Por otro lado, las condiciones lumínicas de 2000 lx para los ajardinamientos cumplen todas las expectativas previstas, ya que en todas las superficies de cálculo el valor total de iluminancia expresado en lux varía de 2020 a 2218, valores superiores al inicialmente propuesto. La cantidad de luz de asimilación aportada por estas lámparas cada 1000 lx y expresada en $\mu\text{mo}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ corresponde a 14.1 (Cascón, 2006), si tenemos en cuenta que la distribución luminosa en las superficies de cálculo supera los 2000 lx, cada planta del dosel vegetal está recibiendo aproximadamente unos $28.2 \mu\text{mo}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, valor superior a los $25 \mu\text{mo}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ mínimos recomendados por especies ornamentales sin necesidades lumínicas altas.

2. 2. 2. Lámparas incandescentes estándares

En la simulación con lámparas incandescentes ORNALUX VP14E27 1xA65/E27, destacamos como salida del programa la disposición y número de las mismas, 35 lámparas dispuestas en 5 líneas con 7 unidades cada una, suspendidas del techo. Flujo luminoso total: 47600 lm. Potencia total: 3500 W. La eficiencia energética

es de 43.75 Wm^{-2} ; 14.95 Wm^{-2} por 100 lx (Base: 80.00 m^2). Los resultados luminotécnicos están contenidos en la tabla 15.

Tabla 15. Resultados luminotécnicos ORNALUX VP14E27 1xA65/E27

Superficie	Iluminancia (lx)		
	Directo	Indirecto	Total
S ₃	371	121	493
S ₂	134	91	225
S ₁	197	144	341
S ₀	110	101	211

La imagen tridimensional virtual de la propuesta ajardinada se presenta en la figura 20. Las figuras 21, 22 y 23 corresponden a isolíneas de iluminancia para distintas alturas del dosel vegetal.



Figura 20. Imagen tridimensional virtual del recinto ajardinado con iluminación artificial

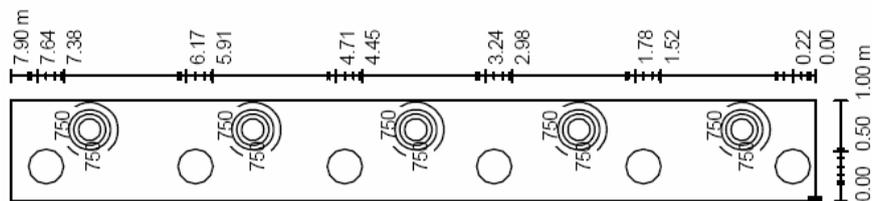


Figura 21. Isolíneas del plano S₃ (los valores en lux y la escala empleada es 1:62)

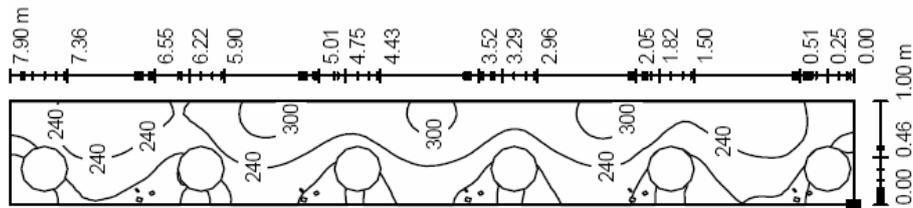


Figura 22. Isolíneas del plano S₂ (los valores en lux y la escala empleada es 1:62)

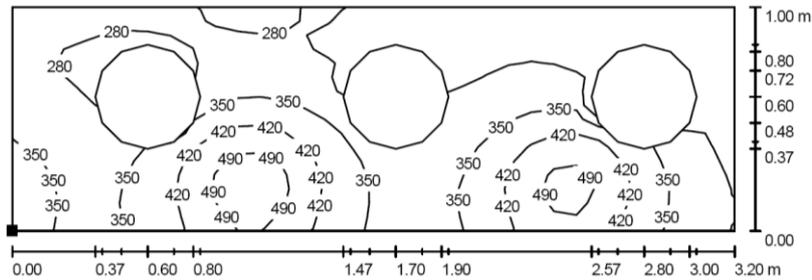


Figura 23. Isolíneas del plano S₁ (los valores en lux y escala empleada es 1:23)

Observamos la luz recibida en las distintas superficies de cálculo insertadas; la iluminancia recibida varía desde 211 lx en el suelo a 493 lx en el dosel vegetal más alto; estos datos están referidos a potencia luminosa integrada en el rango de visión humana (400-700 nm) y ponderada porcentualmente en función de la capacidad de visión (Fig. 24).

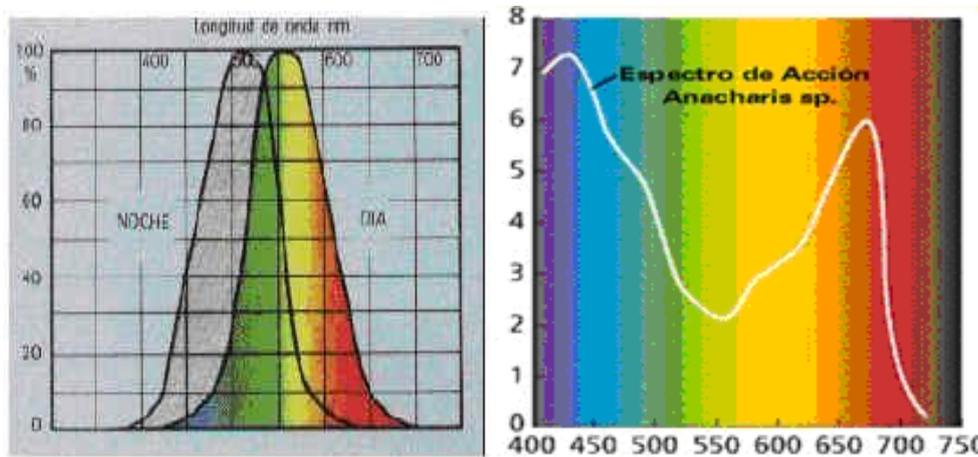


Figura 24. Izq.: curva de sensibilidad del ojo humano (Levine, 2000). Dcha.: curva de absorción de radiación por los pigmentos fotosintéticos (Hernández, 2002)

Teniendo en cuenta el CTE, vemos que es una iluminación apta para el ojo humano ya que la iluminancia a nivel del suelo es de 110 lx, valor por encima de los 50 lx mínimos que se precisan en estos ambientes de interior. Los valores de iluminancia que se presentan para alturas del dosel vegetal iguales o mayores de 1.4 m se encuentran

en el rango de los puntos de compensación de gran cantidad de plantas de interior. Sin embargo, la calidad espectral requerida para la visión humana y como fuente energética de las plantas difiere (Fig. 24), por ello depende de la calidad espectral de la luz emitida por la lámpara la que decidirá su uso. El flujo luminoso Φ de esta lámpara se modifica a lo largo del espectro visible en función de la longitud de onda (λ) según la ecuación:

$$\Phi \cdot 10^3 = 1.1667 \cdot \lambda - 2578.31 \quad (24)$$

Pendiente obtenida de la figura 7, lo que significa que la radiación emitida en la región del azul es baja y alta en la región del rojo, que desde el punto de vista fotosintético puede compensar las necesidades fotosintéticas de muchas plantas de interior. Por otra parte, si consideramos los efectos sobre la morfología de la planta (radiación MAR) puede suponer cambios fotomorfológicos afectando a lo que conocemos como respuestas de alta intensidad (HIR) (Pérez *et al.*, 2005).

2. 2. 3. Lámparas LEDs de colores

Se han evaluado los LED de luz blanca para la iluminación de la estancia cumpliendo las normas CTE, necesitándose 528 lámparas tipo Spot LED 4.4 W 100 lm, y eficiencia energética 29.04 W/m²por100 lx, presentando un coste de instalación que no se puede justificar.

Con estos resultados previos, utilizamos las lámparas incandescentes ORNALUX VP14E27 1xA65/E27, del trabajo anterior, cuya disposición y número de las mismas fue de 35 lámparas dispuestas en 5 líneas con 7 unidades cada una, suspendidas del techo. Atendiendo a los resultados del trabajo anterior, se utilizan LED BLUE para complementar la calidad espectral de la radiación emitida.

Introducimos 12 piezas de LED BLUE dispuestas en 2 líneas con 5 unidades y 1 línea con 2 unidades, todas ellas empotradas en la pared e intercaladas entre las plantas que se hicieron coincidir en altura con las de las superficies de cálculo anteriormente insertadas, resultando: flujo luminoso total: 47888 lm; potencia total: 3524 W. La eficiencia energética fue de 44.05 Wm⁻²; 15.05 W/m²por100 lx (Base: 80 m²). Los resultados luminotécnicos están contenidos en la tabla 16.

La imagen tridimensional virtual de la propuesta ajardinada se presenta en la figura 25. Las figuras 26, 27 y 28 corresponden a isolíneas y gráficos de valores de iluminancia para distintas alturas del dosel vegetal.

Observamos la luz recibida en las distintas superficies de cálculo insertadas: la iluminancia recibida varía desde 111 lx en el suelo a 504 lx en el dosel vegetal más alto.

Tabla 16. Resultado luminotécnicos

Superficie	Iluminancia (lx)		
	Directo	Indirecto	Total
S ₃	380	123	504
S ₂	202	143	345
S ₁	143	83	226
S ₀	111	99	210



Figura 25. Imagen tridimensional virtual de la propuesta ajardinada. Módulos LED adosados en paredes ajardinadas e iluminación ambiental con incandescentes adosadas en techo. Superficies de cálculo vistas como planos a distintas alturas del ajardinamiento

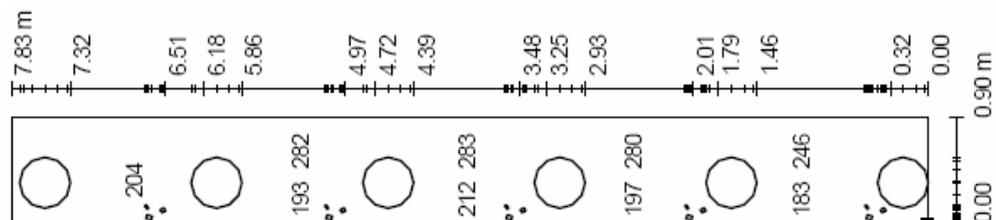


Figura 26. Gráfico de valores de superficie de cálculo 1; altura 1.4 m desde el suelo (valores en lx, escala 1:62)

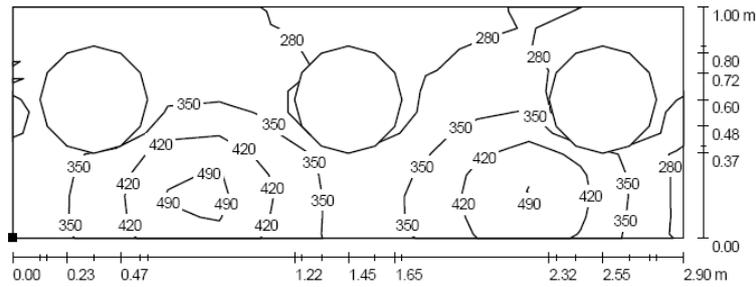


Figura 27. Isolíneas de superficie de cálculo 2; altura 1.9 m desde el suelo (valores en lx, escala 1:21)

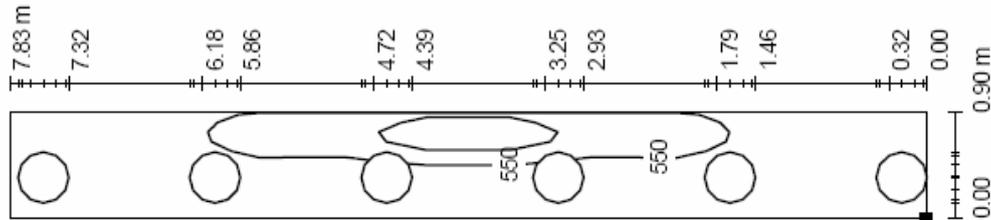


Figura 28. Isolíneas de superficie de cálculo 3; altura 2.4 m desde el suelo (valores en lx, escala 1:62)

Teniendo en cuenta el CTE vemos que es una iluminación apta para el ojo humano ya que la iluminancia a nivel del suelo es de 111 lx, valor por encima de los 50 lx mínimos recomendados para estos ambientes de interior. De forma general, estos valores permiten el mantenimiento de plantas herbáceas de sombra, coníferas y helechos (Larcher, 1983). En cuanto a la calidad espectral de la luz (Fig. 6 y 29), debemos considerar que el flujo luminoso (Φ) se expresa por la ecuación:

$$\Phi_{hm} = Km \int_{380}^{760} V\lambda \Phi_{rad} \cdot d\lambda \quad (25)$$

Siendo $Km = 683 \text{ lum}\cdot\text{W}^{-1}$, λ longitud de onda de la radiación emitida (nm), $V(\lambda)$ coeficiente de visión del observador (%) y Φ_{rad} es el flujo radiante (W).

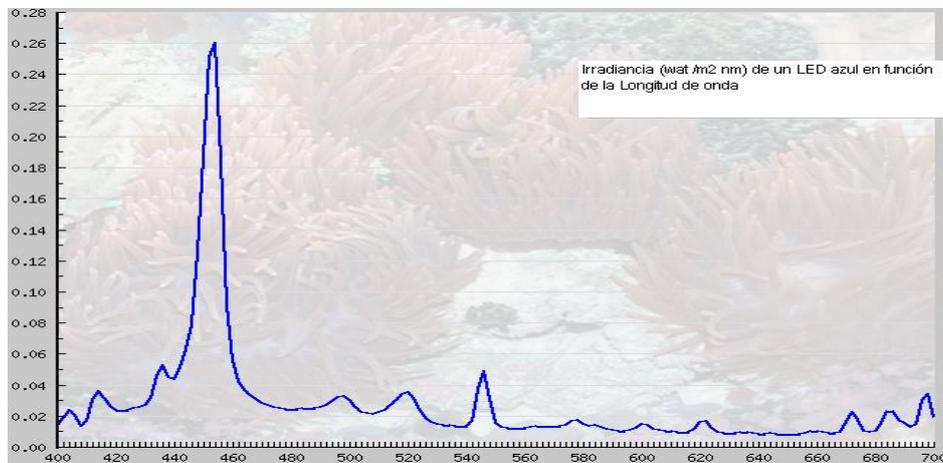


Figura 29. Espectro de emisión de la lámpara LED azul (catálogo OSRAM)

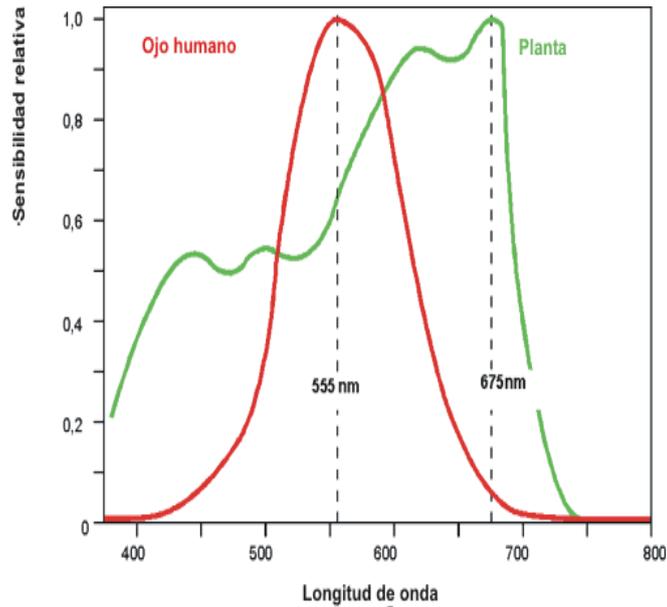


Figura 30. Espectro de absorción de clorofilas a, b y carotenoides. Espectro de visión humana (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, España)

La ecuación 24 se puede utilizar para definir la radiación PAR como la integral del flujo radiante en el rango de 400-700 nm. Los LED azules, presentan un rango estrecho de emisión con un valor máximo a $\lambda = 450$ nm y a esta λ la sensibilidad del ojo humano está en torno al 15% ($V(\lambda)$) (Fig. 30) lo que supone que ni el flujo ni, por tanto, la iluminancia son parámetros sensibles para estimar la PAR en este tipo de lámparas. En consecuencia, las salidas del programa Dialux no ofrecen la información adecuada, con respecto a las lámparas usadas, para su empleo en ajardinamientos de interior.

3. Validación del diseño de la mesa de ensayo

Para poder comprobar el comportamiento real de la mesa con las distintas lámparas se miden las iluminancias, y se calcula la eficiencia energética de la instalación (VEEI). Estos resultados se comparan con los obtenidos mediante el programa de simulación y así validar el diseño.

Los resultados de las medidas de iluminancia tomadas con el luxómetro sobre un nivel de la mesa de ensayo se presentan en la tabla 17, donde el valor de cada celda se corresponde con el valor medio obtenido en cada cuadrícula en la que se dividió la mesa.

Tabla 17. Gráfico de valores en lux tomados en el suelo de uno de los niveles de la mesa de ensayo

<i>TLD/830 18 W</i>							<i>TL5/830 35 W</i>						
1430	1825	2040	2160	2110	1930	1560	3290	4470	5030	5190	4990	4540	3480
1980	2570	2940	3020	2930	2680	2140	4010	5420	6100	6320	6140	5640	4190
2230	2930	3200	3430	3300	3020	2380	4260	5880	6570	6570	6580	6000	4550
2020	2690	2920	3160	2980	2740	2090	4070	5600	6160	6160	6190	5640	4300
1520	1950	2110	2350	2190	1970	1600	3440	4620	5220	5220	5090	4620	3660
<i>TLD/840 58 W</i>							<i>CF/840 23 W</i>						
6000	8070	9070	9330	8940	8000	6140	1077	1600	2045	2230	2290	2150	1830
6850	9200	10300	10540	10070	9170	7050	1092	1693	2190	2400	2490	2370	2020
7060	9520	10570	10970	10660	9610	7060	1150	1830	2350	2580	2640	2500	2120
6410	8600	9550	9800	9560	8500	6380	1110	1745	2190	2400	2440	2360	2010
5000	6440	7370	7560	7300	6480	4950	1097	1600	2070	2260	2350	2210	1850
<i>TLD/830 18 W + LEDs RGB</i>							<i>TL5/830 35 W + LEDs RGB</i>						
1430	1810	2090	2210	2130	1930	1560	3280	4540	5180	5300	5190	4730	3660
1980	2550	2800	3000	2930	2660	2140	4080	5550	6280	6470	6400	5790	4370
2140	2870	3160	3380	3280	3020	2370	4370	6020	6780	6960	6780	6150	4690
2020	2640	2870	3040	2910	2700	2170	4200	5800	6450	6620	6390	5820	4370
1520	1950	2090	2280	2210	2010	1560	3555	4680	5340	5485	5380	4730	3700
<i>TLD/840 58 W + LEDs RGB</i>							<i>CF/840 23 W + LEDs RGB</i>						
6000	8150	9150	9450	9150	8150	6050	1153	1680	2110	2340	2380	2220	1930
7020	9350	10550	10750	10400	9200	7000	1180	1804	2270	2510	2590	2440	2100
7200	9700	10900	11180	10800	9700	7200	1228	1943	2440	2690	2730	2590	2240
6440	8600	9800	9910	9500	8620	6570	1194	1830	2270	2520	2520	2450	2110
5050	6500	7530	7600	7430	6600	5060	1132	1660	2110	2390	2440	2260	1930

Las iluminancias medias sobre el suelo de la bandeja de cultivo y las VEEI calculadas con la expresión (4) en la mesa de ensayo están reseñadas en la tabla 18. El mayor valor de VEEI calculado en estos ensayos pertenece a la combinación CF 23 W + LEDs RGB (mezcla color) de 9.08 W/m²por100 lx; el menor valor corresponde a TL5 35 W. Las medidas en 3^a, 6^a y 7^a con valores de VEEI muy próximos, indican que dichas lámparas proporcionan similares valores de eficiencia energética para la instalación, aunque destacan las TLD 18 W combinadas con LEDs RGB (mezcla color) frente a su análoga de 58 W o la TL5.

Tabla 18. Iluminancias medias (Em) y eficiencias energéticas de la instalación (VEEI) en mesa de ensayo

Medidas	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a
Lámpara	<i>TLD</i> <i>/830</i> <i>18W</i>	<i>TL5</i> <i>/830</i> <i>35W</i>	<i>TLD</i> <i>/840</i> <i>58W</i>	<i>CF/840</i> <i>23W</i>	<i>TLD</i> <i>/830</i> <i>18W</i> <i>+ LEDs</i> <i>RGB</i>	<i>TL5</i> <i>/830</i> <i>35W</i> <i>+ LED</i> <i>RGB</i>	<i>TLD</i> <i>/840</i> <i>58W</i> <i>+ LEDs</i> <i>RGB</i>	<i>Mini-</i> <i>Lynx</i> <i>23 W</i> <i>+ LED</i> <i>RGB</i>
Em (lux)	2403	5120	8231	2010	2403	5288	8350	2097
VEEI (W/m ² por100lx)	5.3	2.9	4.03	7.63	6.85	4.39	4.42	9.08

El valor de VEEI más pequeño se consigue con la simulación 2ª, que corresponde a las lámparas TL5 y el valor más alto de VEEI se corresponde con la simulación 8ª, que corresponde a la combinación CF 23 W+LEDs RGB (mezcla color). Por otra parte, el nivel de iluminación mayor se consigue con la simulación 7ª, correspondiente a la combinación de lámparas TLD+LEDs RGB (mezcla color).

Los valores de iluminancia y VEEI obtenidos, tanto en simulaciones como los medidos en la mesa de ensayo, son aproximados. En la tabla 19 se expresan estas variaciones de los valores como diferencias porcentuales entre simulaciones y ensayos.

Tabla 19. Diferencias porcentuales en valor absoluto de Em y VEEI entre simulaciones y medidos en mesa de ensayo

Diferencias %	<i>TLD/830</i> <i>18W</i>	<i>TL5/830</i> <i>35W</i>	<i>TLD/840</i> <i>58W</i>	<i>CF/840</i> <i>23W</i>	<i>TLD/830</i> <i>18W</i> + <i>LEDs</i> <i>RGB</i>	<i>TL5/830</i> <i>35W</i> + <i>LED</i> <i>RGB</i>	<i>TLD/840</i> <i>58W</i> + <i>LEDs</i> <i>RGB</i>	<i>Mini-Lynx</i> <i>T</i> <i>23 W</i> + <i>LED</i> <i>RGB</i>
Em	10.24	4.81	2.06	2.44	12.81	9.82	0.37	1.74
VEEI	11.34	27.31	6.49	2.55	14.71	8.99	8.77	1.74

Podemos establecer que, en valores de Em, la mayor diferencia porcentual entre simulaciones y medidas corresponde a la combinación de lámparas fluorescentes TLD 18 W con LEDs RGB mezcla color rojo-azul (12.81%); el menor porcentaje de variación corresponde a la combinación TLD 58 W + LEDs RGB (0.37%).

Respecto a los valores de eficiencia energética entre simulaciones y ensayos, la mayor diferencia porcentual corresponde a TL5 35 W (27.31%) y la menor Mini-Lynx T 23 W + LED RGB (1.74%).

Otra observación sobre estas diferencias porcentuales es la homogeneidad que presentan las lámparas CF/840 23 W, ya que la variación en % de iluminancia media y eficiencia energética son 2.44% y 2.55% respectivamente. Lo mismo ocurre en la combinación CF 23 W + LEDs RGB de 1.74%, tanto en Em como VEEI.

En la figura 31 se puede ver el espectro radiómetro bajo dos tipos de iluminación artificial en la mesa de ensayo. Los espectros obtenidos con espectro radiómetro se presentan en la figura 32, tanto de lámparas solas como las de las combinaciones de las mismas con LEDs (rojo-azul).



Figura 31. Imágenes de dos ensayos tomadas en mesa de pruebas. Izq.: Fluorescentes estándares combinados con LED en rojo. Dcha.: Iluminación con LED RGB en mezcla color rojo-azul (violeta)

Observando la figura 32, se ve como en el intervalo de 400 a 530 nm, el espectro resultante de la combinación de TLD + LEDs tiene un pico de máxima emisión no presente en el de TLD y corresponde a la longitud de onda $\lambda = 470$ nm. También se intensifica y se ensancha el pico de $\lambda = 488$ nm. Es decir, esta combinación ha agrandado la región del espectro que hace PAR en el intervalo de 400 a 530 nm gracias a la aportación de los LEDs azules. Se aprecia que las lámparas más ricas en rojo son las TLD 35 W, TLD 58 W y las CF 23 W; en azul son muy similares las TLD 18 W y las CF 23 W, aunque estas últimas presenta un pico de máxima absorción en 364 nm, al igual que las TL5 35 W.

La integral del área correspondiente a la ganancia energética proporcionada por TLD + LEDs rojo-azul nos da un valor de $0.3891 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ respecto a TLD. Para CF+ LEDs, como en el caso anterior, el aporte de los LEDs al espectro es apreciable por un ensanchamiento del área en el azul de 400 a 530 nm y en el rojo se destaca el intervalo $\lambda = 615\text{-}660$ nm debido a que es la región donde los LEDs rojos tienen su máxima emisión, $\lambda = 636$ nm. Esta combinación ha agrandado la región del espectro que hace PAR en los intervalos de 400-530 nm y 615-660 nm gracias a la aportación de los LEDs mezcla color (rojo-azul). La integral del área correspondiente a la ganancia energética proporcionada por CF + LEDs rojo-azul nos da un valor de $0.3542 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ respecto a CF. Este valor de ganancia energética está repartido entre ambas regiones (rojo y azul), lo que no ocurre con la ganancia en el ensayo TLD + LEDs que, aunque superior, sólo es relevante en la región del azul.

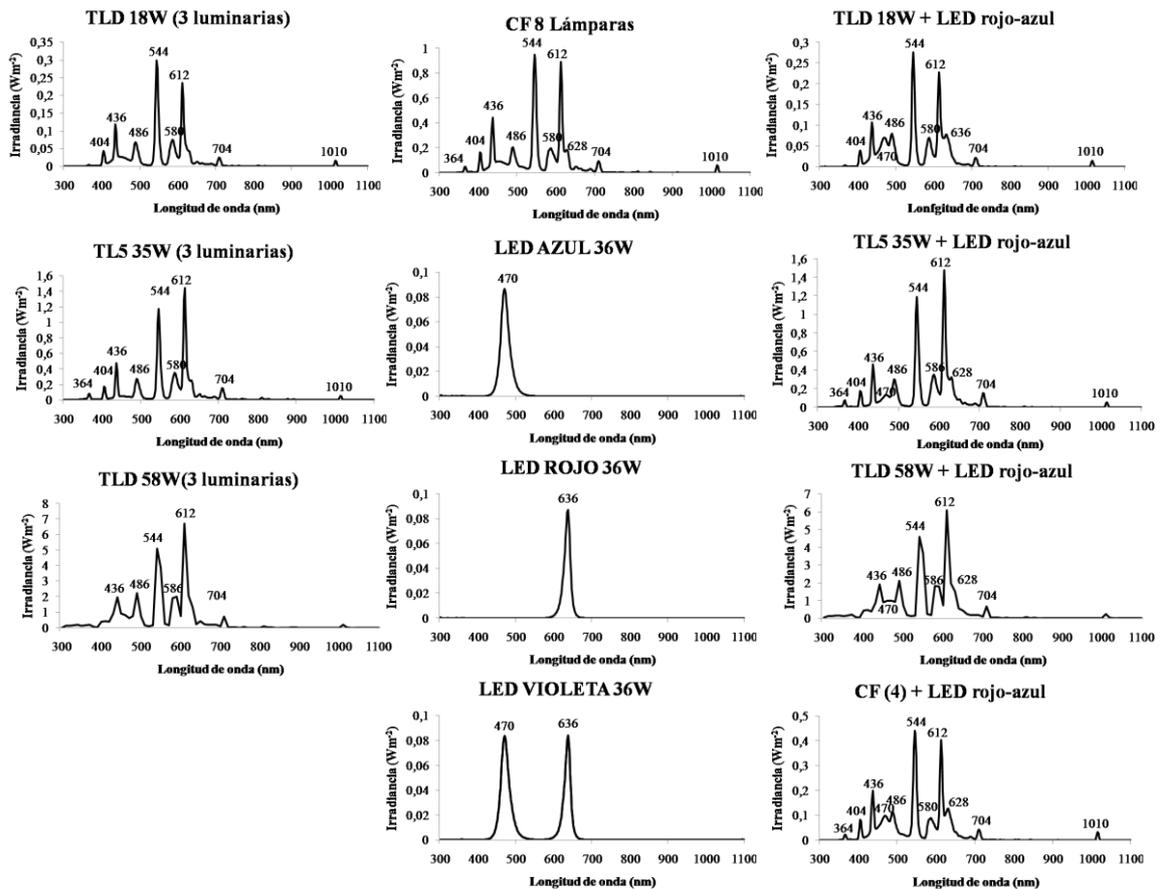


Figura 32. Espectros de lámparas comerciales tipo fluorescentes (estándar, alta eficiencia y bajo consumo) y LED obtenidos con LICOR 1800 en la mesa de pruebas

4. Viabilidad de un sistema solar fotovoltaico para la alimentación de LEDs

Respecto a los módulos fotovoltaicos para alimentar módulos LEDs propuestos en el apartado metodológico de ajardinamiento de interior con LEDs, siguiendo el procedimiento mencionado obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla 20. Resultados de los ensayos de instalación FV (fotovoltaica) para LEDs

Instalación FV		Agosto	Diciembre
Consumos medios diarios en Vcc	Ecc (Wh/día)	3974,4	
	Pcc (W)	165,6	
Sistema de acumulación	C (Ah)	2277	
	N	45	
Módulos fotovoltaicos	Np	3	6
	Pt (Wp)	690	1380
Reguladores	Nr=1	Isr=73.94 A	Isr=36.97 A

Ante las dos situaciones propuestas para la instalación fotovoltaica, el mes de Diciembre es el menos favorable, ya que la relación mes consumo/radiación solar media mensual (R_e) es la mayor en agosto. Por ello, elegimos la instalación FV en función del mes menos favorable que es Diciembre. Ésta requeriría 6 módulos fotovoltaicos BP 3230N con una potencia instalada de 1380 Wp, 45 acumuladores Hoppecke Energy 12V/250Ah y 1 regulador Steca Power Taron 2070 de 12 V, 70 A más soportes y cableado necesario.

Uno de los inconvenientes que presentaría esta propuesta de instalación es el espacio que se necesitaría para albergar dichas baterías al ocupar una superficie aproximada de 7 m². Si esta instalación se ubicase en un recinto donde dispusieran de energía eléctrica de la red BT, quizás sería conveniente compararla tanto económicamente como desde el punto de vista energético con otra posible instalación fotovoltaica equivalente conectada a red y sin sistema de acumulación.

5. Ensayos

ENSAYO 1: Calidad espectral de la iluminación artificial sobre el desarrollo de tomate injertado

1. Calidad espectral de las fuentes de luz

Se midió la calidad espectral (Fig. 33) de los diferentes tratamientos a nivel del dosel vegetal. Es interesante hacer notar que CF, TL5 y TLD presentan picos en 436, 544, 612 nm, pero B-LED sólo presenta un pico ancho a 470 nm. B-LED tiene la menor radiación total.

Los valores de radiación relevantes relacionados con el punto de vista agrícola que caracterizan la calidad de la luz (Baille *et al.*, 2003) se presentan en la tabla 21.

Se sabe que la radiación ultravioleta-B (UV-B) puede causar la reducción de la longitud del tallo, debido a un mecanismo de oxidación de fitohormonas. Estas hormonas de las plantas, como la AIA, causan cambios en el tamaño celular que es probable que sea alterado por los rayos UV-B (Mark y Tevini, 1996).

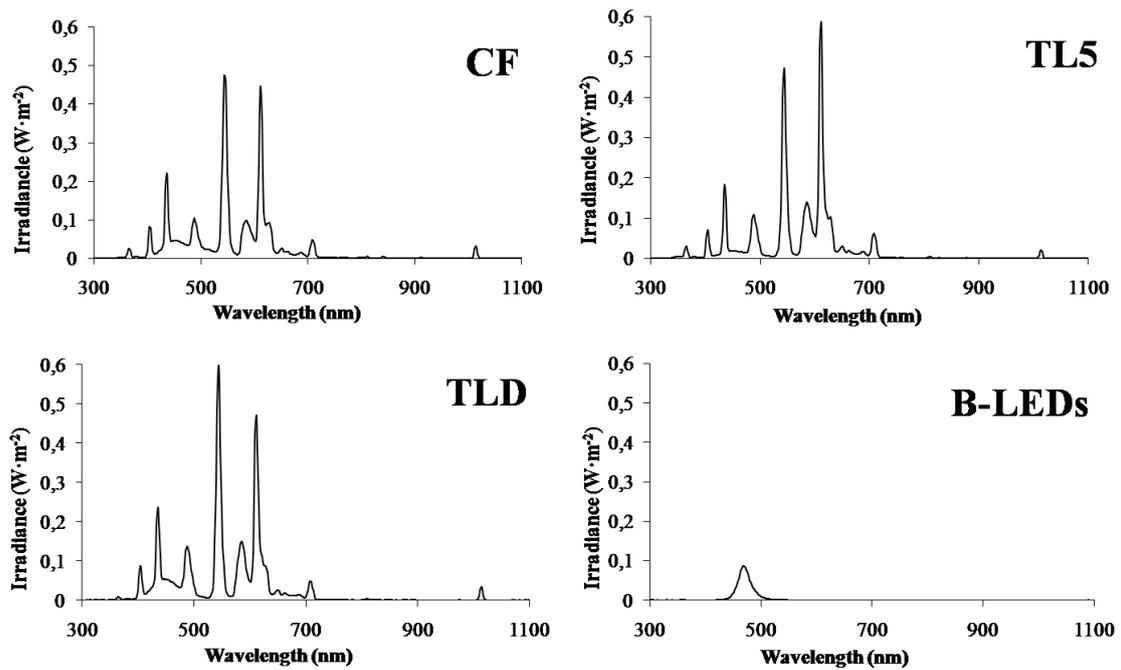


Figura 33. Calidad espectral medida con espectrorradiómetro sobre el dosel vegetal de los cuatro tratamientos lumínicos a los que se sometieron las plantas injertadas de tomate

Tabla 21. Caracterización agronómica de la calidad lumínica de los tratamientos en planta injertada (Wm^{-2})

Regiones espectrales	CF	TL5	TLD	B-LED
UV-A (320-400 nm)	0.18	0.20	0.04	0.00
B (400-500 nm)	2.81	2.04	1.51	1.22
R (600-700 nm)	3.12	3.97	2.19	0.00
FR (700-800 nm)	0.30	0.36	0.14	0.00
PAR (400-700 nm)	10.06	9.94	5.88	1.28
NIR (700-1100 nm)	0.47	0.47	0.21	0.00
TOTAL (300-1000 nm)	10.68	10.57	6.12	1.29

W (vatio). Radiación: UV-A (ultravioleta-A); B (Azul); R (Rojo); FR (rojo lejano); PAR (radiación fotosintéticamente activa); NIR (infrarrojo cercano)

Debido a las características de las fuentes de luz elegidas para los tratamientos, la radiación UV puede ser considerada en el rango de los rayos UV-A para todos los tratamientos; CF y TL5 tienen características similares a la luz UV-A y azul, con valores superiores a TLD y B-LEDs. Nuestras expectativas eran que la CF y tratamientos TL5 proporcionaran una reparación de los tejidos en proceso de injerto. El proceso de reparación de los tejidos es un proceso, denominado fotorreactivación enzimática, que se realiza por fotoliasa, una enzima sensible a la luz UV-A y azul

(Kimura *et al.*, 2004). La luz azul (B) está relacionada con aspectos fotomorfogénicos de crecimiento y desarrollo de la planta (Sundström, 2000).

En las TL5 se presentan los valores más altos de radiación R (Rojo) y FR (rojo lejano). Ambos parámetros indican el grado en que las respuestas observadas son producidas por el fitocromo (Hall y Rao, 1999).

Los valores de PAR en los tratamientos TLD y B-LEDs parecen ser muy bajos en comparación con las que se encuentran en bibliografía, como ejemplos: en la propagación *in vitro* de uva, el PPF (flujo de fotones fotosintéticos) se fijó en 10.94 Wm⁻² (50 μmol·m⁻²·s⁻¹) para todos los sistemas de iluminación (Poudel *et al.*, 2007); la luz artificial de 10 Wm⁻² de PAR también mejoró el crecimiento de la lechuga y disminuyó la duración del ciclo de producción (Gaudreau *et al.*, 1994); fotosíntesis en hojas de tomate (*Solanum lycopersicum Mill*) fue casi lineal dentro del rango de flujo de fotones de 0 a 50 μmol·m⁻²·s⁻¹ con uso de LEDs (Tenessen *et al.*, 1995), valor más cercano a los valores de PAR en CF y TL5.

NIR es una parte útil de la radiación para la fotosíntesis, principalmente relacionada con el calor y el balance energético en invernadero (Castilla, 2005). Sin embargo, en la cámara de cultivo, los resultados de NIR en la planta implican sobrecalentamiento y la posibilidad de dañar los tejidos.

Aunque las lámparas CF tienen una mayor potencia que las lámparas de TL5, ambas tienen valores similares de radiación total sobre los injertos porque las lámparas en la CF no tienen luminaria. La baja intensidad de la radiación medida en B-LED, en contraste con TLD, puede ser debida a la distribución de las lámparas y de los emisores de luz polarizada. La tabla 22 presenta la relación entre los diferentes rangos del espectro de radiación. Estos coeficientes nos ayudan a la caracterización agronómica de los tratamientos de iluminación.

Tabla 22. Ratios entre las diferentes regiones del espectro de radiación de los tratamientos lumínicos en planta injertada

Ratios	CF	TL5	TLD	B-LED
PAR:TOTAL	0.94	0.94	0.96	0.99
PAR:NIR	21.34	21.36	27.94	
B:R	0.90	0.51	0.69	
B:FR	9.30	5.70	11.00	
R:FR	10.34	11.13	15.89	

La relación entre PAR y TOTAL presenta valores cercanos a 1 en todos los tratamientos, que corresponde con la radiación fotosintética de alta eficiencia. La relación PAR:NIR permite aumentar la intensidad de la radiación sin dañar por calentamiento. La radiación solar presenta una proporción de alrededor de 1. B-LED apenas disipa energía en forma de calor. TLD presenta un mejor comportamiento que la CF y TL5 para el parámetro PAR:NIR. El espectro de LED azul está limitado entre 400-500 nm por lo que parámetros como PAR:NIR, B:R, B:FR y F:FR no se han cuantificado.

R:FR está relacionado con el fotoequilibrio de fitocromos. Los receptores de luz azul (criptocromos) también están involucrados en la fotorregulación para el desarrollo de la planta de manera independiente o en conjunción con el fitocromo (Poppe *et al.*, 2001).

B:R, con valor cercano a 1, puede indicar la activación de criptocromos y fitocromos. El tratamiento con CF (B:R=0.90) presenta el valor más alto, por eso, por eso deben ser consideradas las respuestas debidas a la activación de criptocromos. El valor de B:R (0.51) para TL5 indica que las plantas recibieron más cantidad de energía de luz roja que azul, de modo que se espera diferentes respuestas en las plantas de tomate respecto a otros tratamientos (Demers *et al.*, 1998).

De la relación B:FR se espera que el mayor valor produzca una mayor activación de criptocromos frente a fitocromos. En TLD, los valores de los parámetros B:FR y R:FR fueron superiores a otros tratamientos. Los valores de B:FR y R:FR pueden estar relacionados con el alargamiento del tallo, debido a la respuesta de la planta a la cantidad de luz azul y roja lejana (Britz y Sager, 1990).

2. Respuesta a la luz de plántulas injertadas de tomate

2.1. Evaluación de la biomasa

Se evaluaron el peso fresco y seco y el estado hídrico de las plantas injertadas al final de la prueba, como se muestra en las figuras 34 y 35, respectivamente. Los pesos frescos total, de hojas y tallos no presentan diferencias significativas entre los tratamientos. La raíz presenta menor peso fresco en TLD.

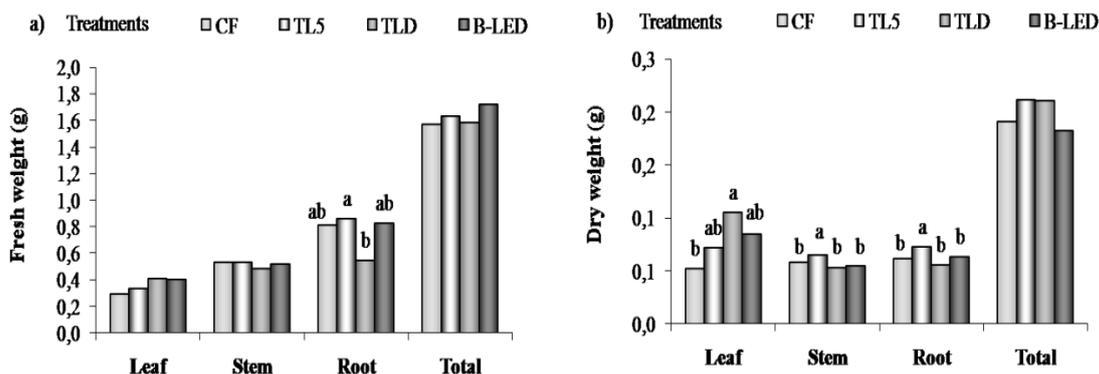


Figura 34. a) Peso fresco (fresh weight) y b) Peso seco (dry weight), medidos en gramos, de los órganos de las plantas injertadas (Leaf: hoja; Stem: tallo; Root: raíz; Total: planta completa). Letras diferentes sobre las columnas implica diferencias significativas en la prueba LSD a $p < 0.05$

El peso seco total no presenta diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, el peso seco en hoja, tallo y raíz presentan diferencias significativas. TL5 presenta el menor peso seco de hojas. TLD presenta el mayor peso seco de tallo y raíces. CF presenta valores intermedios. La radiación de TL5 aplicada se caracteriza por un espectro pobre en azul, B:R (0.51). Es interesante hacer notar que el mayor peso seco de hojas se presenta en el tratamiento B-LED, porque la luz azul aumenta el crecimiento de hojas. Sin embargo, el azul inhibe la elongación de los brotes y la expansión de la hoja, pero aumentando la cantidad de fotones azules la expansión de las hojas sólo se vio afectada negativamente al más alto valor en el rango del azul (Rapparini *et al.*, 1999).

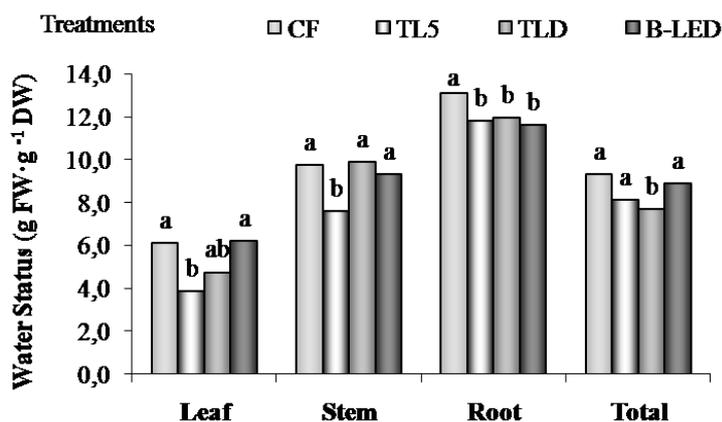


Figura 35. Estatus hídrico (water status) y respuesta al estrés hídrico

El estatus hídrico se estableció como la relación entre el peso fresco dividido por el peso seco (FW:DW) para las hojas, tallos y raíces. Letras diferentes sobre las columnas implica diferencias significativas en la prueba LSD ($p < 0.05$).

En TLD el valor de R:FR es mucho mayor que en CF y TL5, aun siendo mayor la radiación total recibida bajo CF y TL5. El efecto de los fitocromos se expresa en un mayor peso seco de tallo y raíces relacionadas con el efecto sobre la acumulación de biomasa total y la distribución entre partes de las plantas subterráneas y aéreas (Humberto y Wulff, 2003).

El contenido de humedad disminuye gradualmente en el siguiente orden: raíz, tallo y hojas, en las plantas injertadas de todos los tratamientos. Hay dos regiones espectrales implicadas en este parámetro: zonas azules y las regiones NIR. Las fototropinas son activadas por la radiación de bajo azul (Takemiyaa *et al.*, 2005) e inducen a la apertura de los estomas (Briggs y Olney, 2001), con un aumento de la transpiración y por ello, las pérdidas de agua. Por otro lado, cuando la NIR se incrementa, la energía se convierte en calor y para mantener la temperatura se produce la transpiración de la hoja a través de la pérdida de agua (Jones, 1992).

No se encontraron diferencias en la biomasa relacionada con la NIR y su ratios entre CF y TL5. Sin embargo, podría haber una relación entre B:R y B:FR y la concentración de auxina, además del efecto de la auxina en la turgencia celular (Krieger, 1978).

2. 2. AIA y el desarrollo de la planta

El total de las auxinas en la planta y las hojas se midieron como se muestra en la figura 36. Teniendo en cuenta los datos, no podemos relacionar la cantidad de auxina en la planta con la cantidad de radiación, ni con la cantidad de luz azul recibida por la misma (Fig. 36 a), pero es importante tener en cuenta que un rico tratamiento en luz azul como B-LED produce una mayor cantidad de auxina en los órganos aéreos (Fig. 36 b). Esta producción de auxinas puede estar destinada para la diferenciación celular (Horwitz, 1994) y el crecimiento de raíces secundarias (Günes, 2000) para asegurar la supervivencia de las plantas jóvenes (Geßner *et al.*, 1999).

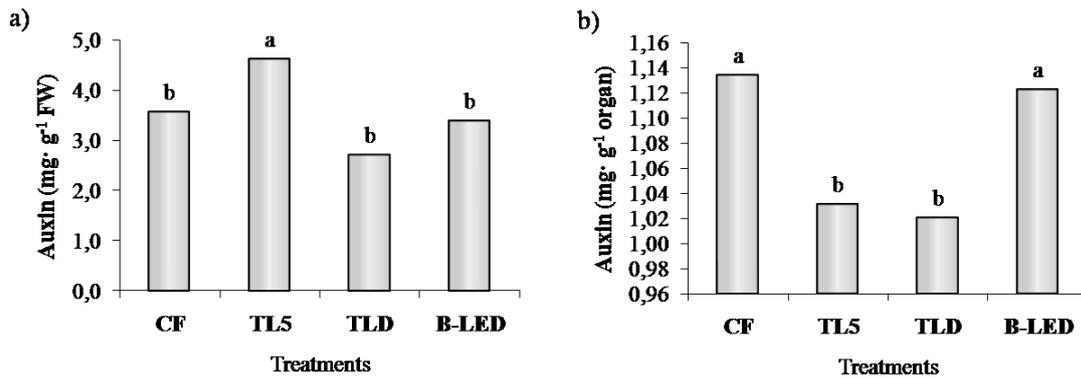


Figura 36. Auxina medida en hojas a) concentración; b) capacidad de síntesis (FW: peso fresco; organ: hoja; Treatments: tratamientos). Columnas con letras comunes significa no diferencias significativas en el test LSD ($p < 0.05$)

Los valores de B:R y B:FR para TL5 son más bajos que en el resto. Los valores más bajos de B:R y B:FR pueden estar relacionados con una mayor producción de AIA, ya que la luz azul estimula su producción. Kurepin *et al.* (2007) consideraron que una baja relación R:FR aumenta los niveles de AIA endógeno, pero en este ensayo la relación R:FR es similar en los tratamientos CF y TL5.

2. 3. Prolina en el desarrollo de la planta

Los resultados de los análisis de prolina se presentan en la figura 37. La prolina se acumula en las plantas durante la adaptación a diversos tipos de estrés ambiental (Claussen, 2005). La prolina fue en aumento en las hojas de las plantas cuando se aumentó el tiempo de estrés hídrico (Ismail *et al.*, 1994). CF presenta la mayor concentración de prolina. Este resultado no podría estar relacionado con el status hídrico, ya que es similar en CF, TL5 y TLD. En este sentido, Sanada *et al.* (1995) encontraron cambios del nivel de prolina bajo condiciones de luz-oscuridad y bajo estrés salino.

El alto nivel de prolina se relaciona con su papel como osmoregulador en la luz, y el bajo nivel es causado porque la prolina se utiliza como sustrato para la respiración en la etapa oscura y suministro de energía en la compartimentación de los iones dentro de la vacuola en la oscuridad. Cuando la intensidad de la luz aumenta también aumenta la acumulación de prolina (Waldren *et al.*, 1974). La radiación UV induce un aumento del contenido de prolina (Demir, 2000) ([CF y TL5 similares UV-A] >TLD).

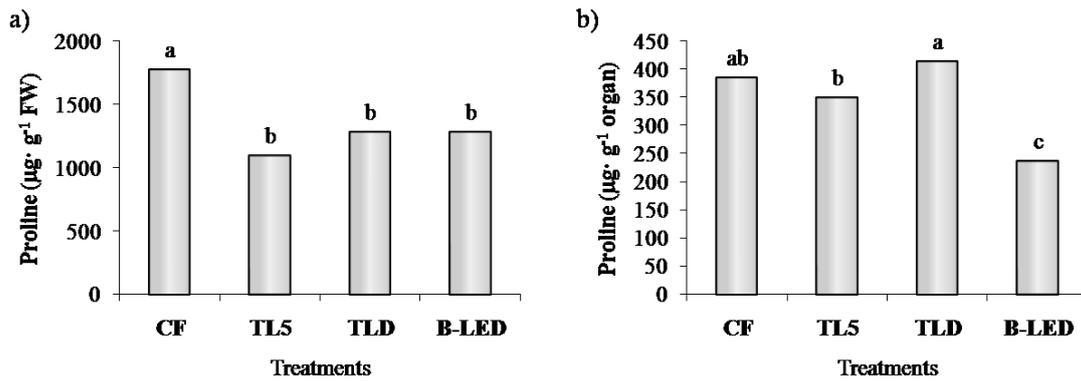


Figura 37. Prolina en hojas de planta injertada de tomate. Columnas con letras comunes significa no diferencias significativas en el test LSD ($p < 0.05$)

TLD tiene el mayor valor de R:FR y la concentración de prolina en hoja es significativamente mayor. El uso de LEDs no aumenta el estado de estrés de la planta.

Rajagopal y Madsen (1981) encontraron que el desenrollado de las secciones de las hojas decoloradas de cebada fue promovido por el azul (426 nm) y rojo (658 nm), acompañado de la reducción en el nivel de la prolina libre de los tejidos, y que el desenrollado de la hoja fue impedido por la irradiación con rojo lejano (728 nm). En este ensayo los resultados están en desacuerdo con esta propuesta.

2. 4. Los hidratos de carbono, PAR y el crecimiento de las plantas

Según Alves de Alvarenga *et al.* (2003), la fotosíntesis es la conversión de energía radiante en hidratos de carbono con una alta eficiencia y por lo tanto promueve el crecimiento.

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) contribuye directamente a la fotosíntesis y por lo tanto al crecimiento de los cultivos. Teniendo en cuenta la radiación PAR recibida por los diferentes tratamientos, las mayores concentraciones de azúcar se esperaba en CF y TL5. Sin embargo, CF presenta la menor concentración de azúcar. Puede estar relacionado con la concentración de prolina y la situación de estrés acompañado de una tasa de respiración alta. Las concentraciones de azúcares reductores en las hojas se presentan en la figura 38.

En nuestro ensayo, el total de carbohidratos se midieron por colorimetría a partir del sobrenadante de la extracción vegetal.

En cuanto a la producción de azúcar, el mejor tratamiento puede ser TL5. Sin embargo, el peso seco en hojas más bajo se presenta para TL5.

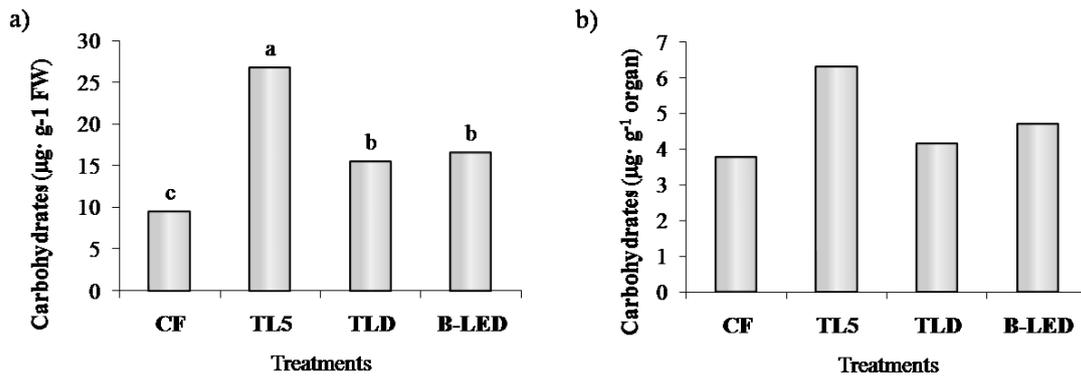


Figura 38. Concentración de azúcares reductores en hojas de planta injertada de tomate expresada en (a) Glucosa en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de peso fresco (FW: fresh weight), (b) Glucosa en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de hoja (organ). Columnas con letras comunes significa no diferencias significativas en el test LSD ($p < 0.05$)

Kemp y Blacklow (1980) encontraron un aumento del crecimiento del tallo debido a una oferta excesiva de hidratos de carbono cuando la planta hacía mayor su tamaño, esto está relacionado con el consumo de hidratos de carbono. TLD y B-LED presentan concentración de azúcar similar que podría estar relacionado con el elevado peso seco de tallo y raíz en TLD y el consumo de hidratos de carbono en el crecimiento.

ENSAYO 2

1. Cambios en la concentración de auxina endógena en plántulas de cultivares de tomate bajo iluminación artificial

1. 1. Calidad espectral de las fuentes de luz

La figura 12 (capítulo IV, apartado 5.2) muestra la calidad espectral, medida a nivel del dosel vegetal en los diferentes tratamientos. Se observaron picos comunes en T_1 , T_2 y T_3 a 436, 544 y 612 nm, pero T_4 sólo presenta un pico ancho a 470 nm. La menor radiación total es medida en T_4 . En la tabla 23, se presentan interesantes valores de radiación de los tratamientos desde el punto de vista agrícola, asociados a la caracterización de la calidad de la luz (Baille *et al.*, 2003) y la relación entre los diferentes rangos de radiación espectral. T_1 y T_2 muestran similar radiación ultravioleta (UV), superior a T_3 , mientras que T_4 no muestra valores de radiación en ese rango. Tanto la radiación ultravioleta UV-A como la UV-B pueden producir cambios en la reducción de la longitud del tallo, como resultado de la degradación de la AIA (Mark y Tevini, 1996).

Tabla 23. Caracterización agronómica de la calidad espectral de los tratamientos lumínicos sobre plántulas de tomate (Wm^{-2})

Radiación /Tratamientos	T₁	T₂	T₃	T₄
UV (300-400 nm)	0.31	0.32	0.11	0.01
B (400-500 nm)	3.90	3.42	4.24	2.55
R (600-700 nm)	4.50	6.62	4.73	0.00
FR (700-800 nm)	0.42	0.63	0.40	0.00
PAR (400-700 nm)	14.40	16.57	15.39	2.71
NIR (700-1100 nm)	0.66	0.95	0.58	0.00
TOTAL (300-1000 nm)	15.18	17.70	15.94	2.72
PAR:TOTAL	0.95	0.94	0.97	1.00
PAR:NIR	21.73	17.50	26.48	-----
B:R	0.87	0.52	0.90	-----
B:FR	9.36	5.47	10.66	-----
R:FR	10.81	10.59	11.90	-----

El gradiente de la radiación B es $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$. La luz B afecta a aspectos fotomorfogénicos de crecimiento de la planta y su desarrollo (Sundström, 2000). Carotenos, xantofilas (de color naranja y amarillo) y antocianinas (pigmentos rojos) absorben principalmente en la región B del espectro. La clorofila absorbe también en el B (Buiten y Clevers, 1993). Del mismo modo, la luz B estimula la síntesis de auxina a través de la actividad de la familia de proteínas de las auxinas, que se relaciona con los niveles endógenos de AIA (Folta *et al.*, 2003). Además, Zeng *et al.* (2009) encontraron en *Arabidopsis* que los fotorreceptores criptocromos regulan el crecimiento de la raíz, cambiando el transporte de auxina. T_2 muestra los más altos valores de R y FR, mientras que en T_1 y T_3 son similares. Briggs (1963) documenta que la luz R suprime la producción de auxina en coleóptilos de maíz. Los fitocromos (Hall y Rao, 1999) son responsables de la respuesta de las plantas en R y FR.

T_2 muestra el mejor valor del PAR; T_2 , T_3 y T_1 tienen valores superiores a los mencionados en la literatura para todos los sistemas de iluminación sobre tomate (Gaudreau *et al.*, 1994; Poudel *et al.*, 2007; Tennessen *et al.*, 1995). PAR es la región del espectro que participa en la fotosíntesis; PAR y temperatura son parámetros críticos relacionados con el rendimiento de la planta de tomate en el invernadero (Jones, 2008). T_2 tiene un mayor valor NIR, aunque las lámparas de T_1 poseen mayor cantidad de vatios (tabla 9); además, a T_1 no se le dotó de un sistema de luminarias.

NIR está determinada principalmente por la ausencia de absorción de los pigmentos, lo que significa que la energía pasa a través de la hoja (la hoja es transparente) o que se refleja, produciendo más transición de aire a las paredes celulares

(Buiten y Clevers, 1993). NIR es una parte útil de la radiación para la fotosíntesis, principalmente relacionada con el calor y el balance energético dentro del invernadero (Castilla, 2005). Sin embargo, en una cámara de cultivo con luz artificial sobre las plantas, NIR sólo produce el recalentamiento de las plantas y la posibilidad de dañar los tejidos. La radiación total recibida por la cubierta de plantas en T₁ y T₃ es similar; T₂ tiene el valor más alto de todos los tratamientos. En T₄ la medida de la radiación total es muy baja comparada con otros tratamientos.

Una alta eficiencia fotosintética de la radiación se puede conectar con la partición PAR:TOTAL, cuyo valor debe ser igual o mayor a 1. En todos los tratamientos, esta condición se pudo cuantificar. T₃ tiene la mejor relación entre ambas regiones espectrales. La relación PAR:NIR debe ser alta en los sistemas de iluminación artificial, ya que puede significar que no se producen daños por calor. T₃ tiene un valor de B:R igual a 0.90 y T₂ tiene el valor más alejado de 1 para este parámetro con respecto a todos los tratamientos. Cuando hay un exceso de B con muy poco R, el crecimiento se reducirá, y la cutícula será de color oscuro y dura, y si hay un exceso de R sobre B, el crecimiento llegará a ser suave con entrenudos largos, dando lugar a plantas desgarbadas (Jones, 2008). Un valor cercano a 1 indica un equilibrio en las bandas espectrales B y R.

T₂ tiene los valores más bajos de estos parámetros. B:FR y R:FR pueden ser parámetros críticos en los cultivos. La luz azul se traducirá en una cutícula gruesa, si es reflejada. Estas bandas de longitud de onda alteran las proporciones de ésteres y alcoholes de la cera de la hoja en la pimienta (Kasperbauer y Wilkinson, 1995).

1. 2. Evaluación de la biomasa

La tabla 24 muestra los parámetros morfológicos de los cultivares estudiados en los tratamientos de luz. Los cultivares 'A', 'R', 'M_O', 'P', 'Z', y 'L' muestran un punto de compensación de luz mayor que la ofrecida por T₄, ya que muchos de sus ejemplares murieron en el curso del experimento. El punto de compensación de intensidad de la luz varía según el tipo de planta, pero típicamente es de 40 a 60 Wm⁻² para la luz del sol. El punto de compensación de luz, en la planta de tomate, se puede reducir (un poco) al aumentar la cantidad de dióxido de carbono disponible para la planta, lo que permite que la planta crezca en condiciones de baja iluminación.

El peso seco total (TDW) es mayor en T₂>T₃>T₁>T₄. Los sistemas de iluminación producen diferentes efectos en TDW; una relación lineal entre la PAR

interceptada acumulada y la producción de materia seca en tomate fue reportada (Heuvelink y Dorais, 2005; Riga *et al.*, 2008). ‘S’ y ‘V’ parecen tener un comportamiento aceptable frente a T₄, aunque no son las plantas de más alta calidad, son variedades que pueden sobrevivir a tan poca intensidad y calidad lumínica. Este comportamiento fue mencionado por Geßner *et al.* (1999) y explicaron que la luz B, aportada por LED, parece aumentar la supervivencia de las plántulas jóvenes, como las de nuestro estudio.

Figuras 39 a y b presentan la relación entre TDW:TFW y TDW. Se puede observar que TDW:TFW se relaciona con la TDW, pero no con los cultivares y tratamientos. La planta aumenta su dureza en relación con el material seco que se acumula. Estos resultados coinciden con los de Miller y Timmer (1997) quienes encontraron un aumento de la biomasa de *Picea mariana* en los brotes (99% a 142%) y la raíz (de 5 a 10 veces) durante el endurecimiento. La ratio TDW:TFW cerca de 0.10 puede indicar que la plántula es de calidad mejor que otros que muestran valores más bajos. Asimismo, las plantas con TDW:TFW cerca de 0.10 muestran un mayor endurecimiento y un trasplante de más éxito (Wainwright y Marsh, 1986).

Para la relación LSDW:RDW, es decir, entre la parte aérea de la planta y las raíces, no se encontró consecuencia directa del tratamiento de luz entre los tratamientos T₁, T₂, y T₃ excepto en los cultivares de ‘S’, ‘A’, ‘D’, ‘C’, y ‘A_N’. Estos cultivares muestran los valores más altos en T₁, lo que puede estar relacionado con el bajo nivel de R, R:FR, luz ultravioleta y radiación PAR (ver Tabla 23). Inada (1984) clasifica las respuestas de crecimiento en función de las cualidades de la luz en dos grupos: 1) las especies en las que R inhibe la elongación celular más efectivamente que B, y 2) las especies en las que B inhibe la elongación celular más efectivamente que R. El tomate podría ser considerado del primer grupo. Estos resultados coinciden con Kurepin *et al.* (2010) que encontraron en plántulas de tomate de estado salvaje una respuesta a una baja relación R:FR con aumento de la elongación del tallo. UV-A y UV-B pueden producir cambios en la reducción de la longitud del tallo (Mark y Tevini, 1996).

Observando la tabla 24, para el cultivar ‘I’, hay que destacar que T₄ muestra el valor más alto de LSDW:RDW, al igual que de TDW, y si consideramos el parámetro LSDW:RDW, es curioso cómo esta variedad es capaz de desarrollar su parte aérea rápidamente, pero tiene un desarrollo lento de raíz, por lo que las plantas resultantes no son de buena calidad, pero consiguen sobrevivir en estas condiciones. Por otro lado, la relación LSDW:RDW aclara la situación de la plántula. Si los valores de este parámetro

son muy altos, se puede deducir que las raíces no se desarrollan, por lo que la planta no está recibiendo agua y nutrientes apropiadamente y, debido a esto, la parte aérea no se desarrollará mucho más (Partida *et al.*, 2007).

Tabla 24. Peso fresco y seco (g) de todas las particiones de las plantas y diversos ratios

		LFW	SFW	RFW	TFW	LDW	SDW	RDW	TDW	TDW: TFW	LSDW : RDW
'I'	T1	0.39 b	0.30bc	0.09 b	0.78 b	0.03 a	0.03 b	0.01 b	0.06 bc	0.07 b	5.62 a
	T2	0.76 a	0.92 a	0.23 a	1.91 a	0.04 a	0.11 a	0.02 a	0.17 a	0.09 a	6.50 a
	T3	0.46 ab	0.36 b	0.10 b	0.93 b	0.03 a	0.03 b	0.01 b	0.07 b	0.08 b	6.67 a
	T4	0.18 b	0.12 c	0.03 b	0.33 b	0.01 b	0.01 b	0.002 b	0.01 c	0.04 c	8.44 b
'S'	T1	0.34 b	0.22 b	0.05 b	0.60 b	0.02 a	0.02 b	0.003 c	0.04 b	0.06 b	6.97 a
	T2	0.53 a	0.51 a	0.11 a	1.16 a	0.03 a	0.05 a	0.02 a	0.10 a	0.09 a	5.4 b
	T3	0.41 ab	0.26 b	0.10 a	0.76 a	0.02 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.07 ab	4.84 b
	T4	0.15 c	0.09 c	0.02 b	0.26 c	-	0.003 c	0.001 c	0.01 c	0.02 c	2.75 c
'A'	T1	0.34 b	0.23 b	0.03 b	0.60 b	0.02 b	0.02 b	0.005 b	0.04 b	0.06 b	6.35 a
	T2	0.64 a	0.58 a	0.20 a	1.41 a	0.03 a	0.06 a	0.02 a	0.12 a	0.08 a	3.96 b
	T3	0.28 b	0.13 b	0.05 b	0.46 b	0.02 b	0.01 b	0.005 b	0.03 b	0.06 b	5.67 b
	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
'D'	T1	0.31 b	0.20 b	0.05 b	0.55 b	0.01 b	0.01 b	0.003 b	0.03 b	0.05 b	6.41 a
	T2	0.51 a	0.55 a	0.16 a	1.22 a	0.03 a	0.05 a	0.02 a	0.10 a	0.08 a	5.55 ab
	T3	0.23 b	0.18 b	0.05 b	0.46 b	0.01 b	0.01 b	0.004 b	0.03 b	0.06 b	3.99 b
	T4	0.01 c	0.006 c	-	0.02 c	-	-	-	-	0.01 c	-
'C'	T1	0.41 b	0.33 b	0.09 bc	0.84 b	0.02 b	0.03 b	0.01 b	0.05 b	0.05 b	8.02 a
	T2	0.69 a	0.79 a	0.31 a	1.79 a	0.04 a	0.11 a	0.03 a	0.18 a	0.08 a	5.57 b
	T3	0.40 b	0.30 b	0.12 b	0.82 b	0.02 b	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.06 b	5.96 b
	T4	0.16 c	0.13 c	0.02 c	0.31 c	-	-	-	-	0.04 c	-
'R'	T1	0.33 b	0.24 b	0.06 b	0.64 b	0.015 b	0.02 b	0.01 b	0.04 b	0.06 b	5.44 a
	T2	0.52 a	0.60 a	0.22 a	1.34 a	0.03 a	0.06 a	0.02 a	0.11 a	0.08 a	4.33 a
	T3	0.37 b	0.25 b	0.09 b	0.70 b	0.02 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.07 a	5.57 a
	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
'A _N '	T1	0.35 b	0.25 b	0.05 bc	0.65 b	0.02 b	0.02 bc	0.01 b	0.05 bc	0.07 b	7.29 a
	T2	0.64 a	0.80 a	0.21 a	1.65 a	0.03 a	0.09 a	0.02 a	0.14 a	0.08 a	5.30 b
	T3	0.44 b	0.31 b	0.09 b	0.84 b	0.02 b	0.03 b	0.01 b	0.06 b	0.07 ab	5.13 b
	T4	0.16 c	0.09 c	0.02 c	0.28 c	-	0.01 c	-	0.01 c	0.02 c	-

Capítulo V: Resultados y discusión

'C _{ON} '	T1	0.29 b	0.20 b	0.06 bc	0.55 bc	0.01 b	0.02 b	0.01 b	0.03 bc	0.06 ab	5.90 a
	T2	0.71 a	0.87 a	0.27 a	1.58 a	0.04 a	0.09 a	0.02 a	0.15 a	0.10 a	5.37 a
	T3	0.37 b	0.22 b	0.12 b	0.71 b	0.02 b	0.02 b	0.01 b	0.04 b	0.06 ab	4.43 a
	T4	0.11 c	0.05 c	0.01 c	0.17 c	0.002 c	0.002 b	-	0.004 c	0.02 b	-
'V'	T1	0.35 b	0.22 bc	0.07 b	0.65 b	0.017 b	0.02 b	0.004 b	0.04 bc	0.06 b	7.93 a
	T2	0.56 a	0.61 a	0.19 a	1.36 a	0.03 a	0.07 a	0.02 a	0.12 a	0.09 a	7.04 a
	T3	0.44 ab	0.27 b	0.09 b	0.79 b	0.02 ab	0.02 b	0.007 b	0.05 b	0.06 b	6.08 a
	T4	0.12 c	0.07 c	0.01 b	0.20 c	0.002 c	-	0.001 b	0.003 c	0.02 c	2.00 b
'B'	T1	0.32 b	0.22 b	0.06 bc	0.60 b	0.01 b	0.02 b	0.01 b	0.03 c	0.06 c	5.46 a
	T2	0.53 a	0.54 a	0.18 a	1.25 a	0.03 a	0.06 a	0.02 a	0.11 a	0.09 a	4.01 a
	T3	0.37 b	0.22 b	0.08 b	0.67 b	0.02 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.08 b	5.03 a
	T4	0.12 c	0.08 c	0.02 c	0.22 c	-	0.004 c	-	0.004 c	0.02 d	-
'M _Y '	T1	0.41 a	0.29 b	0.09 bc	0.79 b	0.02 b	0.02 b	0.01 b	0.05 bc	0.06 b	5.15 a
	T2	0.58 a	0.71 a	0.25 a	1.54 a	0.04 a	0.09 a	0.02 a	0.15 a	0.10 a	5.52 a
	T3	0.50 a	0.31 b	0.14 b	0.94 b	0.03 ab	0.03 b	0.01 b	0.07 b	0.07 b	4.12 a
	T4	0.13 b	0.10 b	0.01 c	0.23 c	-	0.01 b	-	0.005 c	0.02 c	-
'M _O '	T1	0.32 b	0.20 b	0.07 b	0.59 b	0.01 b	0.02 b	0.01 b	0.03 b	0.058 b	4.97 a
	T2	0.61 a	0.55 a	0.19 a	1.34 a	0.03 a	0.05 a	0.02 a	0.10 a	0.073 a	4.52 a
	T3	0.43 ab	0.24 b	0.12 b	0.79 b	0.03 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.069 ab	5.38 a
	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
'P'	T1	0.38 b	0.23 c	0.08 a	0.68 b	0.016 b	0.02 c	0.007 b	0.04 b	0.058 b	4.20 a
	T2	0.56 a	0.45 a	0.11 a	1.12 a	0.034 a	0.04 a	0.014 a	0.09 a	0.08 a	5.71 a
	T3	0.41 b	0.32 b	0.12 a	0.86 b	0.02 ab	0.03 b	0.01 ab	0.06 b	0.066 ab	4.26 a
	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
'Z'	T1	0.39 b	0.25 b	0.08 a	0.72 b	0.02 b	0.02 b	0.007 b	0.04 b	0.056 b	5.06 a
	T2	0.68 a	0.54 a	0.14 a	1.36 a	0.04 a	0.05 a	0.014 a	0.11 a	0.08 a	6.60 a
	T3	0.39 b	0.33 b	0.09 a	0.82 b	0.02 b	0.03 b	0.01 ab	0.06 b	0.07 a	4.90 a
	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
'L'	T1	0.23 a	0.11 b	0.02 a	0.36 b	0.01 a	0.01 a	0.001 b	0.02 b	0.05 a	6.00 a
	T2	0.30a	0.19 a	0.04 a	0.53 a	0.02 a	0.02a	0.005a	0.04 a	0.08 a	7.13 a
	T3	0.24a	0.12 b	0.02a	0.38ab	0.01 a	0.01a	0.001b	0.03 ab	0.07 a	7.00 a
	T4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FW: Fresh Weight (peso fresco); L: Leaf (hoja); S: Stem (tallo); R: Roots (raíces); T: Total; DW: Dry Weight (peso seco); DWLS: Dry Weight Leaf + Dry Weight Stem (peso seco de hoja + peso seco de tallo).

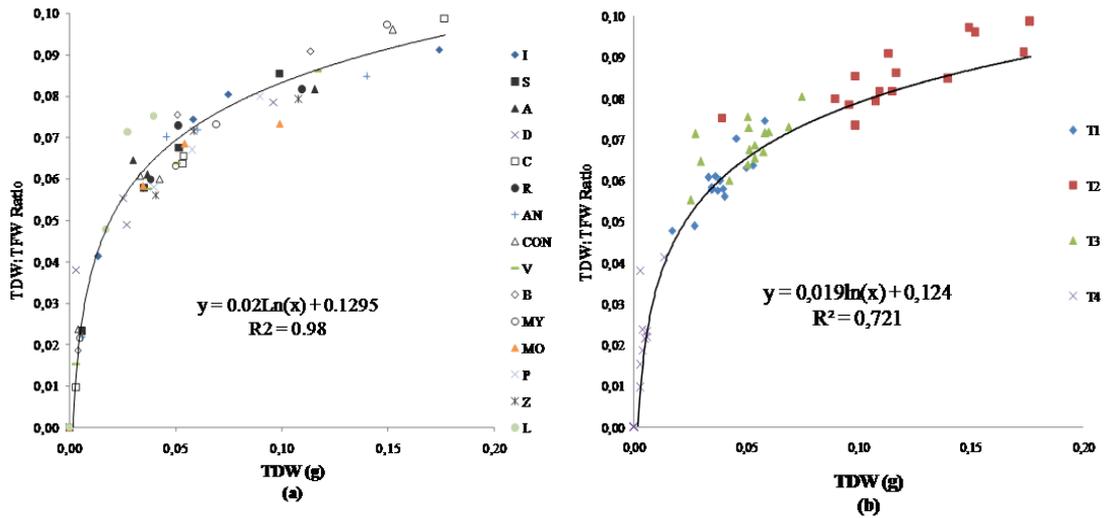


Figura 39. Ratio TDW:TFW frente TDW respecto (a) los cultivares y (b) tratamientos. (TDW: peso seco total; TFW: peso fresco total; T: tratamiento lumínico)

La tabla 25 muestra la relación entre la parte aérea y radicular (LSDW:RDW) para todos los cultivares en todos los tratamientos.

Tabla 25. Relación parte aérea y radicular de cultivares de tomate bajo iluminación artificial

Var/ LSDW:RDW	'T'	'S'	'A'	'D'	'C'	'R'	'A _N '	'C _{ON} '	'V'	'B'	'M _Y '	'M _O '	'P'	'Z'	'L'
'T'/6.77															
'S'/5.07	*														
'A'/5.19	*														
'D'/4.85	*														
'C'/6.52		*		*											
'R'/5.12	*				*										
'A _N '/5.91						*									
'C _{ON} '/5.23	*						*								
'V'/6.63		*	*	*		*		*							
'B'/4.83	*				*				*						
'M _Y '/4.93	*				*				*						
'M _O '/4.95	*				*				*						
'P'/4.72	*				*				*						
'Z'/5.52										*					
'L'/6.92		*		*		*				*		*	*		

En general, los tratamientos no afectan a estos parámetros, pero las características intrínsecas de cada variedad morfológica pueden afectar. ‘I’, ‘C’, ‘A_N’, ‘V’, ‘Z’ y ‘L’ son los cultivares con valores más altos, en los otros cultivares presentan valores significativamente más bajos. Un valor más bajo de este parámetro implica la obtención de una planta con buen desarrollo de raíces y endurecimiento del tallo, lo cual es importante para el trasplante al aire libre (Liptay *et al.*, 1998; Nicola, 1998). Plántulas con un sistema radicular relativamente grande, por lo general, sufren menos estrés en el trasplante y, por tanto, se prevé un mayor crecimiento para ellas que para aquellas que tienen raíces más pequeñas (Weston y Zandstra, 1986).

1. 3. AIA y el desarrollo de la planta

La concentración de auxina endógena en las hojas (Fig. 40) muestra diferencias significativas en cada variedad por tratamiento (LSD $p < 0.05$). Todos los cultivares bajo T₂ muestran la mayor concentración de auxinas y, en T₄, siempre muestran una menor concentración. La mayoría de los cultivares tienen concentraciones similares de auxina en T₁ y T₃. Incluso en ‘D’ y ‘V’, no hubo diferencias significativas en la concentración de auxina entre T₁, T₂ y T₃.

Por otra parte, la concentración de auxina en ‘C_{ON}’ es similar en T₁ y T₂, pero muestra una menor concentración de T₃. Sin embargo, ‘S’ y ‘B’ tienen una mayor concentración en T₃ que en T₁. Estos resultados pueden ser el resultado de la diferente sensibilidad de los diferentes cultivares a las regiones del espectro (UV-A, B, R y FR) y a su actuación conjunta. La sensibilidad más importante es la relacionada con la R:FR con un valor máximo en T₂ (Tabla 23), salvo en los cultivares ‘D’ y ‘V’ donde se encontró una baja relación R:FR asociada con un aumento en los niveles endógenos de AIA. Estos resultados son consistentes con Kurepin *et al.* (2007a).

No se observaron diferencias entre las concentraciones de la auxina en T₁ y T₃. Podríamos considerar que las diferencias en la radiación UV-B y aplicada en ambos tratamientos no modificó la síntesis de auxina en la mayoría de los cultivares estudiados. Sin embargo, la mayor concentración de auxina en las variedades ‘S’ y ‘B’ en T₃ en comparación con T₁ puede implicar una alta sensibilidad a B y UV en ambas variedades.

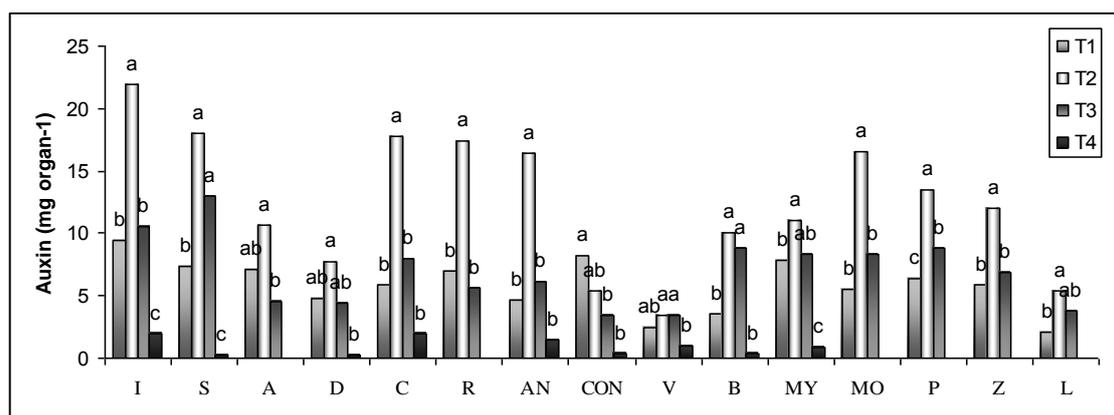


Figura 40. Concentración de auxinas en hojas de plántulas de tomate (mg·órgano⁻¹). Diferentes letras sobre las columnas indican diferencias significativas entre los tratamientos para el test LSD $p < 0.05$

En las condiciones de luz de T₄, sólo sobrevivieron nueve variedades ('I', 'S', 'D', 'C', 'AN', 'CON', 'V', 'B', y 'MY'). Bajo T₄, la variedad 'I' tiene el valor más alto de auxina, pero todos los parámetros (Tabla 24) indican que las plántulas en este tratamiento no son de buena calidad, como resultado de la baja radiación PAR recibida.

La figura 41 indica las correlaciones entre la concentración de auxina y TDW, en el que todos los cultivares mostraron una alta correlación con ambos parámetros. Dicha correlación se muestra en una ecuación lineal de coeficiente $R^2 = 0.63$. Este coeficiente de determinación puede considerarse bueno, porque el comportamiento diferencial de los cultivares es también una influencia importante.

Estos resultados coinciden con Kurepin *et al.* (2007b), quienes encontraron que el TDW de las plántulas se asocia con los niveles endógenos de hormonas como auxinas, citoquininas y ácido abscísico (Kurepin *et al.*, 2007c).

Asimismo, Mapelli *et al.* (1978) consideraron que grandes cantidades de auxina puede estar relacionado con el desarrollo de plantas en la fase de división celular y la auxina que se sintetiza en las hojas se ha ido a las raíces lo que permite un rápido desarrollo y garantizar así la supervivencia de las plántulas (Geßner *et al.*, 1999; Günes, 2000).

Veglio (2010) presentó un modelo basado en la consideración de que el crecimiento de la planta es controlada por la ruta de biosíntesis de la auxina, que está regulada por dos señales: una interna relacionada con la hormona etileno y una externa o medio ambiental. No se encontró correlación entre la TDW:TFW o LSDW:RDW y la concentración de auxina.

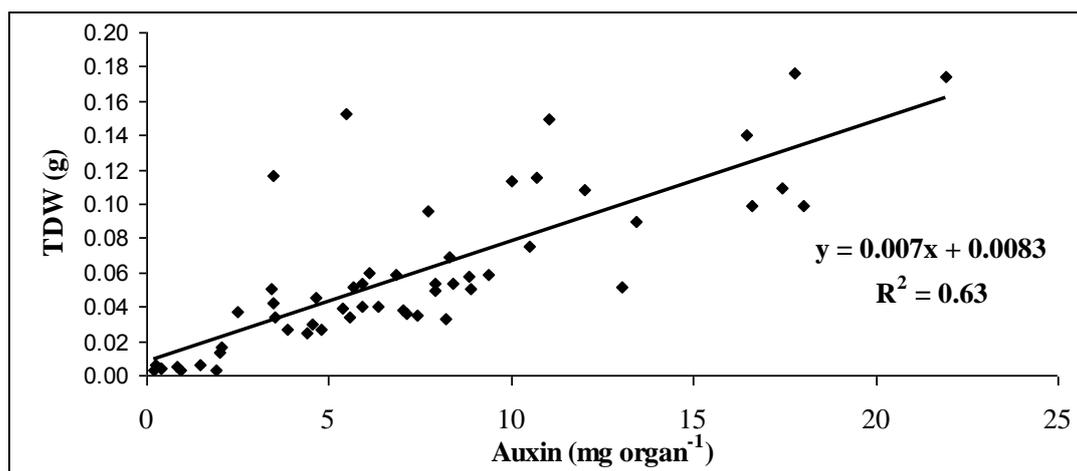


Figura 41. Relación entre el peso seco total (TDW) y concentración de auxina

2. Comportamiento de los bioasimilados de cultivares de tomate bajo diferentes fuentes de iluminación artificial

2. 1. Calidad espectral de las fuentes de luz

La calidad espectral medida para los diferentes tratamientos se muestra en la figura 42. Todas las fuentes de luz presentan picos importantes en la misma longitud de onda. Se presentan en la tabla 26 los valores relacionados con la radiación y longitud de onda, según la caracterización agronómica proporcionada por Coene (1995) y la relación entre los diferentes rangos de radiaciones del espectro.

T₁ y T₃ muestran una cantidad de energía similar en el rango de 320-500 nm de longitud de onda. Las fototropinas absorben en el UV-A y en el azul. Las fototropinas son, como los criptocromos, flavoproteínas fotorreceptoras. Como su nombre indica, las fototropinas son los fotorreceptores principales que rigen la curvatura en el fototropismo y, en general, funcionan para controlar una serie de procesos que optimizan la eficiencia fotosintética de las plantas y promover el crecimiento (Christie, 2007).

En altas intensidades de luz, los cloroplastos se organizan a lo largo de la pared anticlinal de la célula para evitar foto-daño, mientras que a intensidad baja de luz, los cloroplastos se encuentran dispuestos en la pared periclinal superior con el fin de maximizar la absorción de la luz. Las fototropinas también tienen la función de regular la posición de la hoja y su expansión, la apertura de los estomas, y la inhibición del crecimiento rápido de las plántulas jóvenes a su salida de la tierra (Devlin *et al.*, 2007).

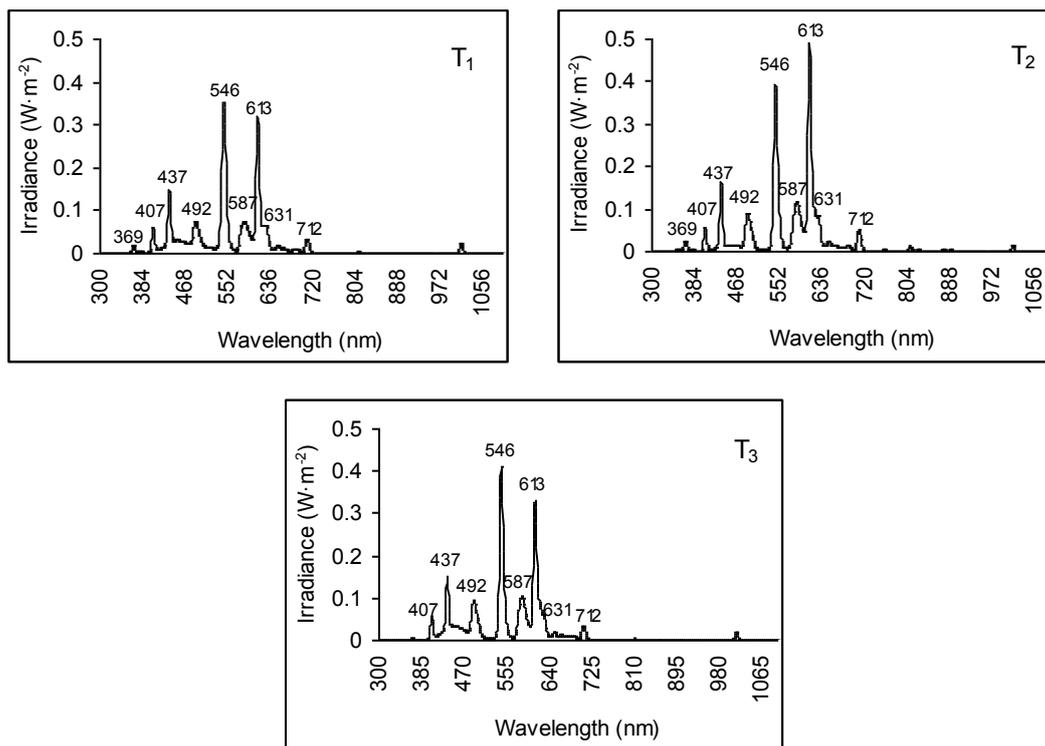


Figura 42. Calidad espectral medida sobre plántulas de tomate (irradiance: irradiancia en Wm^{-2} ; wavelength: longitud de onda en nm; T: tratamiento lumínico)

T₂ presenta la menor cantidad de energía en el rango del verde. Recientes estudios fotoquímicos y fotofisiológicos han sido capaces de indicar claramente que la luz verde tiene una influencia reguladora sobre las respuestas de varias plantas. Por ejemplo, la actividad del criptocromo se invierte por la luz verde (Bouly *et al.*, 2006). Los criptocromos regulan la luz inducida por la apertura de los estomas.

La luz verde promovió la elongación del hipocótilo de las plántulas *Arabidopsis* cultivadas en la oscuridad de una manera dosis-dependiente (Folta, 2004), que coincide con una baja regulación de las transcripciones de plastidios (Dhingra *et al.*, 2006). Además, la radiación complementaria con luz verde se reportó que aumenta la biomasa de las plantas (Sommer *et al.*, 2001).

T₂ aporta mayor cantidad de energía al sistema fitocromo, pero T₃ tiene la relación R:FR mayor que T₁ o T₂. La partición de la biomasa (raíz/parte aérea), la longitud de los pecíolos y la morfología de la planta dependen del equilibrio espectral R:FR y del contenido relativo de B con respecto a R (Kasperbauer y Hunt, 1990; Benavides, 1998). Los fitocromos son proteínas fotosensibles reversibles codificadas en las plantas. Existen formas proteicas para absorber luz en el R y FR, son Pr y Pfr, con la

absorción de la luz R por Pr se provoca una conversión a la forma Pfr, y la absorción de luz FR por Pfr produce la conversión a la forma Pr de nuevo (Rockwell *et al.*, 2006).

Tabla 26. Caracterización agronómica de la calidad lumínica (Wm^{-2})

Regiones espectrales (nm)	T₁	T₂	T₃
315-400 (UV)	0.30	0.32	0.11
400-520 (B)	4.22	3.57	4.41
520- 610 (G)	6.83	8.08	7.41
610-720 (R)	3.99	5.86	4.20
720-1000 (FR)	0.14	0.32	0.11
> 1000	0.18	0.11	0.13
PAR (400-700)	14.40	16.56	15.39
NIR (700-1100)	0.66	0.95	0.58
TOTAL (300-1100)	15.36	17.81	16.07
350-800 (Phys)	15.06	17.47	15.87
PAR:TOTAL	0.94	0.93	0.96
PAR:NIR	21.73	17.48	26.48
B:R	0.87	0.52	0.90
B:FR	9.36	5.47	10.66
R:FR	10.81	10.57	11.90
(R+B):FR	20.17	16.03	22.56

Además de permitir la detección de la luz, el fotorreversibilidad de las formas del fitocromo es la clave del papel de fitocromo en la capacidad de evitar la sombra. La luz reflejada por una planta es pobre en longitudes de onda rojas y azules, pero es rica en roja lejana. Como consecuencia de ello, la mayor parte del fitocromo se convierte en la forma inactiva Pr. La pérdida de Pfr elimina un inhibidor de la elongación en el crecimiento y activa efecto “evasión de sombra” (Devlin *et al.*, 2007).

Para evaluar el efecto sombra generado en las partes aéreas de las plantas por la radiación, hemos propuesto la relación (R+B):FR de acuerdo con Rockwell *et al.* (2006). El grado de sombreado está relacionado con R:FR (600 a 800 nm) y determina la posición del equilibrio reversible Pr/Pfr y el grado de elongación (Franklin y Whitelam, 2005). La fotomorfogénesis en plántulas está en gran parte controlada por fitocromos que absorben rojo/rojo lejano (PhyA-E) y por criptocromos de absorción en el azul/UV-A (Batschauer, 1999; Quail, 2002).

T₂ presenta el mejor valor de PAR (Fitter *et al.*, 1980). La radiación PAR, junto con la temperatura, son parámetros críticos para el rendimiento de la planta de tomate

en invernadero (Jones, 2008). La temperatura tiene una influencia más fuerte sobre la calidad del tomate que PAR porque los productores han podido obtener tomates de calidad similar en una amplia gama de PAR (Riga *et al.*, 2008).

T₃ tiene el valor más bajo de NIR y la más alta relación PAR:NIR. NIR se relaciona con una baja absorción de la radiación, la estimulación de la elongación celular y la reducción de la germinación.

T₂ tiene el valor más alto de radiación FR. La radiación FR aplicada en plantas de tomate influye morfogénicamente por la regulación de fitocromo en la partición de fitosintatos y esta exposición a FR produce entrenudos más largos que en las plantas tratadas con R (Decoteau *et al.*, 1988). La relación R:FR durante un período de luz en ambientes controlados afecta a la altura de planta y número de vástagos en el trigo (Kasperbauer y Karlen, 1986).

2. 2. Evaluación de la biomasa, carbohidratos y almidón

La producción de biomasa se muestra en la figura 43. Para su confección, se tomó el peso seco de las hojas (LDW), tallos (SDW), raíces (RDW), así como el total (TDW) para todos los tratamientos.

La figura 44 muestra la distribución de la biomasa (%) entre los órganos de todos los cultivares. El test de Tukey ($p < 0.05$) se utilizó para evaluar la importancia de la biomasa (%) en los tratamientos estudiados. El peso se midió con balanza de precisión y las medidas se analizaron con Excel y representadas en gráficas radiales.

La dependencia del estatus hídrico con los tratamientos de luz se evaluó mediante un parámetro determinado por el peso total fresco dividido por el peso seco total (TFW:TDW). Los valores de TFW:TDW se muestran en la figura 45.

La valoración de los hidratos de carbono totales (TCHs) como el almidón y azúcares solubles (estructurales y metabólicos) se midieron en $\text{mg}\cdot\text{órgano}^{-1}$. La capacidad de síntesis de hidratos de carbono entre los cultivares se muestra en la figura 46, donde TDW (g) se representa en eje derecho.

La respuesta máxima en la producción de biomasa se obtiene en T₂, como se muestra en la figura 43, seguido por T₃ y la respuesta mínima se presenta para el T₁ tanto en órganos fotosintéticos como conductores y de absorción. Estos valores podrían estar relacionados con la PAR recibida. Este comportamiento es similar para todos los cultivares excepto en 'Lynna' que no responde a las diferencias de PAR.

La captación de PAR incidente en las hojas es un gran proceso de producción de biomasa (Plénet *et al.*, 2000). Las plantas con mayor contenido de materia seca son más resistentes al trasplante y presentan una adaptación más fácil (Cornillon, 1999).

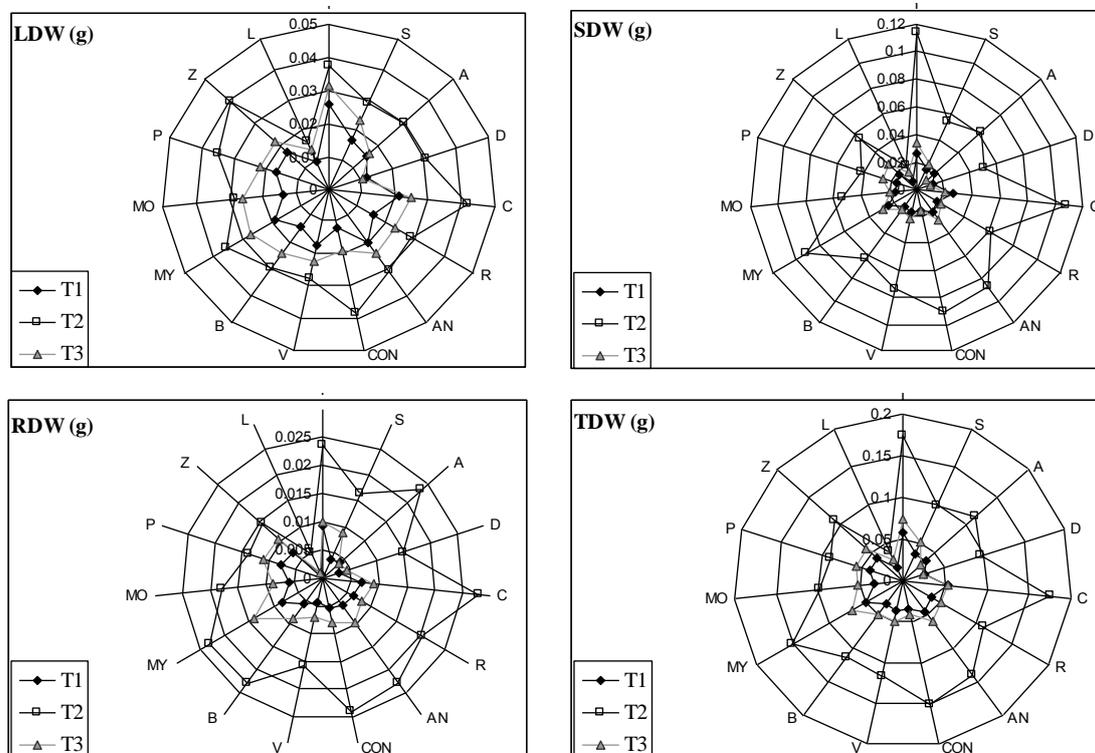


Figura 43. Pesos de las particiones en cultivares: hoja (L), tallo (S), raíz (R) y peso seco total (TDW)

En cuanto a la distribución de la biomasa (%) entre los órganos (Fig. 44), la masa de los tallos se incrementó en T₂ para todos los cultivares excepto en ‘Z’ y ‘L’ que no presentan diferencias entre los tratamientos. Se encontraron masas de tallo similares en T₁ y T₃ para ‘I’, ‘S’, ‘D’, ‘R’, ‘A_N’, ‘V’, ‘M_Y’, ‘M_O’ y ‘P’, y superiores en T₁ de T₃ para ‘A’, ‘C’, ‘C_{ON}’ y ‘B’. Estos resultados podrían estar relacionados con la evasión de la sombra (Morelli y Ruberti, 2000) a través de los ratios (R+B):FR (Rockwell *et al.*, 2006) y R:FR (Green-Tracewicz *et al.*, 2010).

T₂ tiene el menor valor de R:FR y produjo más elongación de los tallos, esto es consistente con Ballare *et al.* (1991). Sin embargo, Huimin *et al.* (2010) encontraron que las plantas de algodón bajo una relación espectral de B:R=1 presentan peso fresco, peso seco y longitud del tallo mayor que las que se encontraron bajo la relación B:R=0.33. Nuestros resultados son opuestos (Tabla 26 y Fig. 44).

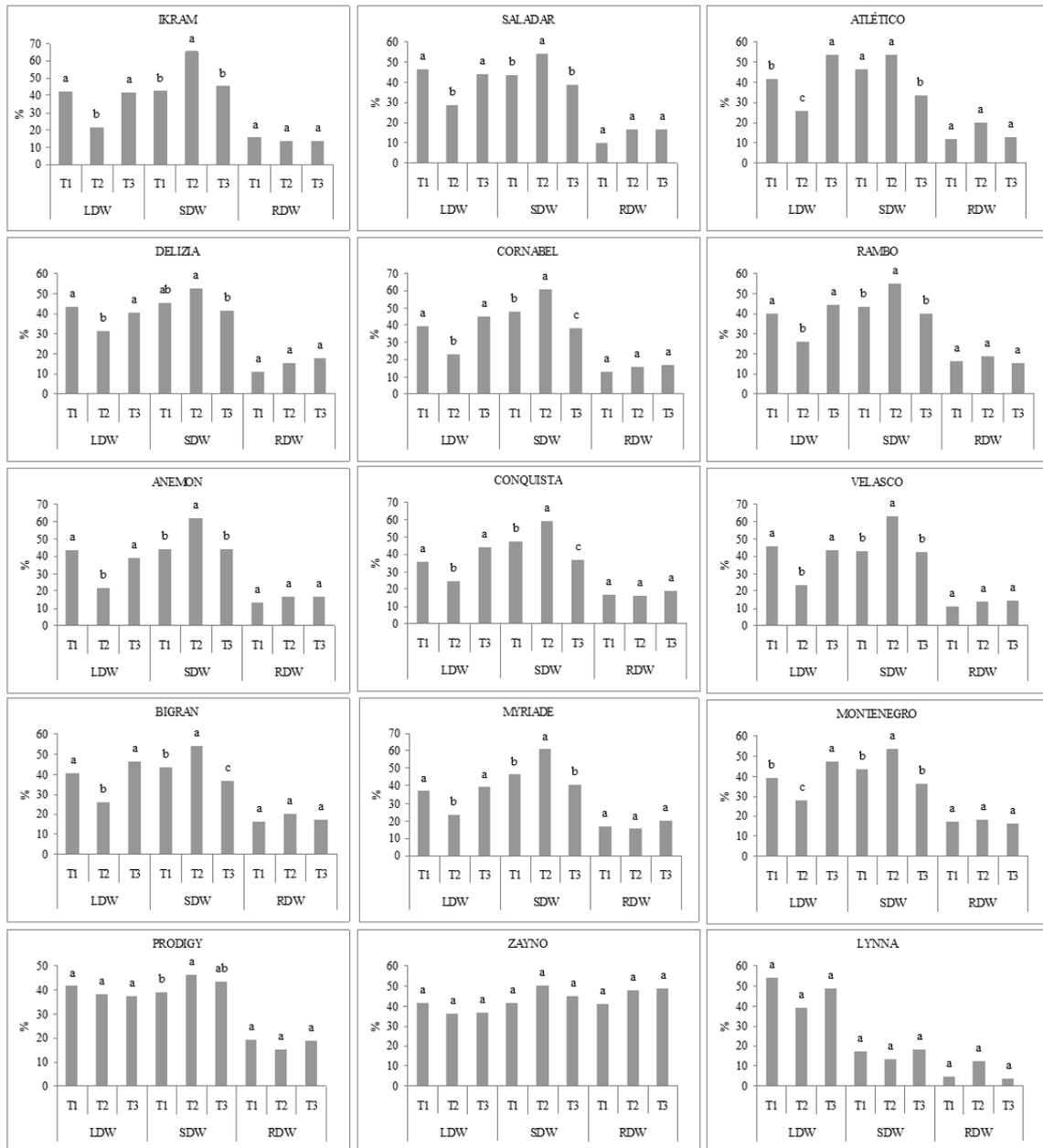


Figura 44. Distribución de la biomasa (%) entre órganos dependiendo de la fuente de iluminación

El porcentaje de masa de la hoja obtenido en T₂ es siempre significativamente menor que en los otros tratamientos, a excepción de ‘P’, ‘Z’ y ‘L’. T₁ y T₃ presentan porcentaje similar, excepto por ‘A’ y ‘M₀’. Estos resultados están de acuerdo con Kasperbauer (1970) teniendo en cuenta el mayor efecto de la sombra en T₂ evaluado a través de la relación (B+R):FR. La biomasa de las raíces es inferior a la de hojas y tallos, pero no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para todos los cultivares.

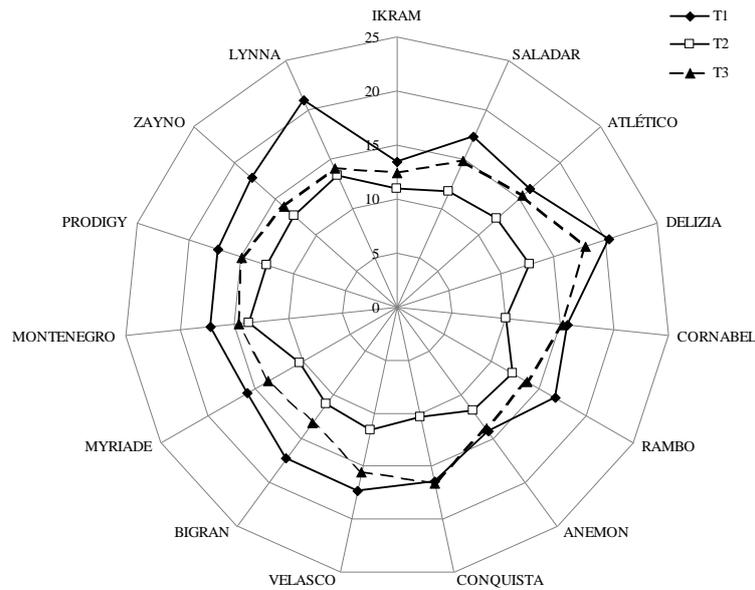


Figura 45. Estatus hídrico expresado como TFW:TDW dependiente de la fuente de luz utilizada

Todas las variedades no presentan similar respuesta morfológica a la iluminación. En general, las plantas en T₂ presentan mayor calidad debido a que la masa de hojas es menor, pero la partición raíz no se ve afectada.

Para todos los cultivares, T₂ presenta el valor más bajo del parámetro TFW:TDW (Fig. 45). El endurecimiento es evaluado por la relación TFW:TDW (Wainwright y Marsh, 1986). T₂ posee los más altos valores de NIR y PAR, pero la relación PAR:NIR es la más pequeña de los tratamientos. NIR podría aumentar la temperatura de las hojas y la transpiración y disminuir la relación TFW:TDW (Pieruschka *et al.*, 2010). Sin embargo, existe una relación lineal entre la absorción NIR y el grosor de la hoja (Dallon, 2005), pero PAR y la distribución espectral determinan las diferencias en la biomasa de las plantas (Smith, 1982).

Estos resultados indican que T₂ ofrece mayor endurecimiento asociado con baja masa de la hoja, indicador del aumento de la calidad de la planta. Franco *et al.* (2006) concluyeron que los procesos de endurecimiento y aclimatación (pre-acondicionado), durante el periodo de vivero se correlacionan con la capacidad de soportar el choque de los trasplantes y aumentar la supervivencia y crecimiento de las plantas después del trasplante. Además, Atherton y Rudich (1987) establecieron que en las plántulas de tomate con baja masa de hojas, menor transpiración y mayor tolerancia al estrés hídrico son más eficaces para aumentar la resistencia al trasplante a nuevas condiciones de invernadero o campo.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de la valoración total de carbohidratos (almidón y azúcares solubles) (TCHs medidos en $\text{mg}\cdot\text{órgano}^{-1}$), tanto estructurales como metabólicos, podemos ver la capacidad de síntesis de carbohidratos entre diferentes cultivares. Hay algunas variedades que presentan un comportamiento similar y se han clasificado en los grupos de interés, como se muestra en la figura 46.

Teniendo en cuenta el valor del total de carbohidratos (TCHs), la clasificación es la siguiente:

- a) TCHs más altos en T₂; T₁ y T₃ presentan valores similares: 'I', 'S', 'M_Y', 'A', 'C', 'A_N', 'C_{ON}', 'V', 'P', 'Z' y 'L'.
- b) TCHs similares en T₁ y T₂, y ambos, por encima de T₃: 'D'.
- c) TCHs similares en T₃ y T₂, y ambos, por encima de T₁: 'R', 'M_O' y 'B'.

Los hidratos de carbono se utilizan en la producción de biomasa y almacenamiento de energía en forma de almidón. Además, los azúcares constituyen la energía implicada directamente en el metabolismo. La producción de biomasa valorada como TDW es mayor en T₂ para todos los cultivares, relacionado con una mayor PAR de acuerdo con Marcelis *et al.* (1998) y también, la cantidad de almidón es más alta que la de los azúcares para todos los tratamientos. Estos resultados concuerdan con Hocking y Steer (1994) que mostraron valores de concentración de glucosa ($9.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ TFW}$) y almidón ($56.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ TFW}$) en hojas de tomate después de 49 días bajo luz constante ($750 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\text{PAR}$).

Hay dos efectos de luz simultáneos: 1) aumento de la biosíntesis de TCHs, debido a PAR en T₂, donde se incluye el primer grupo, esto concuerda con Bunce y Sicher (2003); 2) aumento del almidón y la disminución de los azúcares debido al alto R:FR en el T₃, donde se incluye el tercer grupo. Esto concuerda con Kasperbauer y Hamilton (1984).

Por otro lado, 'Ikram' tiene la mayor capacidad de síntesis en todos los tratamientos. Otros cultivares como 'S', 'M_Y', 'M_O', 'A', 'P' y 'Z' tienen una capacidad de síntesis media; 'D', 'R', 'C', 'A_N', 'C_{ON}', 'V', 'B' y 'L' tienen un bajo nivel. 'C_{ON}' presenta clorosis en los tratamientos T₁ y T₃; 'V' y 'B' en todos los tratamientos.

La diferente respuesta de las plantas a la luz continua puede estar relacionada con que son diferentes cultivares que han desarrollado diferentes mecanismos de respuesta al fotoperiodo (Jackson, 2009). Además, la respuesta de la planta a la luz continua puede variar dependiendo de la etapa de desarrollo de la misma. Demers y Gosselin (2002) afirmaron que, a largo plazo, el uso de luz continua es perjudicial para

el tomate. Sin embargo, el crecimiento vegetativo temprano y la producción de fruta se puede mejorar a corto plazo (5-7 semanas) siendo las plantas de tomate sensibles a la luz continua.

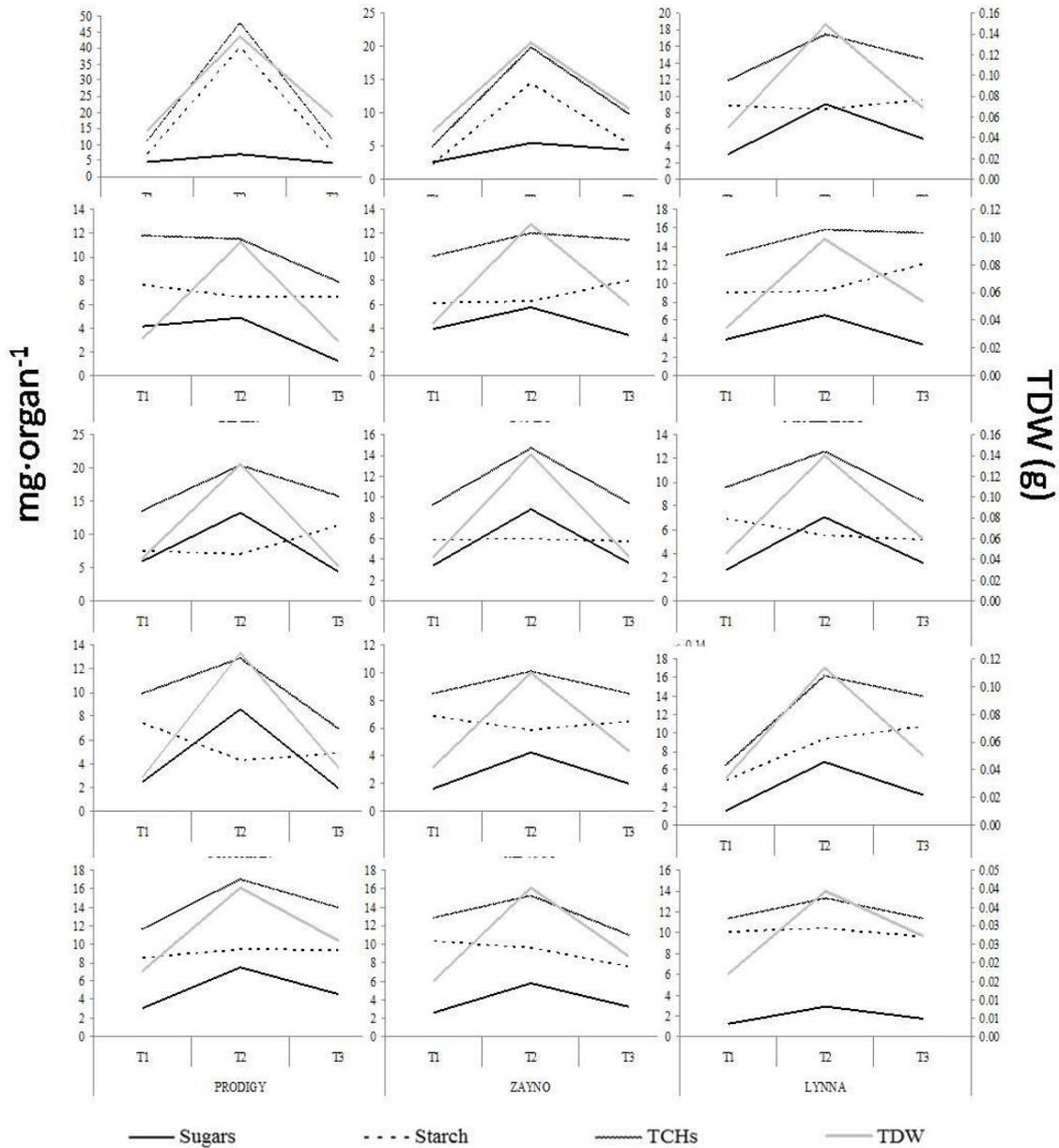


Figura 46. Capacidad de síntesis de: azúcares, almidón e hidratos de carbono (TCHs) medidos en $\text{mg}\cdot\text{organ}^{-1}$ (eje izquierdo); Peso seco total en g (eje derecho)

3. Test de prolina para la evaluación del estrés lumínico en plántulas de tomate

3.1. Calidad espectral de las fuentes de luz

La calidad espectral de la radiación y la caracterización agronómica de las fuentes de luz se describieron en la tabla 23 y en Almansa *et al.* (2011). Es interesante señalar que la T₁ y T₂ muestran valores de radiación UV similares (0.31 y 0.32 Wm⁻²) y superiores a T₃ (0.11 Wm⁻²). El gradiente de la radiación azul (B) es T₃ (4.24 Wm⁻²) > T₁ (3.90 Wm⁻²) > T₂ (3.42 Wm⁻²). T₂ muestra los más altos valores de radiación en la franja del rojo (R) (6.62 Wm⁻²) y rojo lejano (FR) (0.63 Wm⁻²), mientras que los parámetros en T₁ y T₃ son similares (4.50-4.73 Wm⁻² y 0.42-0.40 Wm⁻², respectivamente).

T₂ muestra el mejor valor de PAR (16.57 Wm⁻²) respecto a T₁ (14.40 Wm⁻²) y T₃ (15.39 Wm⁻²). T₂ tiene mayor radiación en NIR (0.95 Wm⁻²) respecto a T₁ (0.66 Wm⁻²) y T₃ (0.58 Wm⁻²). T₂ tiene el valor más alto de la radiación total (17.70 Wm⁻²) respecto a T₁ (15.88 Wm⁻²) y T₃ (15.94 Wm⁻²).

3.2. Prolina en el desarrollo de la planta y relación con la luz

La figura 47 muestra la concentración de prolina en las hojas (μg·g⁻¹ FW) en todos los cultivares y tratamientos. Las concentraciones de los diferentes cultivares y tratamientos están en el rango de 50-600 μmol·g⁻¹ FW, estos valores son similares a los encontrados en las plantas de tomate por Amini y Ehsanpour (2005) (50-400 μmol·g⁻¹ FW) e inferior o similar a la encontrada por Inal (2002) para el tratamiento control (440 μmol·g⁻¹ FW) e inferior de los encontrados en los tratamientos salinos (hasta 6.98 μmol·g⁻¹ FW). En este ensayo, 'S' y 'P' no muestran diferencias significativas para este parámetro en los tratamientos probados.

Altas radiaciones resultan en daño a la planta, las variedades más sensibles a la alta radiación pueden generar más síntesis de prolina (Arora y Saradhi, 1995). Este comportamiento se aprecia en 'M₀', 'Z' y 'L' en T₂ (Fig. 47). Otros cultivares presentaron menor concentración de prolina en T₂ que en T₁ y T₃ correspondiendo con el valor más alto y más bajo de intensidad de la radiación PAR recibida. Podría ser debido a la cercanía con el punto de compensación y el de saturación definidos por Glime (2006), pero no se encontraron datos para las plántulas de tomate.

La capacidad de síntesis de prolina en la hoja (LPSC), definida como la concentración de prolina en hojas ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ LFW) por peso fresco de hojas (LFW) (g), se presenta en la tabla 27. Es interesante observar los valores de LPSC en los cultivares estudiados. Para evaluar la LPSC, se presenta la figura 48.

Tabla 27. Capacidad de síntesis de prolina en la hoja (LPSC) en ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ LFW) por peso fresco de hojas (LFW) (g) de diferentes cultivares y tratamientos lumínicos

Cultivares	T1	T2	T3
	LPSC Mean \pm 4.034 (g)		
I	155.03 a ^z	152.26 a	232.39 a
S	131.17 a	138.48 a	202.73 a
A	68.315 a	39.867 a	45.517 a
D	40.35 a	50.43 a	51.576 a
C	165.19 a	153.53 a	138.77 a
R	113.61 a	103.26 a	147.82 a
A _N	80.27 a	100.08 a	101.38 a
C _{ON}	95.6949 a	41.392 a	47.119 a
V	94.66 a	32.63 b	123.39 a
B	67.557 a	65.466 a	53.685 a
M _Y	96.91 a	73.44 a	129.55 a
M _O	44.3 b	125.04 a	79.04 ab
P	74.7 b	133.29 a	99.11 b
Z	65.08 b	218.99 a	62.56 b
L	54.18 b	116.95 a	62.56 b

^z letras diferentes en la misma fila significa diferencias significativas en el análisis estadístico (Test Tukey $p \leq 0.05$).

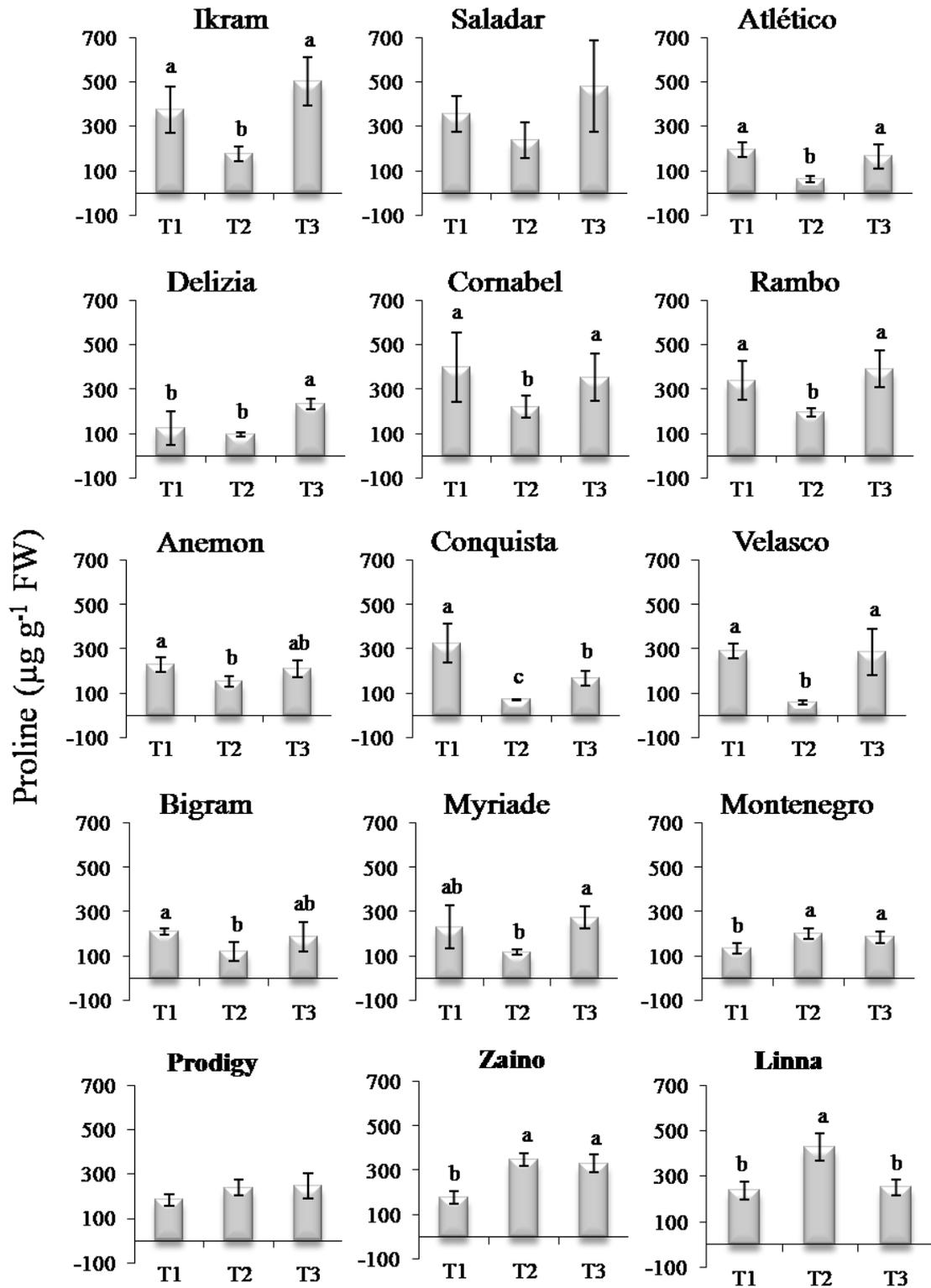


Figura 47. Concentración de prolina en hojas de plántulas de tomate. Letras diferentes por tratamiento en cada cultivar significa diferencias significativas según el análisis estadístico (Test de Tukey $p < 0.05$)

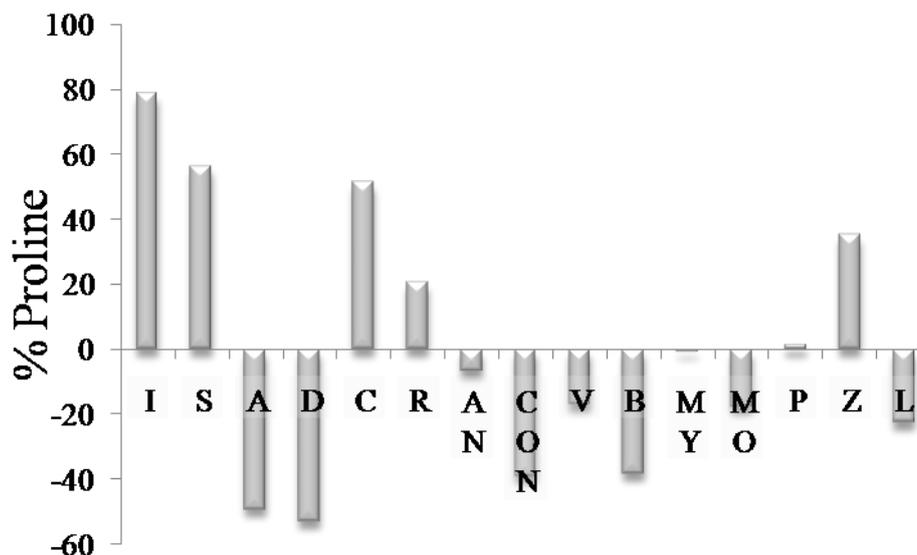


Figura 48. Relación porcentual de la capacidad de síntesis de prolina en hoja (LPSC) respecto a la media de LPSC estudiada en los cultivares

La figura 48 muestra los porcentajes de LPSC relacionados con un promedio de LPSC de todos los cultivares estudiados. Sobre ella podemos establecer dos grupos de cultivares. En el primero, donde % LPSC es superior a la media: 'I', 'S', 'C', 'R', 'P' y 'Z'. En el segundo grupo, donde % LPSC es inferior a la media: 'A', 'D', 'AN', 'CON', 'V', 'B', 'MY', 'MO' y 'L'. Estos resultados apoyan la diferente capacidad de respuesta al estrés de los cultivares estudiados relacionado con el efecto de protección que causa la prolina al efecto de la luz (Mansour, 2000).

Las lámparas LED permiten aplicar una región espectral específica, pero las necesidades de radiación de la planta no se suministran mediante el uso de LEDs. Para ello, en la figura 49, se presenta el enfoque de los efectos específicos de las regiones espectrales sobre la concentración de prolina por las correlaciones medias entre la intensidad de la radiación de luz (Wm^{-2}) y la concentración de prolina en hoja ($\mu g \cdot g^{-1}$ FW). El valor del coeficiente más cercano a "1 o -1" significa correlación positiva o negativa. En general, podemos ver que todas las variedades tienen diferentes reacciones a estas fracciones de la luz (UV, B, R, FR, PAR y NIR).

El comportamiento de las plántulas de diferentes cultivares frente a la luz se pueden separar en dos grupos: un primer grupo, con una correlación positiva en R, FR, PAR, NIR, TOTAL y negativa en las bandas del azul ('MO', 'P', 'Z' y 'L'), y un segundo grupo, con el comportamiento opuesto, una correlación negativa a la radiación

UV, R, FR, PAR, TOTAL, NIR y positiva en las bandas del azul ('I', 'S', 'A', 'D', 'C', 'R', 'A_N', 'C_{ON}', 'V', 'B' y 'M_Y').

Este comportamiento diferencial se corresponde con la clasificación que hizo Lichtenthaler (1996): las plantas con poca luz o bajas necesidades lumínicas (grupo 1) y plantas de luz o altas necesidades lumínicas (grupo 2); estas últimas necesitan radiación alta para su producción. El grupo 2 estará bajo estrés cuando la radiación esté por debajo de su rango de adaptación genética. A su vez, un grupo de plantas se encuentran bajo estrés por los excesos de la radiación sobre su capacidad de adaptación a la luz.

En general, la UV promueve la acumulación de prolina (Saradhi *et al.*, 1995; Musil, 1996; Demir, 2000; Carlettia *et al.*, 2003; Amal *et al.*, 2006; Salama *et al.*, 2011), pero Schweiger *et al.* (1996) consideran que las plantas, tales como el grupo 2, estarían mejor protegidas contra el estrés o daños por UV-A y UV-B. No tenemos correlación de datos sobre la radiación UV-B. Las correlaciones respecto a UV-A presentan el comportamiento opuesto, que podría ser debido al bajo nivel de radiación UV-A aplicado. Por lo tanto, la respuesta de los cultivares es heterogénea, sólo 'I', 'S', 'D', 'R' y 'M_Y' presentan una correlación significativa.

Alia *et al.* (2001) encontraron un aumento en la producción del singlete oxígeno bajo LED azul de toluidina, pero fue completamente abolida por la presencia de prolina en concentraciones bajas, y concluye en que la prolina es un extintor de singlete oxígeno muy eficaz. Se encontraron correlaciones positivas significativas en nuestro grupo 2, de acuerdo con Alia *et al.* (2001).

Sheng *et al.* (1993) explican que, en plántulas de tomate decoloradas, el fitocromo ha demostrado estar involucrado en la regulación negativa de niveles de glicoproteínas ricas en hidroxiprolina (HRGP) del ácido ribonucleico mensajero (ARNm). Resultados similares se presentan en este trabajo en el grupo 2. Ashrafijou *et al.* (2010) estudiaron semillas de canola irradiadas por láser, rico en radiaciones roja e infrarroja, que mostraron variaciones positivas en el contenido de prolina y concluyeron que la irradiación de luz láser puede ser útil para mejorar el rendimiento de la colza en las condiciones de campo, especialmente en regiones en condiciones de salinidad. Los resultados del grupo 1 son similares.

Relacionados con la PAR, Abraham *et al.* (2003) y Hayashi *et al.* (2000) encontraron la conexión entre la fotosíntesis y el metabolismo de la prolina, estudio apoyado por la acumulación de prolina dependiente de la luz, proceso regulado por el

que las hojas iluminadas por luz del sol están a menudo saturadas por la luz y su control es independiente a la alta irradiación (Houborg, 2006). Nuestros grupos 1 y 2 podrían estar relacionados con este comportamiento de hojas sobre iluminadas y bajo sombra, respectivamente.

La prolina se acumula en las plantas como respuesta al estrés por las temperaturas extremas producidas por exceso de NIR, descrito por Kramer (1980). Ambos grupos definidos presentan un comportamiento diferente y puede ser debido a las temperaturas de las hojas que también pueden variar ampliamente entre iluminación y sombreo (Houborg, 2006).

La respuesta a la intensidad de la luz total en función de la concentración de prolina en hojas difiere en los distintos cultivares (Fig. 49). Los resultados sugieren un efecto de foto-inhibición en el grupo 1 causado por la alta intensidad de luz. La eficiencia fotoquímica del Fotosistema II (PSII) se reduce cuando la intensidad de la luz es alta debido a la generación de especies activas de O₂ (Hideg y Vass, 1996; Barabás *et al.*, 1998) y la prolina proporciona protección en contra de la fotoinactivación del PSII (Alia *et al.*, 1991).

4. Contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio en plantas de tomate bajo tratamientos lumínicos

La descripción de la calidad espectral de las fuentes de luz utilizadas para este apartado es la misma del apartado anterior.

En la tabla 28 se recogen los valores medios de la cantidad extraída por la planta, así como las diferencias significativas en N, P y K de los cultivares al someterlos a los tratamientos de iluminación. Letras iguales en la misma fila, significa no diferencias significativas para el cultivar bajo distintas fuentes de luz (test de Tukey $p < 0.05$).

Nueve de las quince variedades estudiadas no han sido afectadas por los tratamientos de luz en cuanto al contenido de N. 'D', 'C', 'B' y 'S' presentan significativamente menor extracción de N en TL5, mientras que 'L' presenta el comportamiento contrario frente a la luz. Estos resultados no concuerdan con los obtenidos por Bethlenfalvay y Phillips (1977), que informaron que en *Pisum sativum* L.

los nódulos, el peso seco de la planta y los valores de N total en la planta se incrementan con la intensidad de luz.

Tabla 28. Concentración de N, P y K en plantas de tomate en periodo de germinación y crecimiento antes de su trasplante

	N mg planta ⁻¹			P mg planta ⁻¹			K mg planta ⁻¹		
	CF	TL5	TLD	CF	TL5	TLD	CF	TL5	TLD
A	2.85 a	3.32 a	3.19 a	1.70 ab	2.57 a	1.13 b	1.51 b	3.70 a	1.05 b
D	3.49 a	2.80 b	3.05 ab	1.25 ab	1.64 a	0.87 b	1.23 b	5.29 a	0.66 b
C	2.92 ab	2.65 b	3.21 a	1.71 b	3.27 a	1.38 b	2.49 b	5.36 a	2.23 b
R	2.34 a	2.77 a	2.77 a	1.42 a	1.88 a	1.38 a	1.82 b	4.60 a	1.53 b
I	2.88 a	2.78 a	2.60 a	1.49 b	2.78 a	2.01 b	2.94 b	5.43 a	2.78 b
A_N	2.98 a	2.75 a	3.05 a	1.55 b	2.56 a	2.00 ab	2.12 b	6.53 a	1.68 b
C_{ON}	3.16 a	3.01 a	2.91 a	1.64 a	2.99 a	1.76 a	1.28 b	7.82 a	1.62 b
V	2.66 b	2.74 b	2.96 a	1.62 a	2.02 a	1.59 a	1.50 b	3.93 a	1.64 b
B	3.44 a	2.70 b	3.15 ab	1.85 a	2.11 a	1.89 a	1.58 b	4.61 a	2.35 b
M_Y	2.80 a	2.75 a	2.84 a	1.90 a	3.46 a	2.55 a	1.98 b	4.40 a	2.40 b
S	3.32 a	2.55 b	2.84 ab	1.72 a	1.78 a	1.83 a	1.94 b	3.25 a	2.13 b
M_O	3.00 a	2.98 a	3.07 a	1.60 a	1.69 a	1.64 a	1.51 b	3.29 a	1.87 ab
P	3.12 a	3.00 a	3.05 a	2.29 b	5.16 a	1.90 b	2.09 a	2.14 a	2.07 a
Z	2.81 a	2.86 a	3.00 a	2.35 b	5.74 a	3.39 b	2.36 b	3.42 a	2.22 b
L	2.72 b	3.12 a	2.75 b	0.78 a	2.26 a		0.78 b	1.43 a	0.48 b

En cuanto al P total ‘R’, ‘C_{ON}’, ‘V’, ‘B’, ‘M_Y’, ‘S’ y ‘M_O’ no han sido afectadas por los tratamientos de luz, sin embargo ‘A’, ‘D’, ‘C’, ‘I’, ‘A_N’, ‘P’, ‘Z’ y ‘L’ presentan una extracción significativamente mayor de P total en el tratamiento TL5. El aumento en la absorción del fósforo observado en altos niveles de radiación caracteriza un mayor grado de extensión de este elemento en las plantas, debido a que el contenido de fósforo se utiliza para un aumento de la síntesis de ATP y reducción de la tasa de nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADP) (Kosobrukhov *et al.*, 1988). Aunque el P total se relaciona con una mayor biomasa y mayor eficiencia en la asimilación de N en plántulas de vivero según Ruiz y Rathgeb (1990), en nuestro ensayo ocurre lo contrario, es decir bajo el tratamiento TL5 se presentan las menores extracciones de N y las mayores de P total, aunque sí se podría relacionar con el antagonismo inespecífico anión-anión descrito por Marschner (1995).

Todas las variedades estudiadas, excepto ‘P’, presentan significativamente más extracción de K en TL5, similar a los resultados que hemos obtenido de fósforo. Por

tanto, parece ser el K el nutriente más sensible, en cuanto a extracción se refiere, a la calidad espectral de la luz.

No podemos relacionar ni la mayor radiación total ni PAR, con una mayor extracción de N. Aunque Zornoza *et al.* (1987) proponen que las plantas cultivadas con un régimen de luz alto muestran una disminución de la absorción de N, P y K. En nuestro caso solo ocurre con el N.

Puesto que CF y TL5 presentan valores similares de intensidad de radiación en la región azul, no parece que esta región sea la responsable de las diferencias que observamos, sin embargo el ratio con las regiones R y FR si pueden ser las responsables de los cambios encontrados en la extracción de nutrientes. En este sentido Alphalo y Lehto (1997), encuentran que en plántulas de abedul, el suministro de nutrientes no parece afectar a la respuesta a luz FR, pero sí hay respuestas a la luz B, por otra parte Demers *et al.* (1998), encuentran que una baja relación B:R promovió diferentes respuestas en las plantas en la absorción de nutrientes en plantas de tomate. Por lo tanto como una primera aproximación parecen ser los ratios B:R y B:FR los responsables de la conducta nutricional de las plántulas de tomate.

La concentración de nitrógeno (N) y la biomasa (DW) medidos mostraron una relación hiperbólica del crecimiento bajo luz de alta intensidad, como se muestra en la figura 50. Una relación similar a la descrita se encontró con el fósforo (P total) y la biomasa (DW), como se muestra en la figura 51.

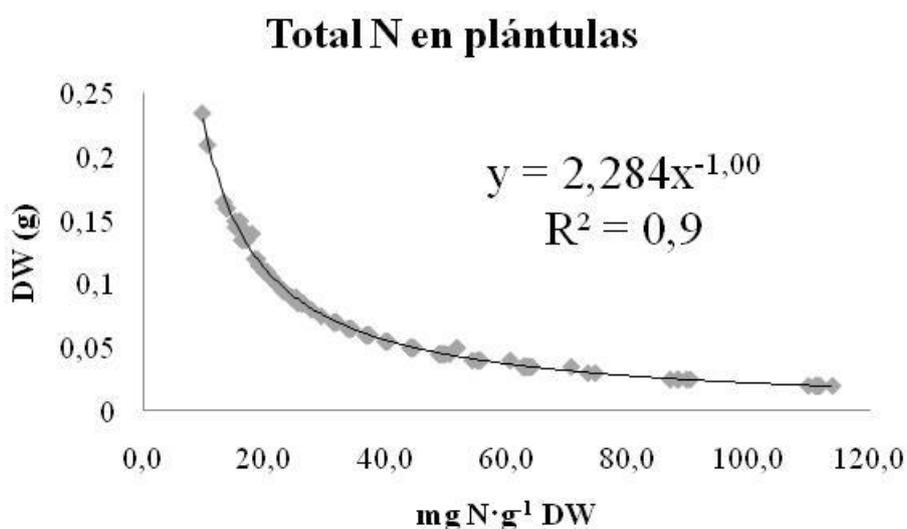


Figura 50. Relación del Nitrógeno total (N) y peso seco (DW) en el crecimiento de tomates bajo iluminación artificial. Los tratamientos lumínicos duraron 34 días

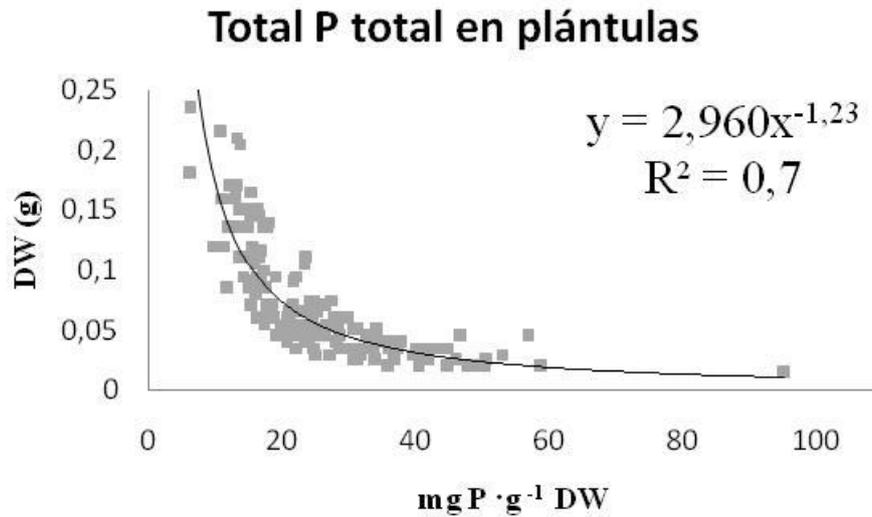


Figura 51. Relación entre Fósforo total (P) y peso seco (DW) en el crecimiento de tomates bajo iluminación artificial

Los ratios N:P, N:K y P:K, están relacionados con la limitación de nutrientes en la planta. Por ello, en la tabla 29 se presentan dichos valores, los cuales presentan diferencias significativas según el tratamiento de luz. La relación N:K determina el equilibrio entre los procesos vegetativos y reproductivos.

Tabla 29. Valores y análisis estadístico (test de Tukey $p < 0.05$) de N:P, N:K y P:K

	N:P			N:K			P:K		
	CF	TL5	TLD	CF	TL5	TLD	CF	TL5	TLD
A	1.90 a	1.23 a	1.97 a	1.96 ab	0.76 b	3.12 a	1.09 a	0.72 a	0.94 a
D	2.64 a	1.18 b	2.43 a	2.74 a	2.43 a	6.54 a	0.97 a	1.55 a	1.01 a
C	1.90 a	0.93 b	1.53 ab	1.08 a	0.50 b	1.40 a	0.57 a	0.61 a	0.98 a
R	1.47 b	1.21 b	1.91 a	1.36 a	0.60 b	1.69 a	0.83 ab	0.29 b	0.95 a
I	1.67 a	0.89 b	1.42 ab	0.05 c	0.48 b	1.18 a	0.03 b	0.57 a	0.81 a
A_N	2.03 a	1.05 b	1.76 ab	1.23 a	0.42 b	1.83 a	0.61 b	0.39 b	1.14 a
C_{ON}	2.59 a	0.94 c	2.09 b	2.38 a	0.37 b	2.02 a	2.33 a	0.47 a	1.05 a
V	1.58 b	1.18 c	1.99 a	1.87 a	0.80 b	1.65 a	1.09 a	0.72 a	0.82 a
B	1.10 b	2.03 a	1.63 ab	2.05 a	0.59 b	1.65 a	1.10 a	0.45 b	0.82 ab
M_Y	1.75 a	1.14 a	1.56 a	1.40 a	0.67 a	1.05 a	1.06 a	1.04 a	0.98 a
S	1.84 a	1.35 a	2.04 a	1.72 a	0.98 a	1.53 a	0.92 a	0.75 a	0.95 a
M_O	1.79 a	1.25 a	1.38 a	2.06 a	0.99 a	1.99 a	1.11 a	0.77 a	1.00 a
P	1.60 a	1.27 a	1.60 a	1.35 a	1.27 a	1.35 a	1.13 b	2.44 a	1.31 b
Z	1.70 a	1.42 a	1.35 a	1.69 a	0.84 a	1.54 a	1.14 a	1.57 a	1.19 a
L	2.12 a	1.34 b	2.47 a	3.34 ab	2.05 b	4.75 a	1.44 a	2.11 a	

Las variedades 'M_Y', 'S', 'M_O' y 'Z' no se ven afectadas significativamente por la luz en las relaciones estudiadas. Además las variedades 'A', 'D', 'C', 'C_{ON}', 'V', y 'L' no modifican significativamente el ratio P:K en función de los tratamientos de luz establecidos. Las diferencias más importantes las encontramos en los ratios del N con P y K. Siendo ambos ratios N:P y N:K significativamente inferiores bajo las lámparas TL5.

La relación N:P se utiliza como indicador de limitación de nutrientes en la planta según Güsewell *et al.* (2003), y Best *et al.* (2004), que establecieron valores de la relación N:P (1.25 y 0.28) en plantas acuáticas y de tierras húmedas. Ambos extremos indican limitación del crecimiento medio por el N, sin embargo, 0.4 indica limitación del crecimiento por el P. Muchos de nuestros valores presentan valores superiores y puede ser debido a estar bajo luz continua. Spencer y Ksander (2003) indicaron la relación entre N:P del tejido y el factor de reducción de la fotosíntesis en *V. americana* y *P. pectinatus* obtenido por el método de integración de Gauss. Según este método, los valores intermedios de N:P en una especie vegetal indican que dicha especie presenta una reducción relativa de la fotosíntesis, siendo 1 el valor más alto obtenido para el factor de reducción.

El tratamiento con lámparas TL5 se caracteriza por tener valores más bajos de B:R, B:FR, y R:FR (Tabla 26) respecto al resto de tratamientos lumínicos.

El K actúa como regulador del crecimiento cuando la disponibilidad de N es alta y garantiza, además un adecuado rendimiento, regula la aparición de determinados desórdenes fisiológicos que inciden en la apariencia interna y externa de los frutos (color) y constituye un aspecto de manejo agronómico que incide en la durabilidad de la cosecha (Colombo y Obregón, 2008).

Hernández *et al.* (2009) propusieron que en tomate, la relación ideal de N:K es del orden de 1.33. De nuestros cultivares, sólo 'R' y 'P' tienen un valor similar a 1.33 para el tratamiento con CF, y sólo 'P' se comporta igual bajo iluminación con TLD. Para el ratio P:K, su importancia radica en el requerimiento nutricional que debe ser adecuado para la viabilidad de la planta (Landriscini *et al.*, 1997), por ello su interés en las varianzas significativas como ocurre en los cultivares 'R', 'I', 'A_N', 'B' y 'P'.

La relación N:P:K establece el estado nutricional de la planta y sus necesidades. Sobre esta relación, los agricultores fertilizarán con relaciones equilibradas y específicas de N:P:K, buscando obtener mayores incrementos del crecimiento y mejor calidad de la planta. Para viveros, el aporte de nutrientes es quizá, junto con el manejo del riego, una

de las prácticas culturales de mayor importancia en la producción de la planta (Domínguez *et al.*, 2000).

Las plántulas de tomate se fertilizaron con la misma solución nutritiva para todos los tratamientos. Dicha solución nutritiva fue aportada por la empresa comercial y garantizaba el perfecto desarrollo de las plántulas en la germinación y pretransplante. Si observamos la figura 52, podemos ver que no todos los cultivares se comportan igual en cuanto a necesidades nutricionales. A su vez, los tratamientos lumínicos afectan a la asimilación de los nutrientes. Si en viveros y semilleros se trata con este tipo de lámparas, habría que tener en cuenta tanto la variedad como el espectro lumínico, ya que éste último afectará a la asimilación de nutrientes fundamentales y por lo tanto a la calidad de la planta.

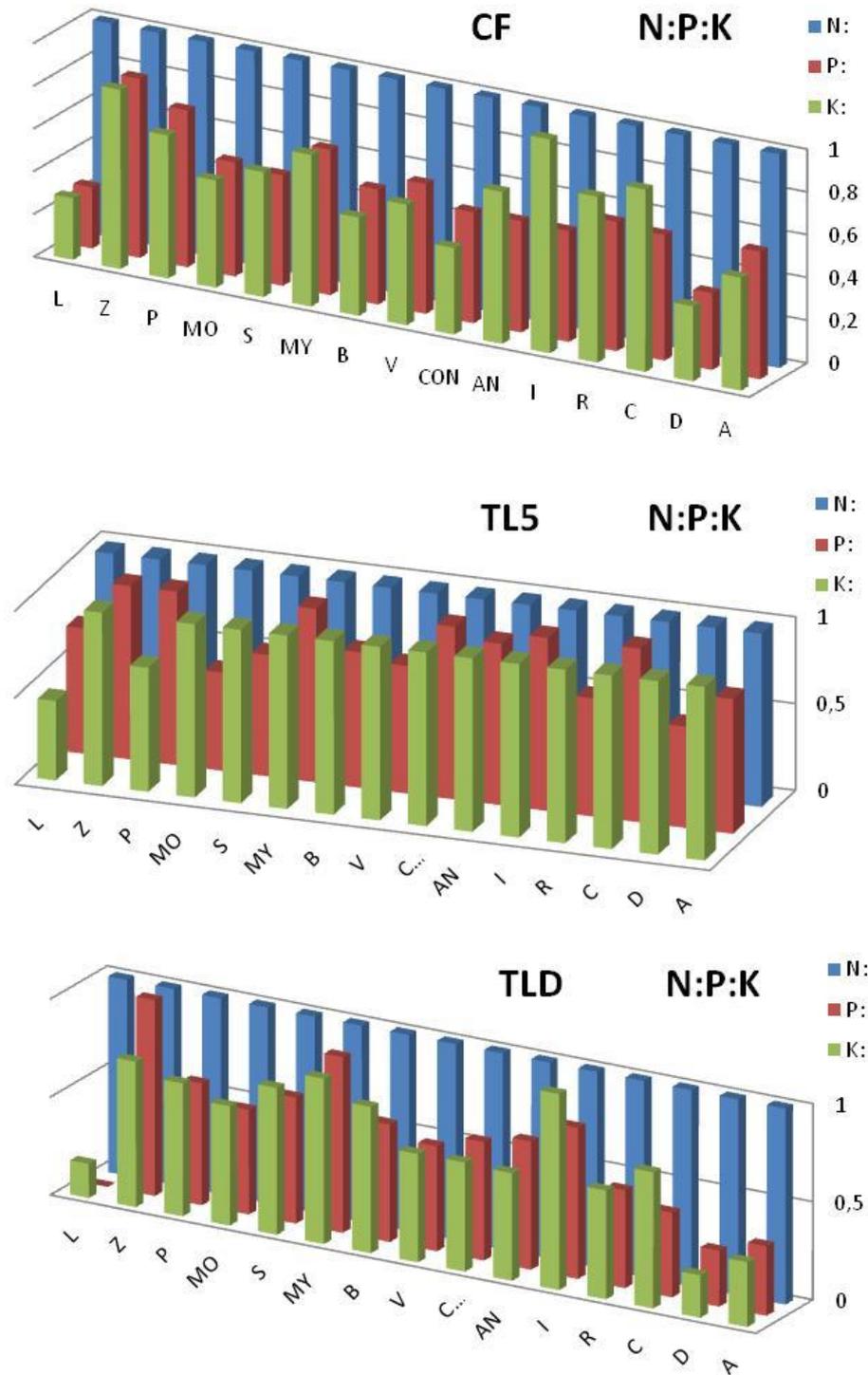


Figura 52. Relación N:P:K de los cultivares bajo iluminación artificial con lámparas fluorescentes de bajo consumo (CF), alta eficacia (TL5) y estándares (TLD)

ENSAYO 3

1. Respuesta fisiológica de Dieffenbachia compacta y Fittonia verschaffeltii bajo tres fuentes de iluminación artificial continua

1. 1. Calidad espectral de las fuentes de luz

Las medidas de radiación recibida por las plantas bajo nuestros tratamientos lumínicos se describen en la tabla 30 según los criterios de caracterización agronómica propuesta por Baille *et al.* (2003). Debe tenerse en cuenta que la diferencia de energía total emitida por las lámparas y la suma de las fracciones espectrales medidas con espectrorradiómetro, se deben a la distribución física en el espacio de estas fuentes de luz.

Tabla 30. Caracterización agronómica de la radiación recibida por el dosel vegetal en distintos tratamientos lumínicos con fluorescentes estándares (TLD), fluorescentes estándares enriquecidos con LEDs mezcla color Rojo (636 nm) y Azul (470 nm) y fluorescentes de alta eficiencia (TL5)

Región espectral (nm)	Radiación ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
	TLD	TLD+LEDs	TL5
UV (300-400)	0.81	0.41	1.89
B (400-500)	30.52	26.22	20.16
R (600-700)	34.58	26.26	39.61
FR (700-800)	2.92	1.49	4.14
PAR (400-700)	111.96	77.32	98.43
NIR (700-1100)	4.21	2.12	7.32
TOTAL (300-1100)	116.0	79.31	106.84
PAR:TOTAL	0.97	0.97	0.92
PAR:NIR	26.58	36.49	13.45
B:R	0.88	1.00	0.51
B:FR	10.45	17.62	4.87
R:FR	11.84	17.65	9.58

La combinación de fluorescentes estándares con módulos LEDs parece reducir la radiación UV que van a recibir las plantas. Esto se considera una ventaja tanto para las plantas como para los operarios. Los trabajadores pueden sufrir daños en los ojos por la radiación UV si la lámpara sobrepasa de $10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, siendo el tiempo límite a la exposición de 8 h según la Directiva de Radiación Óptica Artificial 2006/25/CE (Norma

UNE-EN 62471 Seguridad Fotobiológica en Lámparas. Consideraciones para Productos de Iluminación General).

La radiación UV es percibida por unos receptores vegetales (fitocromos entre otros), que en conjunto con los receptores del azul (B), regulan las respuestas adaptativas a las condiciones de alta irradiancia (Wellman, 1983). Estas respuestas están relacionadas con la cantidad de nutrientes transportados del suelo a las partes aéreas, el reparto selectivo de nutrientes entre diferentes órganos de la planta y la consecuente acumulación diferencial de carbohidratos o productos del metabolismo secundario (Ballaré *et al.*, 1995).

La región del rojo de lámparas fluorescentes juega un papel importante en la regulación de la tasa de desarrollo, promoviéndola independientemente del fotoperiodismo y vernalización (Kasajima *et al.*, 2007). De acuerdo con esto, esperamos que las lámparas TL5 produzcan un mejor desarrollo en nuestras plantas. Pero la combinación de fluorescentes y LED color azul y rojo, parece ser ventajosa para plantas jóvenes, sobre todo en luz continua como fue reportado por Homma *et al.* (2009) en *Camellia sinensis* L, ya que aumenta la acumulación de materia seca.

Con respecto a la banda espectral del rojo lejano (FR), todas nuestras lámparas presentan un valor mayor del reportado por Sato *et al.* (2009) donde el uso de luz roja ($>0.7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) y la luz continua promovió una alta producción de *Eustoma grandiflorum* en Japón. La luz del FR (700-800 nm), cuando es aportada como suplemento, reduce los síntomas de daño en las hojas de tomate causados por la luz blanca (Globig *et al.*, 1997). En concordancia con esto, esperamos que las lámparas TL5 produzcan menor daño a las plantas que las otras fuentes de iluminación, aunque el control del reparto de biomasa entre raíz y partes aéreas, longitud de los peciolo y la morfología foliar dependen del balance espectral rojo/rojo lejano (R:FR) y del contenido relativo de luz azul respecto a la roja B:R (Kasperbauer y Hunt, 1990; Benavides, 1998). Por otro lado, la tasa respiratoria y la acumulación de carbohidratos no estructurales dependen del enriquecimiento relativo de luz roja con respecto al azul o UV (Kowallik, 1982; Britz y Adamse, 1994).

El efecto de las lámparas TL5, se espera que sea importante ya que los fitocromos que también son receptores de las bandas del R y FR, están relacionados con la organogénesis, la fotomorfogénesis, la adaptación a la longitud del fotoperiodo y el ajuste frente a las condiciones cambiantes de irradiancia (Deng, 1994).

Siendo PAR la radiación que activa la tasa de fotosíntesis y la formación de órganos de almacenamiento, mayor biomasa y mayor peso de las raíces, se espera de las lámparas fluorescentes estándares, y en concordancia con Akira *et al.* (1988), que incrementen la biomasa de ambas especies por su alta radiación PAR.

NIR es la radiación del infrarrojo cercano que se relaciona con la conductancia estomática independientemente de la temperatura de la hoja, favoreciendo la estimulación de la fotosíntesis y la transpiración en las hojas (Pieruschka *et al.*, 2010). De acuerdo con Pieruschka, se espera que las lámparas TL5 no produzcan un exceso de transpiración y pérdida de agua, sino que favorezcan la fotosíntesis.

Nuestras plantas están creciendo en condiciones controladas por medio de una cámara de cultivo equipada con fluorescentes, método descrito anteriormente. En nuestros tratamientos lumínicos, los ratios R:FR son superiores a 4.6, independientemente de la radiación PAR que se considera baja en relación con la luz natural. En concordancia con Kurepin *et al.* (2007), encontramos decoloración en las plantas debido a la combinación de baja PAR y alto ratio R:FR en todos los tratamientos, especialmente en el de fluorescentes estándares enriquecidos con LEDs.

1. 2. Evaluación de la biomasa

No se encontraron diferencias significativas para los tratamientos en peso fresco de los diferentes tejidos, tanto en *D. compacta* como en *F. verschaffeltii* (Fig. 53 a). Respecto al peso en seco total, sí se encontraron diferencias significativas en ambas especies (Fig. 53 b). Son los fluorescentes estándares y los de alta eficiencia los que han producido mayor biomasa debido a su valor en radiación PAR, en concordancia con Akira *et al.* (1988).

Los porcentajes de los pesos de raíces, tallo y hojas para ambas especies se presentan en las figuras 54 a y b. En *D. compacta* (Fig. 54 a) destaca el % en peso seco de hoja que indica un importante desarrollo del tejido fotosintético y en especial, en el tratamiento lumínico enriquecido en R y B con LEDs. Este resultado está en concordancia con Homma *et al.* (2009), dicha combinación lumínica ha aumentado la materia seca en el tejido fotosintético bajo luz continua.

Las lámparas TL5 son las siguientes en proporcionar una tasa de desarrollo apropiada, gracias al aporte en R (Kasajima *et al.*, 2007), y estimulación de la fotosíntesis por la radiación NIR (Pieruschka *et al.*, 2010), ya que incrementa la temperatura de las hojas que influye sobre el metabolismo del carbono (acumulación de

almidón, sacarosa, glucosa y fructosa). En *F. verschaffeltii* (Fig. 54 b) destaca el % en peso seco de raíz obtenido en el tratamiento lumínico TLD+LEDs.

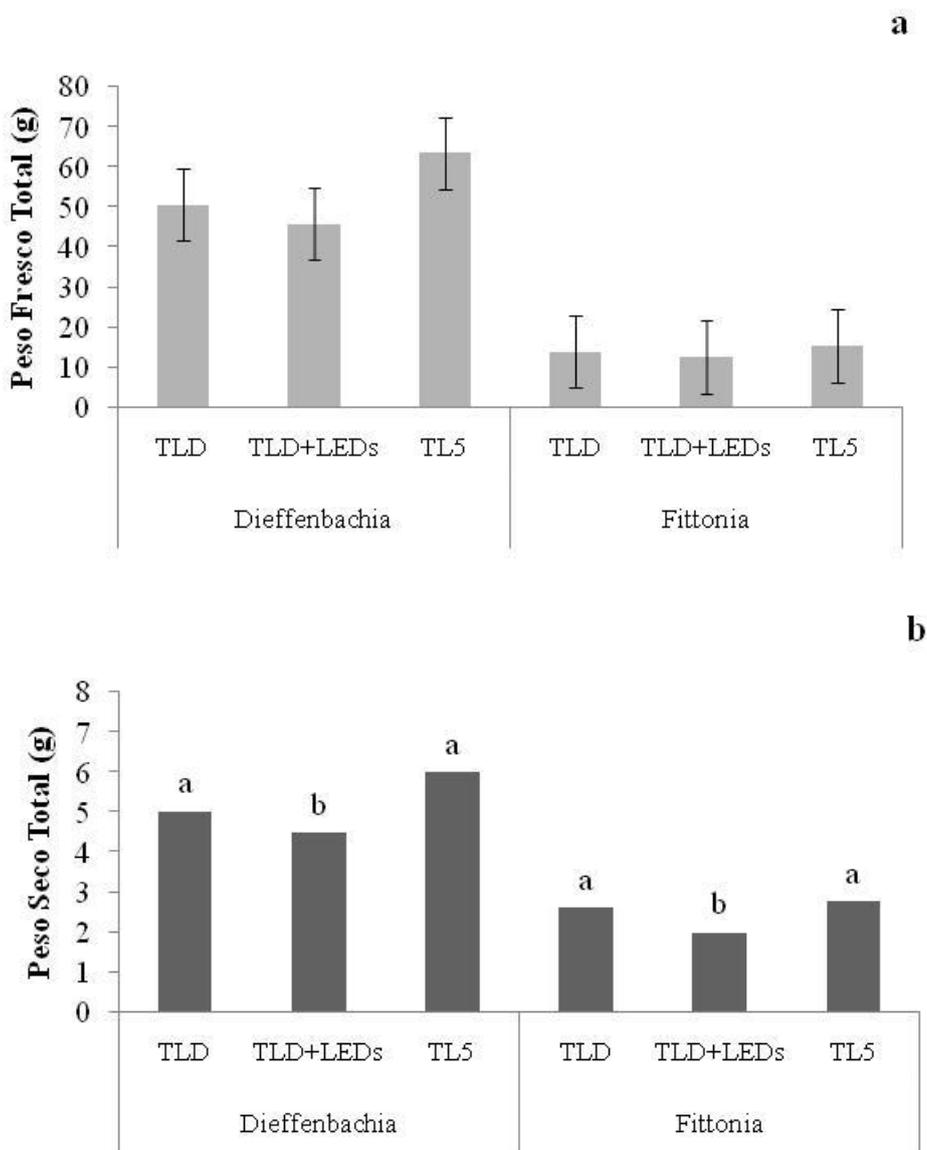


Figura 53. Peso fresco total (a) y peso seco total (b) de *D. compacta* y *F. verschaffeltii* tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5. Las barras de error indican un SE de la media, y valores con igual letra implican no diferencias significativas basadas en el test de Tukey $p=0.05$

El reparto de biomasa entre raíz y parte aérea y la morfología foliar se debe al balance espectral R:FR (con valor máximo entre los tres tratamientos, 17.65) y del contenido relativo de luz azul respecto a la roja B:R (el más equilibrado, 1) (Kasperbauer y Hunt, 1990; Benavides, 1998).

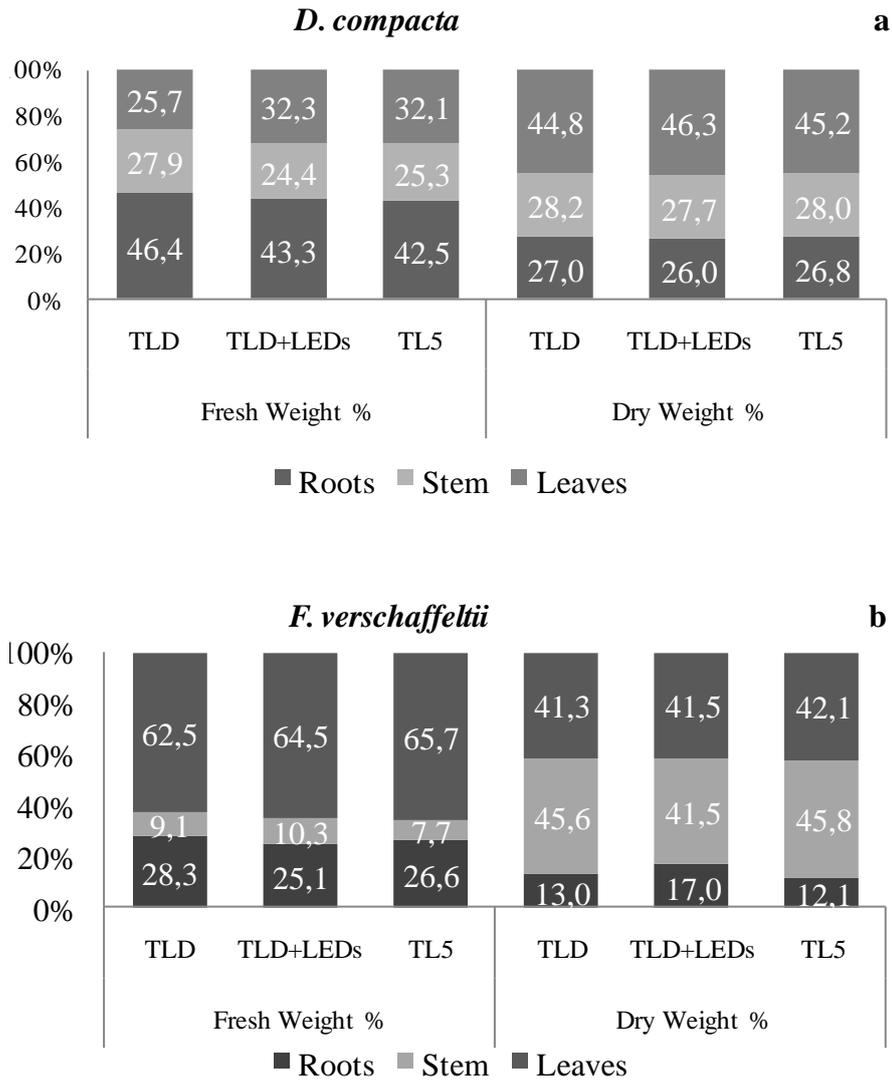


Figura 54. Pesos de las particiones en % de *D. compacta* (a) y *F. verschaffeltii* (b) tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5. (Fresh weight: peso fresco; dry weight: peso seco; roots: raíces; stem: tallo; leaves: hojas)

1. 3. AIA y el desarrollo de la planta

La radiación PAR suministrada en bajos niveles combinada con un alto ratio R:FR, presenta diferencias significativas (Fig. 55) sobre ácido 3-indol-acético (AIA) (Kurepin *et al.*, 2007). Los fluorescentes enriquecidos en rojo y azul proporcionan a *D. compacta* mayor capacidad de síntesis de auxina. Esto puede indicar que esta especie es sensible a la proporción que hay entre la luz rojo y azul (B:R = 1) proporcionada por la fuente luminosa, junto con UV y NIR. Los efectos de estas regiones espectrales favorecen el desarrollo celular de la planta produciéndose un transporte polar desde las

hojas (lugar de síntesis) hasta las raíces (Mapelli *et al.*, 1978) y proporciona mejor supervivencia en plantas jóvenes (Geßner *et al.*, 1999; Günes, 2000).

En *F. verschaffeltii*, son los fluorescentes TL5 los que inducen a la planta a aumentar su concentración en auxina; TLD+LEDs produjo bajas concentraciones de AIA que se relaciona con el mayor peso seco de las raíces. Esto puede ser debido a la radiación FR aportada por esta fuente luminosa. FR produjo un aumento de AIA en el entrenudo tercero de plántulas de *P. sativum* (Behringer y Davies, 1992).

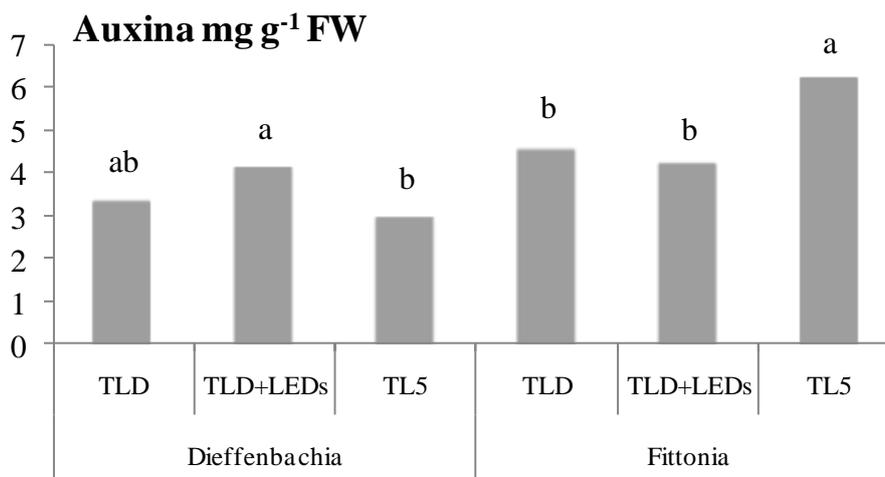


Figura 55. Ácido 3-indol-acético (AIA), niveles en hojas tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5. Los valores medios con la misma letra no difieren significativamente según la prueba de comparación múltiple de Tukey a $p=0.05$. FW, peso fresco

1. 4. Prolina en el desarrollo de la planta

Los distintos tratamientos lumínicos no han producido efectos significativos (NS) en la producción de prolina en hoja, tanto en *D. compacta* como en *F. verschaffeltii* (Fig. 56). No obstante, ambas especies son diferentes en la capacidad de producción. *F. verschaffeltii* produce una gran cantidad de prolina en comparación a *D. compacta*. Los contenidos de prolina encontrados en hojas de *Pistia stratiotes L.* (de la misma familia, *Araceae*) fueron $0.80 \mu\text{g g}^{-1}$ en peso fresco, según Singh y Pandey (2011), valor con el que podemos establecer un nivel de estrés lumínico y producción de prolina.

Aunque la radiación PAR sea baja, la continua iluminación puede producir un efecto estresante en *F. verschaffeltii*. En general, podemos considerar que los tilacoides

están generando varias formas activas de oxígeno como $O_2^{\cdot -}$ (ion radical superóxido), OH^{\cdot} (radical hidroxilo), 1O_2 (singlete oxígeno) y H_2O_2 (peróxido de hidrógeno) (Halliwell y Gutteridge, 1986) que en concordancia con Bose y Chatterjee (1993) producen un efecto peroxidativo sobre las membranas. Es por ello que *Fittonia* podría estar generando más prolina como prevención del daño ocasionado a las membranas tilacoidales (Alia *et al.*, 1997) por la luz. De nuevo, las lámparas fluorescentes estándares enriquecidas con LEDs en rojo y azul, producen menor estrés en ambas especies, pero especialmente en *F. verschaffeltii*.

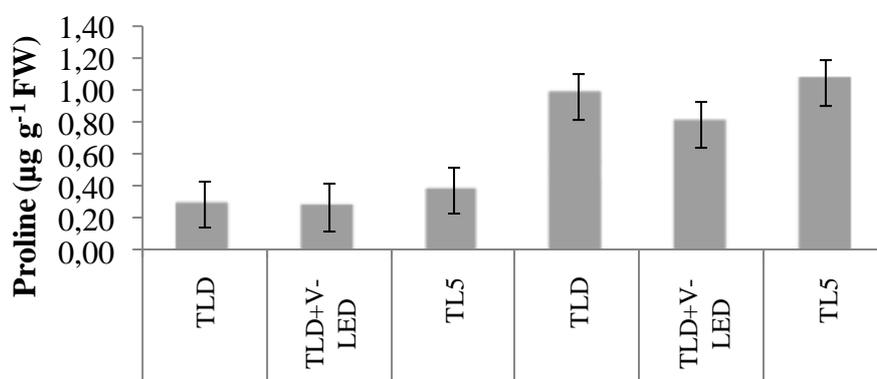


Figura 56. Niveles de prolina en hojas tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial de baja PAR aportada por fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5. Las barras de error indican un SE de la media y la media de los valores con la misma letra no difieren significativamente según la prueba de comparación múltiple de Tukey a $p=0.05$.FW, peso fresco

1. 5. Carbohidratos totales: azúcares reductores y almidón

La asimilación fotosintética del carbono sólo se produce bajo la acción lumínica, pero el crecimiento y el mantenimiento de las plantas requiere carbono durante todo el ciclo día-noche (Walter *et al.*, 2002; Reddy *et al.*, 2004; Walter y Schurr, 2005; Nozue y Maloof, 2006). En *Arabidopsis* (Caspar *et al.*, 1985; Gibon *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2005) y muchas otras especies de plantas (Geiger y Servaites, 1994; Geiger *et al.*, 2000), los productos de carbono fotosintético por la asimilación de la luz se dividen entre sacarosa (inmediatamente disponible para el crecimiento) y el almidón, que se acumula en las hojas durante el día. Por la noche, el almidón se degrada para producir sacarosa (Smith y Stitt, 2007).

Observamos que en ambas especies la acumulación de almidón en hojas es superior a los azúcares. Esto puede ser debido al uso de luz continua, por lo que no se degrada el almidón y queda acumulado para cuando sea necesario en el crecimiento. No obstante, la producción de carbohidratos se produce de forma inversa entre las especies, habiendo diferencias significativas entre tratamientos lumínicos (Fig. 57).

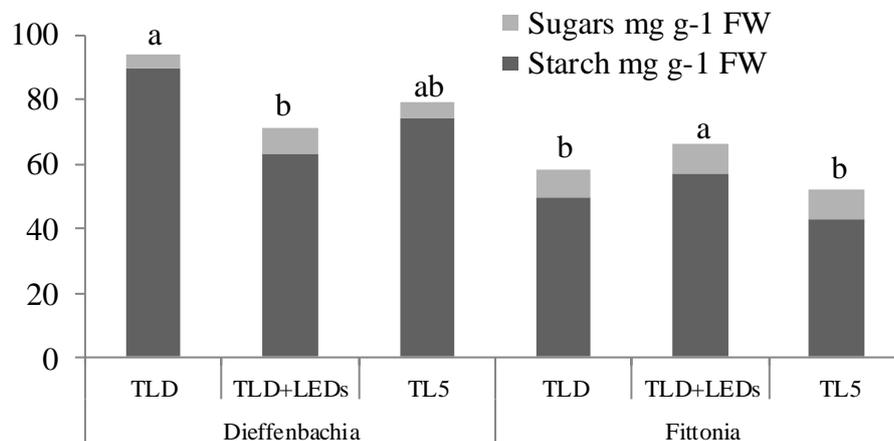


Figura 57. Contenidos en hoja de almidón y azúcares (mg·g⁻¹ FW) en *D. compacta* y *F. verschaffeltii* tras 59 días de crecimiento bajo iluminación artificial (fluorescentes estándares TLD, fluorescentes estándares TLD con LEDs y fluorescentes de alta eficiencia TL5). Las plantas crecieron sin ciclo día-noche, bajo constante iluminación. Los valores medios con la misma letra no difieren significativamente según la prueba de comparación múltiple de Tukey a p=0.05. FW, peso fresco

2. Clorofilas y carotenos bajo iluminación artificial en *Dieffenbachia compacta* y *Fittonia verschaffeltii*

D. compacta presenta diferencias significativas en la concentración de clorofilas A (Chl a), donde el tratamiento con fluorescentes TLD enriquecidos en R y B gracias a los LEDs produjo la mayor concentración (Tabla 31).

D. compacta presenta diferencias significativas en la concentración de clorofilas B (Chl b), donde el tratamiento con fluorescentes TLD enriquecido en R y B procedente de LEDs produjo la mayor concentración. En *Fittonia*, es el tratamiento TL5 el que produce significativamente mayor concentración de estas clorofilas.

F. verschaffeltii presenta diferencias significativas en la concentración de carotenos, donde el tratamiento con fluorescentes TL5 produjo la mayor concentración.

La actividad de absorción de fotones de clorofilas A y B, carotenos y otros pigmentos, se restringe a diferentes regiones del espectro. Por ello, es interesante

estudiar cómo las fuentes de luz usadas en nuestros tratamientos activan estas sustancias. Los resultados obtenidos a partir de nuestros datos se presentan en las figuras 58, 59 y 60.

Tabla 31. Niveles de clorofilas y pigmentos encontrados en *D. compacta* y *F. verschaffeltii* bajo tratamiento continuo de luz artificial de diferentes fuentes de luz: fluorescentes estándares (TLD), fluorescentes estándares enriquecidos en R y B con LEDs (TLD+LEDs), fluorescentes de alta eficacia (TL5)

Clorofilas y carotenos (mg por 100 g FW)				
Especie vegetal	Lámparas	Chl a	Chl b	Car
Dieffenbachia	TLD	85.33 b	30.76 b	16.13 a
	TLD+LEDs	106.68 a	51.54 a	18.10 a
	TL5	101.21 a	44.52 a	13.26 a
Fittonia	TLD	57.97 ab	31.73 a	8.42 b
	TLD+LEDs	53.33 b	25.09 a	9.10 b
	TL5	63.63 a	33.10 a	10.78 a

Chl a (clorofila A); *Chl b* (clorofila B); *Car* (carotenos)

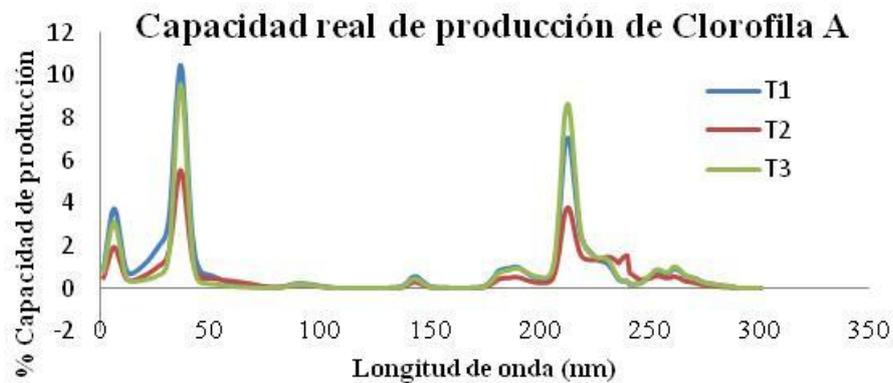


Figura 58. Capacidad de producción en % de Clorofila A por las lámparas TLD (T1), TLD+LEDs (T2) y TL5 (T3)

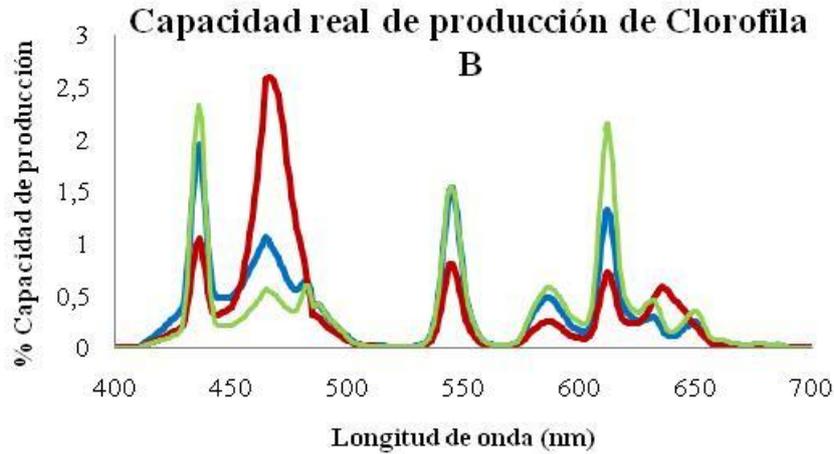


Figura 59. Capacidad de producción en % de Clorofila B por las lámparas TLD (T1), TLD+LEDs (T2) y TL5 (T3). Los colores de línea coinciden con los tratamientos T1, T2 y T3 de la figura 58

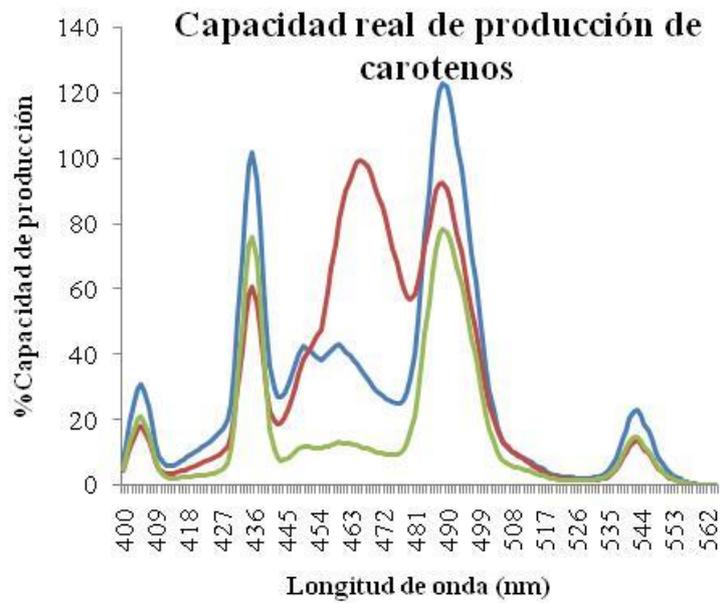


Figura 60. Capacidad de producción en % de carotenos por las lámparas TLD (T1), TLD+LEDs (T2) y TL5 (T3). Los colores de línea coinciden con los tratamientos T1, T2 y T3 de la figura 58

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que:

1. El uso de iluminación artificial en empresas agrícolas de la provincia de Almería se reduce a semilleros hortícolas (cámaras de germinación e injerto) y viveros de planta ornamental. No encontrándose un nivel de iluminación ni diseño homogéneo.
2. Las simulaciones lumínicas con el software Dialux han sido útiles para tener referencias sobre la instalación de iluminación (número de luminarias-lámparas, disposición y distribución luminosa) que se desea conseguir en un local (ajardinamiento de interior), cámara de cultivo o mesa de ensayo. Pero con respecto a LED, al no incluirse todos los elementos del mercado, las simulaciones no son fieles a la realidad o necesidades del cliente.
3. Los datos de radiación obtenidos con espectrorradiómetro indican que el color azul de los LEDs mejora la calidad espectral de las lámparas TLD y CF, mientras que en la región del rojo o rojo lejano no hay mejora en las TLD ya que la λ de emisión en rojo de lámparas y LEDs se solapan. No obstante, en lámparas CF presentan una mejor distribución espectral de 630-650 nm debido a los LEDs rojos.
4. Las plantas injertadas de tomate mostraron un adecuado crecimiento de las raíces y de tallo y un contenido de humedad adecuado con el tratamiento de lámparas fluorescentes estándar (TLD). TLD genera un nivel más bajo de prolina y un nivel alto de azúcar en plantas injertadas, relacionados con la radiación total. TLD proporciona siempre un valor inferior de la relación PAR:NIR y mayor de R:FR.
5. En plántulas de tomate, los cultivares estudiados no presentan el mismo comportamiento a los tratamientos de luz, ya que:
 - La radiación que se aplica con B-LEDs tiene un punto de compensación que no es suficiente para la supervivencia de los cultivares de Atlético, Rambo, Montenegro, Prodigy, Zayno y Lynna.

- Las fluorescentes de alta eficacia (TL5) mejoran los siguientes parámetros: RDW, TDW, TDW:TFW, y LSDW:RDW. También producen mayor biomasa aunque las relaciones (R+B):FR y R:FR generan menor biomasa en hojas (evasión de sombra). También producen mayor endurecimiento, que asegura la supervivencia de la planta al trasplante.

- La concentración de auxinas es sensible a los tratamientos de luz aplicados. Bajo TL5 se presenta la mayor concentración de auxinas en todos los cultivares, lo que podría estar relacionado con una baja proporción R:FR, y la diferente sensibilidad de los cultivares a los rayos UV y fracción B. Se observó una correlación significativa entre la concentración de auxina producida y TDW.

- La concentración de prolina en hoja depende de la variedad de tomate y la intensidad del estrés producido por el tipo de iluminación. Se establecieron dos grupos de cultivares: Grupo 1 ('M_O', 'P', 'Z' y 'L') con una correlación positiva en R, FR, PAR, NIR, TOTAL y negativa en la banda del azul, y el Grupo 2 con el comportamiento opuesto, es decir, una correlación negativa a la radiación UV, R, FR, PAR, TOTAL, NIR y positiva en la banda del azul ('I', 'S', 'A', 'D', 'C', 'R', 'A_N', 'C_{ON}', 'V', 'B' y 'M_Y').

- Respecto a la síntesis de TCHs totales hay dos efectos de luz simultáneos: a) mayor biosíntesis debido a PAR (ej. TL5) y b) aumento de almidón y disminución de azúcares debido a R:FR (ej. TLD). Los cultivares que responden al primer efecto son 'I', 'S', 'M_Y', 'M_O', 'A', 'P' y 'Z'. Los que responden al segundo efecto son 'D', 'R', 'C', 'A_N', 'C_{ON}', 'V', 'B' y 'L'.

- La extracción de nutrientes N, P y K en plántulas de tomate varía entre cultivares y es sensible a la calidad de luz recibida y puede relacionarse con los ratios B:R, B:FR y R:FR. De los elementos estudiados el K se modifica en mayor número de variedades. Encontramos una relación hiperbólica entre N, P y la biomasa bajo diferentes fuentes de luz artificial.

6. Fluorescentes TL5 se consideran fuentes de luz adecuadas para *F. verschaffeltii*, tanto en cantidad como en calidad lumínica. Producen más auxinas, más carotenos y más clorofila B. Fluorescentes estándar TLD, enriquecidos en R y B (mezcla violeta) con sistemas LEDs, modificaron la producción de auxinas, clorofilas A y B de *D. compacta*.
7. Se puede calcular y representar, en un sistema de iluminación artificial, la capacidad de absorción de los distintos pigmentos vegetales en base a los espectros de absorción de cada pigmento y los espectros del sistema lumínico en unas condiciones determinadas previamente.

CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Los puntos de interés derivados del presente estudio que podrían investigarse más a fondo son los siguientes:

- ✓ Nuevas fuentes de luz, concretamente LEDs, para incorporar a sistemas de producción agrícola, que mejoren la calidad y ayuden a diversificar el mercado agrícola en la provincia de Almería.
- ✓ Aplicación real de un sistema solar fotovoltaico capaz de alimentar una cámara de germinación de mayor producción y dimensiones de las estudiadas en este trabajo.
- ✓ Iluminación artificial en otros injertos/plántulas de hortícolas típicas del área mediterránea para mejorar su calidad.
- ✓ Evaluación de la calidad espectral necesaria en otras especies de plantas ornamentales y flor cortada de típica producción en Almería, a través de análisis fisiológicos.
- ✓ Efectos sobre la calidad y duración de productos hortofrutícolas cuando se someten a fuentes de luz (fluorescentes y LEDs) en cámaras de conservación y almacenaje.

CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ábrahám, E., G. Rigó, G. Székely, R. Nagy, C. Koncz y L. Szabados. 2003. Light-dependent induction of proline biosynthesis by abscisic acid and salt stress is inhibited by brassinosteroid in *Arabidopsis*. *Plant Mol. Biol.* 51(3):363-372.
- Acosta Muñoz, A. 2005. La técnica del injerto en plantas hortícolas. *Horticom Extra 2005-Viveros*.
- Agencia Andaluza de la Energía. 2007. *Energía Solar Fotovoltaica Tema 15*. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa.
- Akbari, G., S.A.M.M. Sanavy y S. Yousefzadeh. 2007. Effect of auxin and salt stress (NaCl) on seed germination of wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Pak. J. Biol. Sci.* 10:2557-2561.
- Akira, I., N. Shigeki, K. Yoshiaki y Y. Kazutoshi. 1988. Effect of photoperiod, light intensity and CO₂ concentration of photosynthesis in turnip. *Environment Control in Biology* 26(3):113-117 (in Japanese, English abstr.).
- Alia, P. y P. Saradhi. 1993. Suppression in mitochondrial electron transport is the prime cause behind stress induced proline accumulation. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 193:54-58.
- Alia, P., P. Mohanty y J. Matysik. 2001. Effect of proline on the production of singlet oxygen. *Amino Acids* 21:195-200.
- Alia, P., P. Saradhi y P. Mohanty. 1991. Proline enhances primary photochemical activities in isolated thylakoid membranes of *Brassica juncea* by arresting photoinhibition damage, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 181:1238-1244.
- Alia, P., P. Pardha Saradhi, P. Mohanty. 1993. Proline in relation to free radical production in seedlings of *Brassica juncea* raised under sodium chloride stress. *Plant Soil* 156:497-500.
- Alia, P., P. Pardha Saradhi, P. Mohanty. 1997. Involvement of proline in protecting thylakoid membranes against free radical-induced photodamage. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 38:253-257.
- Allen, M.S. y D. Rudich. 1978. Genetic potential for overcoming physiological limitations on adaptability, yield, and quality in the tomato. *Hort. Sci.* 13(6):673-678.
- Almansa, E. M., R.M. Chica, A. Espín y M.T. Lao. 2007. Estudio sobre la utilización de luz artificial complementaria en sistemas de producción de invernaderos en la provincia de Almería. IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de AgroIngeniería. I.S.B.N: 978-84-690-7894-5.
- Almansa, E. M., R.M. Chica, A. Espín y M.T. Lao. 2011. Changes in endogenous auxin concentration in varieties of tomato seedlings under artificial light. *Hortscience* 46(5):698-704.
- Amal, A., Z. Dina y M. Abd Elghafar. 2006. Metabolic responses of soybean (*Glycine max*) plant to increasing UV (A+B) radiation. *Assiut. Univ. J. Bot.* 35(2):107-125.

- Amini, F. y A. A. Ehsanpour. 2005. Soluble proteins, proline, carbohydrates and Na⁺/K⁺ changes in two tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars under in vitro Salt Stress. *Amer. J. Biochem. and Biotechnol.* 1(4):212-216.
- Alpi, A. y F. Tognoni. 1987. Cultivo en Invernadero. 2^a edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. p 123-131.
- Alves de Alvarenga, A., E. Mauro de Castro, E. De Castro Lima Junior y M. M. Magalhães. 2003. Effects of different light levels on the initial growth and photosynthesis of *Croton urucurana* Baill. in southeastern Brazil. *Sociedad de Investigacoes Florestais.* 27:53-57.
- Amal, A., Z. Dina y M. Abd Elghafar. 2006. Metabolic responses of soybean (*Glycine max*) plant to increasing UV (A+B) radiation. *Assiut. Univ. J. Bot.* 35(2):107-125.
- Anuario de estadística. 2009. Estadísticas del Medio Rural. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino.
- Aphalo, P. J. y T. Lehto. 1997. Effects of light quality on growth and N accumulation in birch seedlings. *Tree Physiology* 17:125-132.
- Arny, T. T. 2005. Astronomy homepage. <http://www.mhhe.com/physsci/astronomy/arny/instructor/graphics/ch03/0305.jpg>
- Armstrong, M. J. y Ernest A. Kirkby. 1979. Estimation of Potassium Recirculation in Tomato Plants by Comparison of the Rates of Potassium and Calcium Accumulation in the Tops with Their Fluxes in the Xylem Stream. *Plant Physiol.* 63:1143-1148.
- Arora, S. y P. Saradhi. 1995. Light-induced enhancement in proline levels in *Vigna radiata* exposes to environmental stresses. *Aust. J. Plant Physiol.* 22:383-386.
- Arora, S. y P. Saradhi. 2002. Light Induced Enhancement in Proline Levels under Stress is regulated by Non-Photosynthetic Events. *Biologia Plantarum.* 45(4):529-632.
- ASIF. 2007. Asociación de la industria fotovoltaica. Energía solar fotovoltaica. Gráficas Monedero, S.L.
- Ashrafijou, M., S. A. Sadat Noori, A. Izadi Darbandi y S. Saghafi. 2010. Effect of salinity and radiation on proline accumulation in seeds of canola (*Brassica napus* L.). *Plant Soil Environ.* 56(7):312-317.
- Aspinall, D. y L. G. Paleg. 1981. Proline accumulation: physiological aspects. In L.G. Paleg and D. Aspinall (eds). *The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants*. Academic Press. NewYork, pp. 206-242.
- Atherton, J. G. y J. Rudich. 1987. *Tomato Crop: A Scientific Basis for Improvement*. Chapman & Hall, London.
- Atkinson, D. E. 1977. *Cellular energy metabolism and its regulation*. Academic Press, N.Y., USA.
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 2000. *Fisiología y Bioquímica vegetal*. Interamericana. McGraw-Hill.

- Baille, A., M. M. González-Real, J. C. López, J. Cabrera, y J. Pérez-Parra. 2003. Characterization of the Solar Diffuse Component under "Parral" Plastic Greenhouses. Proc. 6th IS on Protected Cult. Acta Hort 614, ISHS. 341-346.
- Ballaré, C. L., A. L. Scopel y R. A. Sánchez. 1991. On the opportunity cost of the photosynthate invested in stem elongation reactions mediated by phytochrome. *Oecologia* 86:561-567.
- Ballaré, C. L., A. L. Scopel y R. A. Sánchez. 1995. Plant Photomorphogenesis in Canopies, Crop Growth and Yield. *Hort Science* 30:1172-1181.
- Ballaré, C. L. y J. J. Casal. 2000. Light signals perceived by crop and weed plants. *Field Crops Research* 67:149-160.
- Barabas, K. N., T. Szegletes Zsol, A. Pestenacz, K. Fülöp and L. Erdei. 1998. Effects of excess UV-B irradiation on the antioxidant defense mechanisms in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *J. Plant Physiol.* 153:146-153.
- Barceló, J., G. Nicolás, B. Sabater y R. Sánchez Tamés. 2000. Fisiología vegetal. Ed. Pirámide, Madrid. 9ª Ed.
- Barta, D. J., T. W. Tibbits, R. J. Bula and R. C Morrow. 1992. Evaluation of light emitting diode characteristics for space-based plant irradiation source. *Advances in Space Research* 12:141-149.
- Bartsur, A., J. Rudich and B. Bravdo. 1985. High temperature effects on CO₂ exchange in heat tolerant and sensitive tomatoes. *J. Amer. Hort. Sci.* 110(4):582-586.
- Baruch, Z., A. B. Hernández y M. G. Montilla. 1989. Dinámica del crecimiento, fenología y repartición de biomasa de gramíneas nativo e introducido de una sabana tropical. *Ecotrópicos* 2:1-13.
- Batschauer, A. 1999. Light perception in higher plants. *Cell Mol. Life Sci.* 55:153-165.
- Behringer F. J. y P. J. Davies. 1992. Indole-3-acetic acid levels after phytochrome-mediated changes in the stem elongation rate of dark-grown and light-grown *Pisum* seedlings. *Planta* 188:85-92.
- Benavides, A. 1998. Modificación de los Ambientes Espectrales de Crecimiento y su Efecto Sobre el Comportamiento Fisiológico y Productividad de *Lactuca sativa* L. y *Spinacia oleracea* L. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. [In Spanish]
- Ben Zioni, A., Y. Vaadia y S. H. Lips. 1971. Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate reduction products in the shoot. *Physiol Plant* 24:288-290.
- Berroteran, J. L. y L. García. 1986. Crecimiento y producción de biomasa de *Andropogon gayanus* Kunth en el periodo de establecimiento en sabanas de Venezuela. *Pasturas Tropicales* 8(3):1-8.
- Best, E. P. H., G. A. Kiker y W. A. Boyd. 2004. A Simulation Model on the Competition for Light of Meadow-forming and Canopy-forming Aquatic Macrophytes at High and Low Nutrient Availability. Aquatic Plant Control. Research Program. ERDC/EL TR-04-14. September 2004. Prepared for U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC. 20314-1000 under INP Work Unit 33308.

- Bethlenfalvay, G. J. y D. A. Phillips. 1977. Effect of Light Intensity on Efficiency of Carbon Dioxide and Nitrogen Reduction in *Pisum sativum* L. *Plant Physiol.* 60:868-871.
- Biurrun, R., J. Sanz de Galdeano, J. A. Del Castillo, A. Uríbarri, G. Aguado, S. Sádaba. 2007. Tomate en Invernadero: Control integrado. Navarra Agraria, Invernaderos (Mayo-junio 2007).
- Boerjan W., M-T. Cervera, M. Delarue, T. Beeckman, W. Dewitte, C. Bellini, M. Caboche, H. Van Onckelen, M. Van Montagu, y D. Inze. 1995. Superroot, a Recessive Mutation in Arabidopsis, Confers Auxin Overproduction. *Plant Cell* 7:1405-1419.
- Bohner, J. y F. Bangerth. 1988. Cell number, cell size and hormone levels in semi-isogenic mutants of *Lycopersicon pimpinellifolium* differing in fruit size. *Plant Physiol.* 72:316-320.
- Bose, B. y S. N. Chatterjee. 1993. Effect of UV-A on the linolenic acid micelles. *Radiat. Res.* 133:340-344.
- Bouly, J. P., E. Schleicher, M. Dionisio-sese, F. Vandebussche, D. Van Der Straeten, N. Bakrim, S. Meier, A. Batschauer, P. Galland, R. Bittl y M. Ahmad. 2007. Cryptochrome blue-light photoreceptors are activated through interconversion of flavin redox states. *J. Biol. Chem.* 282: 9383-9391.
- Bretones, F. 1999. El enarenado. En técnicas de producción de frutas y hortalizas de cultivos protegidos. Vol. I:103-111. Ed. Caja Rural de Almería.
- Briggs, W. R. 1963. Red light, auxin relationships and the phototropic response of corn and oat coleoptiles. *Amer. J. Botany* 50(2):196-207.
- Briggs, W. R., y M. A. Olney. 2001. Photoreceptors in plant photomorphogenesis to date: Five phytochromes, two cryptochromes, one phototropin, and one superchrome. *Plant Physiol.* 125:85-88.
- Britz, S. J. y P. Adamse. 1994. UV-B Induced Increase in Specific Leaf Weight of Cucumber as a Consequence of Increased Starch Content. *Photochem. Photobiol.* 60:116-119.
- Britz, S. J. y J. C. Sager. 1990. Photomorphogenesis and photoassimilation in soybean and sorghum grown under broad spectrum or blue-deficient light sources. *Plant Physiol.* 94:448-454.
- Buchanan, B. B., W. Gruissem y R. L. Jones. 2000. *Biochemistry & Molecular biology of Plants.* American Society of Plant Physiologists.
- Buiten, H. J. y J. G. P. W. Clevers. 1993. *Land observation by remote sensing: theory and applications.* Gordon and Breach Science Publishers. The Netherlands.
- Buitrago, N. y M. Ramírez. 2003. Enraizamiento de acodos aéreos del guayabo (*Psidium guajava* L.) con ácido naftaleno acético. *Memorias del XI Congreso Venezolano de Botánica.* Mérida, Venezuela.
- Bula, R. J., R. C. Morrow, T. W. Tibbits, D. J. Barta, R. W. Ignatius y T. S. Martin. 1991. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience* 26:203-205.

- Buldewo, S. y Y. F. Jaufeerally-Fakim. 2002. Isolation of clean and PCR-Amplifiable DNA from *Anthurium andreaeanum*. Plant Molecular Biology Reporter. International Society for Plant Molecular Biology. 20:71a-71g.
- Bunce, J. A. y R. C. Sicher. 2003. Daily irradiance and feedback inhibition of photosynthesis at elevated carbon dioxide in Brassica oleracea. Photosynthetica 41:481-488.
- Camacho Ferre, F. y E. J. Fernández Rodríguez. 1997. El injerto de hortalizas en semilleros de Almería. Revista Terralia, nº 12. Eds. Agrotécnicas, S.L.
- Campbell N. A., L. G. Mitchell y J. B. Reece. 2001. Biology: concepts & connections. 3rd ed. Pearson Education, Mexico.
- Campbell N. A. y J. B. Reece. 2007. Biology. 7th ed. Editorial Médica Panamericana. Madrid
- Cao, H. 2003. The distribution of calcium oxalate crystals in genus *dieffenbachia schott* and the relationship between environmental factors and crystal quantity and quality. Tesis doctoral. University of Florida
- Carbonell, X. 1995. Seed, seedling and pattern. Horticulture 106.
- Carlettia, P., A. Masia, A. Wonischb, D. Grillb, M. Tauszb y M. Ferretti. 2003. Changes in antioxidant and pigment pool dimensions in UV-B irradiated maize seedlings. Environ. Exp. Bot. 50(2):149-157.
- Cascón Pérez, G. 2006. Artificial lighting for natural life: Plant lighting from. OSRAM GmbH.
- Caspar, T., S.C. Huber y C.R. Somerville. 1985. Alterations in growth, photosynthesis and respiration in a starch-deficient mutant of *Arabidopsis thaliana* L Heynh deficient in chloroplast phosphoglucomutase. Plant Physiology 79:11-17.
- Castilla, N. 2001. La radiación solar en invernadero en la costa mediterránea española. En: Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. Ed. Cajamar, España. 35-48.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico, tecnología y manejo. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 37-62; 83-136.
- Castillo, M., Y. Him de Fréitez y N. Hernández de Bernal. 2005. Effect of AIB when propagating azahar of India (*Murraya paniculata* (L. Jack) by air layering. Bioagro 17(2):123-126.
- Chaves, L. A. 2003. Estudio nutricional en *Aglaonema commutatum* var. "SilverQueen" en sistema recirculante, PhD Thesis. Almería.
- Christie, J. M. 2007. Phototropin blue-light receptors. Annual Review of Plant Biology 58:21-45.
- Claussen, W. 2005. Proline as a measure of stress in tomato plants. Plant Sci. 168:241-248.
- Cleland, R. 2004. Auxin and cell elongation, p. 204-220. In: J. Davies. (ed). Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action. Kluwer Acad. Pub. Dordrecht, The Netherlands.
- Cobos, J. J. y J. C. López. 1998. Filmes plásticos como material de cubierta de invernadero. Tecnología de invernaderos II: 143-160.

- Coene, T. 1995. The Growing Edge 6(3):66-72.
- Colombo, M. H. y V. Obregón. 2008. Horticultura general: consideraciones de cultivo y manejo. Argentina: Estación Experimental Agropecuaria Bella Vista. pp.85.
- Colomina Figueredo, J. y J. C. Pérez Mesa. 2007. Informe anual del sector agrario en Andalucía 2006: Capítulo III.1: Análisis y estudios sectoriales. IV.1. Breve descripción de la situación interna de la producción y comercialización en Almería. Pp. 316-317.
- Cornillón, P. 1999. Fertirrigation and transplant production. Acta Hort. 487:133-137.
- Cristóbal, A. J., V. I. Cid del Prado, G. P. Sánchez, N. Marbán-Mendoza, L. R. H. Manzanilla y G. Mora-Aguilera. 2001. Nutritional disorders in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) due to infestation by *Nacobbus aberrans*. Nematologica 31:221-228.
- CTE. 2007. Real Decreto 315/2006, BOE n° 74 con fecha 28 de marzo de 2006. Código Técnico De La Edificación Al Alumbrado.
- Daie, J. y W. F. Campbell. 1981. Response of tomato plants to stressful temperatures, Increase in abscisic acid concentrations. Plant Physiol. 67:6-29.
- Dallon, D. 2005. Measurement of water stress: Comparison of reflectance at 970 and 1450 nm. In: Utah State University. Crop Phys. Lab., 1-5.
- De Groot C. C., L. F. M. Marcelis, R. Van den Boogaard, H. Lambers. 2001. Growth and dry-mass partitioning in tomato as affected phosphorus nutrition and light. Plant, Cell and Environment 24:1309-1317.
- De Miguel, A. 1997. Injerto de hortalizas. Ed. Generalitat Valenciana. Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- De Miguel, A. y V. Cebolla. 2005. Unión del injerto. Terralia n° 53.
- De Pablo Valenciano, J. y R. García Torrente. 2007. Informe anual del sector agrario en Andalucía 2006: Capítulo III.1: Análisis y estudios sectoriales. Pasado, presente y futuro de la OCM de frutas y hortalizas: una visión desde Andalucía. Pp. 308-309.
- De Pablo, J. C. y J. C. Pérez Mesa. 2002a, 2004b. Análisis de la problemática del sector productor comercializador almeriense.
- Decoteau, D. R., M. J. Kasperbauer, D. D. Daniels y P. G. Hunt. 1988. Plastic Mulch Color Effects on Reflected Light and Tomato Plant Growth. Scientia Horticulturae, 34:169-175.
- Delauney A. J. y D. P. S. Verma. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. Plant J. 4: 215-223.
- Delauney, A. J. y D. P. S. Verna. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. Plant J. (4):215-223.
- Della Vecchia, P. T. y P. S. Koch. 2000. Tomate longa vida: O que são, como foram desenvolvidos? Horticultura Brasileira, Brasília 18:3-4.

- Demers, D. A. y A. Gosselin. 2002. Growing greenhouse tomato and sweet pepper under supplemental lighting: optimal photoperiod, negative effects of long photoperiod and their causes. *Acta Horticulturae* 580:83-88.
- Demers, D. A., M. Dorais, C. H. Wien y A. Gosselin. 1998. Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants and fruit yields. *Scientia Horticulturae* 74(4):295-306.
- Demir, Y. 2000. Growth and proline content of germinating wheat genotypes under ultraviolet light. *Turk. J. Bot.* 24:67-70.
- Deng, X.-W. 1994. Fresh View of Light Signal Transduction in Plants. *Cell* 76:423-426.
- Devlin, P. F., J. M. Christie y M. J. Terry. 2007. Introduction to Photomorphogenesis: Many hands make light work. *J. of Experimental Botany* 58(12):3071-3077.
- Dhingra, A., D. H. Bies, K. R. Lehner y K. M. Folta. 2006. Green light adjusts the plastid transcriptome during early photomorphogenic development. *Plant Physiology* 142:1256-1266.
- Dijkshoorn, W. 1958. Nitrate accumulation, nitrogen balance and cation-anion ratio during the regrowth of perennial ryegrass. *Neth J Agric Sci* 6:211-221.
- Dinar, M. y J. Rudich. 1985. Effect of heat stress on assimilates partitioning in tomato. *Ann. Bot.* 56:239-248.
- Dole, J. y H. Wilkins. 1999. *Floriculture: Principles and Species*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. pp 40-45.
- Domínguez S., J. Oliet, P. Ruiz, I. Carrasco, J. L. Peñuelas y R. Serrada. 2000. Influencia de la relación N-P-K en el desarrollo en vivero y en campo de planta de *Pinus pinea*. *Actas del Congreso I Simposio del pino piñonero*. 2000. Valladolid. Volumen: 195-202.
- Dorais, M. 2003. The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. *Canadian Greenhouse Conference* October 9.
- Dorais, M., J. Charbonneau y A. Gosselin. 1992. Échanges gazeux de La tomate de serre cultivée sous éclairage d'appoint. *Can. J. Plant Sci.* 73:577-585.
- Dougher, T. A. O. y B. Bugbee. 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue light radiation. *Photochemistry and Photobiology* 73:199-207.
- El Ahmadi, B. y M. S. Allen. 1979. Reproductive responses of heat tolerant tomatoes to high temperatures. *J. Amer. Hort. Sci.* 104(5):686-691.
- Erner, Y. 1989. Citrus fruit set: carbohydrate, hormone, and leaf mineral relationship, p. 233-242. In: C.J. Wright (ed.). *Manipulation of fruiting*. Butterworths, London.
- Espín, A., D. F. Aznar, E. R. Manzano y M. A. Espín. 2009. *Luminotecnia Básica para Ingenieros*.

- Espinosa, F. y P. Argenti. 1990. Estrella africana *Cynodon dactylon*. Fonaiap-Cenaiap, Serie B, N° 12, pp 24.
- Evert, R. F. y S. E. Eichhorn. 1992. Biol. Plant 2. 4th ed. Revertè, Barcelona. Fertilization and grafting contribute to build an integrated production system in a tomato-zucchini.
- Fitter, D. J., P. H. Knapp y J. Warren Wilson. 1980. Stand Structure and Light Penetration. IV. A Sensor for Measuring Photosynthetically Active Radiation. *Journal of Applied Ecology* 17(1):183-193.
- Folta, K. M. 2004. Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition. *Plant Physiology* 135:1407-1416.
- Folta, K. M., M. A. Pontin, G. Karlin-Neumann, R. Bottini y E. P. Spalding. 2003. Genomic and physiological studies of early cryptochrome 1 action demonstrate roles for auxin and gibberellin in the control of hypocotyl growth by blue light. *The Plant Journal* 36:203-214.
- Franco, J. A., J. J. Martínez-Sánchez, J. A. Fernández y S. Bañón. 2006. Selection and nursery production of ornamental plants for landscaping and xerogardening in semi-arid environments. *Journal of horticultural science & biotechnology* 81(1):3-17.
- Franklin, K. A. y G. C. Whitelam. 2005. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Annals of Botany* 96:169-175.
- Fujita, K., M. Okada, K. Lei, J. Ito, K. Ohkura, J. J. Adu-Gyamfy and P. K. Mohapatra. 2003. Effect of P-deficiency on photoassimilate partitioning and rhythmic changes in fruit and stem diameter of tomato (*Lycopersicon esculentum*) during fruit growth. *Journal of Experimental Botany* 54(392): 2519-2528.
- Gaudreau, L., J. Charbonneau, L. Vezina y A. Gosselin. 1994. Photoperiod and PPF influence growth and quality of greenhouse-grown lettuce. *HortScience* 29:1285-1289.
- Geßner, M., H. J. Köhler y N. Christoph. 1999. El "envejecimiento atípico" en el vino VIII. *La Viña y el Vino* 8:264-267.
- Geiger, D. R. y J. C. Servaites. 1994. Diurnal regulation of photosynthetic carbon metabolism in C3 plants. *Annual Review of Plant Physiology* 45:235-256.
- Geiger, D. R., J. C. Servaites y M. A. Fuchs. 2000. Role of starch in carbon translocation and partitioning at the plant level. *Australian Journal of Plant Physiology* 27:571-582.
- Gibon, Y., O. E. Bläsing, N. Palacios-Rojas, D. Pankovic, J. H. Hendriks, J. Fisahn, M. Höhne, M. Gunther y M. Stitt. 2004. Adjustment of diurnal starch turnover to short days, depletion of sugar during the night leads to a temporary inhibition of carbohydrate utilization, accumulation of sugars and post-translational activation of ADP-glucose pyrophosphorylase in the following light period. *Plant Journal* 39:847-862.
- Glime, J. M. 2007. *Physiological Ecology, vol.1. Bryophyte Ecology*. Sponsored by Michigan Technol. Univ. (MTU), Botanical Soc. Amer. (BSA) and Intl. Assn. Bryologists (IAB) published online at <http://www.bryoecol.mtu.edu/>.

- Globig, S., I. Rosen y H. W. Janes. 1997. Continuous light effects on photosynthesis and carbon metabolism in tomato. *Acta Horticulturae* 418:141-152.
- Goykovic, V. y G. Saavedra. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *Idesia* 25(3):47-58.
- Green-Tracewicz, E., E. R. Page y C. J. Swanton. 2011. Shade Avoidance in Soybean Reduces Branching and Increases Plant-to-Plant Variability in Biomass and Yield per Plant. *Weed Science* 59(1):43-49.
- Grierson, D. y A. A. Kader. 1986. Fruit ripening and quality. In: *The Tomato Crop. A Scientific Base for Improvement* (Atherton, J.G. and Rudich, J., eds). Chapman and Hall, London, UK. pp. 241-280.
- Günes, T. 2000. Peroxidase and IAA oxidase activities during rooting in cuttings of three poplar species. *Turk J. Bot.* 24:97-101.
- Güsewell, S., W. Koerselman y J. T. A. Verhoeven. 2003. Biomass N:P Ratios as Indicators of Nutrient Limitation for Plant Populations in Wetlands. *Ecological Applications* 13(2):372-384.
- Hall, D. y K. Rao, 1999. *Photosynthesis: Studies in Biology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp.214.
- Halliwell, B. y J. M. C. Gutteridge. 1986. Iron and free radical reactions: two aspects of antioxidant protection. *Trends Biochem. Sci.* 11:372-375.
- Hanafi, A. y W. H. Schnitzler. 2004. Integrated production and protection in greenhouse tomato in Morocco. *ACTA Horticulturae* 659:323-330.
- Hanks, R. J. 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use, *Agron. J.* 66:660-664.
- Hanson, A. D. y W. D. Hitz. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 33:163-203.
- Hare, P. D. y W. A. Cress. 1997. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regul.* 21:79-102.
- Hare, P. D., W. A. Cress y J. van Staden. 1999. Proline synthesis and degradation: a model system for elucidating stress-related signal transduction. *J. Exp. Bot.* 50:413-434.
- Hartmann, H. T. y D. E. Kester. 1991. Propagación de plantas. Principios y Prácticas. 5ª Edición, Compañía editorial continental, S.A. de C.V Mexico, pp. 366.
- Hartmann, H. A., G. E. Kirsch, J. A. Drewe, M. Tagliatela, R. H. Joho y A. M. Brown. 1991. *Science* 261:942-944.
- Hartmann, H. T. y D. E. Kester. 1983. *Plant Propagation: Principles and Practices*. 4th ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Hartmann, H. T., D. E. Kester, F. T. Davies y R. L. Geneve. 2002. *Plant Propagation: Principles and Practices*. 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

- Hayashi, F., T. Ichino, M. Osanai y K. Wadal. 2000. Oscillation and regulation of proline content by P5CS and ProDH gene expressions in the light/dark cycles in *Arabidopsis thaliana* L. *Plant Cell Physiol.* 41(10):1096-1101.
- Hayward, P. M. 1984. Determination of phytochrome parameters from radiation measurements, p. 159-173. In: H. Smith and M.G. Holmes (eds.). *Techniques in photomorphogenesis*. Academic Press, London.
- Hernández, R. 2002. Naturaleza de la luz. Material didáctico. <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg>.
- Hernández Díaz M. I., M. Chailloux, V. Moreno, A. Ojeda, J. M. Salgado y O. Bruzón. 2009. Relaciones nitrógeno-potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate en suelo Ferralítico Rojo. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 44(5):429-436.
- Heuvelink, E. y M. Dorais. 2005. *Tomatoes: Crop Growth and Yield*. CABI publishing. USA.
- Hideg, E. y I. Vass. 1996. UV-B induced free radical production in plant leaves and isolated thylakoid membranes. *Plant Sci.* 115:251-260.
- Hocking, P. J., y B. T. Steer. 1994. The distribution and identity of assimilates in tomato with special reference to stem reserves. *Annals of Botany* 73:315-325.
- Hogue, E., y G. E. Wilcow y D. J. Cantliffe. 1970. Effect of soil P on phosphate fraction in tomato leaves. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 95:174-176.
- Homma, T., T. Anzai, K. Matsuo, N. Kanemitsu, H. Satoh y H. Hiramoto. 2009. Effect of continuous irradiation of LED light on growth of Young tea plants. In: 6th International Symposium on Light in Horticulture, November 15-19. Tsukuba, Japan, p 121 (Abstr.).
- Horwitz, B. A. 1994. Properties and transducers chains of the UV and the Blue light photoreceptors. p. 327-350. In: R.E. Kendrick, G.H.M. Kronenberg (eds). *Photomorphogenesis in plants*. 2nd ed. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Houborg, R. 2006. Inferences of key environmental and vegetation biophysical controls for use in Regional-scale SVAT Modeling. Copenhagen Univ., Denmark, PhD Diss.
- Hoyos, P. 1990. The last in horticulture seedlings (II). *Horticulture* 54.
- Hoyos, P. 2007. Situación del injerto en horticultura en España: especies, zonas de producción de planta, portainjertos. *Horticultura* ISSN 1132-2950, 199: pp. 12-25.
- Huimin Li, X. Zhigang y T. Canming. 2010. Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets in vitro. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 103:155-163.
- Humberto, F. C. y R. D. Wulff. 2003. Changes in the responses to light quality during ontogeny in *Chenopodium album*. *Can. J. Bot.* 81:152-163.
- ICEX, 2009. Estadísticas de comercio exterior del sector Planta viva y productos de floricultura. www.icex.es

- Inada, K. 1984. Photomorphogenesis: Light and Plant growth. Yokendo, Tokyo.
- Inal, A. 2002. Growth, proline accumulation and ionic relations of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) as influenced by NaCl and Na₂SO₄ salinity. Turk J. Bot. 26:285-290.
- Irigoyen, J. J., D. W. Emerich y M. Sánchez-Díaz. 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. Physiologia Plantarum 84:55-60.
- Ismail, M. R., S. W. Burrageb, H. Tarmizic y M. A. Aziza. 1994. Growth, plant water relations, photosynthesis rate and accumulation of proline in young carambola plants in relation to water stress. Scientia Horticulturae 60(1-2):101-114.
- Jackson, S. D. 2009. Plant responses to photoperiod. New Phytologist 181:517-531.
- Jao, R. C. y W. Fang. 2003. An adjustable light source for photo-phyto related research and young plant production. Applied Engineering in Agricultura. 19(5):601-608.
- Jensen P. J., R. P. Hangarter y M. Estelle. 1998. Auxin Transport is required for Hypocotyl Elongation in Light-Grown but Not Dark-Grown Arabidopsis. Plant Physiol. 116:455-462.
- Jiménez, C. 1997. Luminotecnia: luz, lámparas y luminarias. Ediciones CEAC. Barcelona. p 57, 60, 61, 206-209, 275-282.
- Jones, H. G. 1992. Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology. 2nd ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Jones, J. B. 1999. Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden. 2nd ed. CRC Press. Taylor & Francis Group. pp. 3-16; 19-21.
- Jones, J. B. 2008. Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden. 2nd ed. CRC Press. Taylor & Francis Group. pp. 19-21; 56-60; 341.
- Kasajima, S., N. Inoue, R. Mahmud, K. Fujita y M. Kato. 2007. Effect of light quality on developmental rate of wheat under continuous light at a constant temperature. Plant Production Science 10:286-291.
- Kasperbauer, M. J. 1970. Spectral distribution of light in a tobacco canopy and effects of end-of-day light quality on growth and development. Plant Physiology 47:775-778.
- Kasperbauer, M. J. y J. L. Hamilton. 1984. Chloroplast Structure and Starch Grain Accumulation in Leaves That Received Different Red and Far-Red Levels during Development. Plant Physiol. 74:967-970.
- Kasperbauer, M. J. y D. L. Karlen. 1986. Light-mediated bioregulation of tillering and photosynthate partitioning in wheat. Physiol. Plant., 66:159-163.
- Kasperbauer, M. J. y P. G. Hunt. 1990. Phytochrome Regulation of Morphogenesis in Cotton under Field Conditions. Agron. Abst. 124-125.
- Kasperbauer, M. J. y R. E. Wilkinson, 1995. Mulch surface color affects accumulation of epicuticular wax on developing leaves. Photochem-photobiol. 62:940-944.

- Kavi Kishor, P. B., Z. Hong, G. H. Miao, C. A. A. Hu y D. P. S. Verma. 1995. Over expression of 1-pyrroline-5-carboxylate synthetase increases proline production and confers osmotolerance in transgenic plants. *Plant Physiology* 108:1387-1394.
- Kemp, D. R. y W. M. Blacklow. 1980. Diurnal Extension Rates of Wheat Leaves in Relation to Temperatures and Carbohydrate Concentrations of the Extension Zone. *J. of Experimental Bot.* 31(3):821-828.
- Kim, H. H., R. M. Wheeler, J. C. Sager, G. D. Gains y J. H. Naikane. 2006. Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment - A review of research at Kennedy Space Centre. *Acta Hort. (ISHS)* 711:111-120.
- Kimura, S., Y. Tahira, T. Ishibashi, Y. Mori, T. Mori, J. Hashimoto y K. Sakaguchi. 2004. DNA repair in higher plants; photoreactivation is the major DNA repair pathway in non-proliferating cells while excision repair (nucleotide excision repair and base excision repair) is active in proliferating cells. *Nucleic Acids Res* 32(9):2760-2767.
- Kompen, M. y R. Torres. 1987. Interacciones entre algunos reguladores de crecimiento y su influencia en el enraizamiento de acodos aéreos en *Pinus caribaea* Mor. *Acta Científica Venezolana* 38(4):459-464.
- Kosobrukhov, A. A., E. A. Bagnavets, N. A. Semenova y L. N. Chermnykh. 1988. Photosynthesis and absorption of mineral nutrient in tomato plants under various root zone temperature and light conditions. *Biotronics* 17:21-28.
- Kowallik, W. 1982. Blue Light Effects on Respiration. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 33:51-72.
- Kramer, P. J. 1980. Drought, stress and the origin of adaptation, pp. 7-20. In: N. C. Turner and P. J. Kramer (eds). *Adaptation of plants to water and high temperature stress*. Wiley, NY.
- Krieger, K. G. 1978. Early time course and specificity of auxin effects on turgor movement of the bean pulvinus. *Planta* 140(2):107-109.
- Krom, M. D. 1980. Spectrophotometric determination of ammonia: a study of a modified Berthlot reaction using salicylate and dichloroisocyanurate. *Analyst* 105:305-316.
- Kurepin, L. V., R. J. N. Emery, R. P. Pharis y D. M. Reid. 2007a. Uncoupling light quality from light irradiance effects in *Helianthus annuus* shoots: putative roles for plant hormones in leaf and internode growth. *J. of Experimental Bot.* 58(8):2145-2157.
- Kurepin, L. V., R. J. N. Emery, R. P. Pharis y D. M. Reid. 2007b. The interaction of light quality and irradiance with gibberellins, cytokinins and auxin in regulating growth of *Helianthus annuus* hypocotyls. *Plant Cell Environ.* 30:147-155.
- Kurepin, L. V., R. J. N. Emery, R. P. Pharis y D. M. Reid. 2007c. Uncoupling light quality from light irradiance effects in *Helianthus annuus* shoots: putative roles for gibberellins, auxin, cytokinins, abscisic acid and ethylene in leaf and internode growth. *J. Exper. Bot.* 58:2145-2157.

- Kurepin, L. V., R. J. N. Emery, C. C. Chinnappa y D. M. Reid. 2008. Light irradiance differentially regulates endogenous levels of cytokinins and auxin in alpine and prairie genotypes of *Stellaria longipes*. *Physiologia Plantarum* 134(4):624-635.
- Kurepin, L. V., W-K. Yip, R. Fan, E. C. Yeung y D. M. Reid. 2010. The roles and interactions of ethylene with gibberellins in the far-red enriched light-mediated growth of *Solanum lycopersicum* seedlings. *Plant Growth Regul* 61:215-222.
- Landriscini, M. R., J. A. Galantini y R. A. Rosell. 1997. Determinación de normas para la aplicación del sistema DRIS en cultivo de trigo de la región semiárida bonaerense. *Ciencia del Suelo* 15:17-21.
- Larcher, W. 1983. *Physiological Plant Ecology*, corrected printing of the second printing. Springer-Verlag, New York, pp.303.
- Larcher, W. 2001. *Physiological Plant Ecology*. Springer. Stuttgart. 1-69.
- Leopod, A. C. y P. E. Kriedman. 1975. *Plant growth and development*. 2nd ed. McGraw-Hill Co. N.Y.
- Letey, J. y A. Dinar. 1986. Simulated crop-water production function for several crops when irrigated with saline water. *Hilgardia* 54:1-32.
- Lichtenthaler, H. K. 1996. Vegetation stress: an introduction to the stress concept in plant. *Plant Physiol.* 148:4-14.
- Liptay, A., P. Sikkema y W. Fonteno. 1998. Transplant growth control through water deficit stress: A review. *HortTechnology* 8:540-543.
- Levine, I. N. 1992. *Física Química*. 3ª Edición. McGraw-Hill. Madrid. p 684, 823-826.
- Levine, M. W. 2000. *Fundamentals of sensation and perception*. Levine and Shefner's. Oxford University Press 3ª Ed.
- Lin, C. 2000. Plant blue-light receptors. *Trends in Plant Science* 5:337-342.
- Lu, Y., J. P. Gehan y T. D. Sharkey. 2005. Daylength and circadian effects on starch degradation and maltose metabolism. *Plant Physiology* 138:2280-2291.
- Makishima, N. y J. E. C. Miranda. 1995. Cultivo do tomate. *Instruções Técnicas*, 11. Brasília: EMBRAPA. CNPHortaliças: 22.
- Mansour, M. M. F. 2000. Nitrogen containing compounds and adaptation of plants to salinity stress. *Biologia Plantarum* 43(4):491-500.
- Mapelli, S. C., C. Frova, G. Torti, y G. Soressi. 1978. Relationship between set, development and activities of growth regulators in tomato fruits. *Plant Cell Physiol.* 19:1281-1288.
- Marcelis, L. F. M., E. Heuvelink y J. Goudriaan. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:83-111.
- Mark, U. y M. Tevini. 1996. Combination effects of UV-B radiation and temperature on sunflower (*Helianthus annuus* L., cv. Polstar) and maize (*Zea mays* L., cv. Zenit 2000) seedlings. *J. Plant Physiol.* 148(1-2):49-56.

- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic, London.
- Martínez, R. 2006. El poder del ojo adaptado a la oscuridad. *Gaceta Óptica*. Vol. 403.
- Matysik, J., A. Alia, B. Bhalu y P. Mohanty. 2002. Molecular mechanisms of quenching of reactive oxygen species by proline under stress in plants. *Curr. Sci.* 82:525-532.
- Miller, B. D. y V. R. Timmer. 1997. Nutrient dynamics and carbon partitioning in nutrient loaded *Picea mariana* [Mill.] B.S.P. seedling during hardening. *Scandinavian J. For. Res.* 12(2):122-129.
- Mitidieri, M. S., M. V. Brambilla, M. Piris, E. Piris y L. Maldonado. 2005. El uso de portainjertos resistentes en cultivo de tomate bajo cubierta: resultados sobre la sanidad y el rendimiento del cultivo. INTA. Argentina.
- Molinari, H. B. C., C. J. Marur, J. C. Bespalhok, A. K. Kobayashi, M. Pileggi, F. P. P. Pereira y L. G. E. Vieira. 2004. Osmotic adjustment in transgenic citrus rootstocks Carrizo citrange (*Citrus sinensis* Osb. x *Poncirus trifoliata* L. Raf.) overproducing proline. *Plant Sci.* 167:1375-1381.
- Moore, R. 1984. A model for graft compatibility-incompatibility in higher plants. *Amer. J. Bot* 71(5).
- Morehead, J. R. F. 1967. Light emitting semiconductors. *Sci. Am.* 216(5):109-122.
- Morelli, G. y I. Ruberti. 2000. Shade Avoidance Responses. Driving Auxin along Lateral Routes. *Plant Physiol.* 122:621-626.
- Moreno, R. 1993. Programa de tratamientos integrados en Hortalizas. *J. Hort.* 85:65-67a.
- Moreno, R. 2002. Producción Integrada: un reto científico. *J. Hortint. Extra* 1:145-153b.
- Morra, L., A. D. Palumbo, M. Bilotto, P. Ovieno y S. Picascia. 1998. Soil solarization: organic sequence. *Colture-Protette.* 27:63-70.
- Mpelkas, C. C. 1989. Electrical Energy in Agriculture. In: *Energy in World Agriculture 3* (McFate, K.L. ed). Elsevier, N.Y.
- Musil, C. F. 1996. Accumulated effect of elevated ultraviolet-b radiation over multiple generations of the arid-environment annual dimorph the sinuate DC (Asteraceae). *Plant Cell Environ.* 19(9):1017-1027.
- Nicola, S. 1998. Understanding root systems to improve seedling quality. *HortTechnology* 8:544-549.
- Normanly, J., J. P. Slovin y J. D. Cohen. 2004. Auxin biosynthesis and metabolism, p. 36-62. In: Davies J (ed). *Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action*. Kluwer Acad. Pub. Dordrecht, The Netherlands.
- Nozue, K. y J. Maloof. 2006. Diurnal regulation of plant growth. *Plant, Cell & Environment* 29:396-408.
- Ohyama, K., K. Manabe, Y. Omura, C. Kubota y T. Kozai. 2003. A comparison between closed-type and open-type transplant production systems with respect to quality of tomato plug transplants and resource consumption during summer. *Env. Control in Biology.* 41:57-61.
- Ojasti, J. 2001. Estudios sobre el Estado Actual de las Especies Exóticas. Comunidad Andina / Banco Interamericano de Desarrollo. Caracas, Venezuela. pp.71.

- Pacheco, R. 2001. Evaluación del efecto de la luz sobre la propagación masiva de *Sinningia speciosa* vía organogénesis. Informe de práctica de especialidad, Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Papadopoulos, A. P., y D. P. Ormrod. 1990. Plant spacing effects on yield of the greenhouse tomato. *Can. J. Plan. Sci.*, 50:563-573.
- Papadopoulos, A. P. y S. Pararajasingham. 1997. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): A review. *Scientia Horticulturae* 69(1-2):1-29
- Pardha Saradhi, P., P. Alia, S. Arom y K. V. S. K. Prasad. 1995. Proline accumulates in plants exposed to UV radiation and protects them against UV induced peroxidation, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 209:1-5.
- Parker, D. 1994. *The Growing Edge* 5(4):53-57, 66-67.
- Partida, L., T. J. Velázquez, B. Acosta, F. Ayala, T. Díaz, J. F. Inzuza y J. E. Cruz. 2007. Paclobutrazol y crecimiento de raíz y parte aérea de plántulas de pimiento morrón y berenjena. *Rev. Fitotec. Mex.* 30(2):145-149.
- Pataky, N. R. 2001. Bacterial disease of *Anthurium*, *Dieffenbachia*, *Philodendron* and *Syngonium*. Report on Plant Disease. University of Ullinois Extension. College of Agricultural Consumer and Environmental Sciences. Department of Crop Sciences University of Illinois at Urbana-Champaign. September. pp. 1-6.
- Pérez, J., J. C. López y M. D. Fernández. 2002. La agricultura del sureste: situación actual y tendencias de las estructuras de producción en la horticultura almeriense. "La agricultura mediterránea en el siglo XXI" 2. Caja Rural Intermediterránea, Cajamar (ed).
- Pérez, M., S. Jiménez y M. T. Lao. 2005. Light in intensive horticulture. *Recent Res. Devel. Agricultural & Food Chem.*, 6.
- Pérez, M. J., A. Teixeira da Silva y M. T. Lao. 2006. Light Management in Ornamental Crops En Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology. Global Science Books. Vol. IV:683-695. UK.
- Pettigrew, W. T. y W. R. Jr. Meredith. 1997. Dry matter production, Nutrient uptake, and growth of cotton as affected by potassium fertilization. *J. Plant Nutr.* 20:531-548.
- Pieruschka, R., G. Huber y J. A. Berry. 2010. Control of transpiration by radiation. *PNAS* 107(30):13372-13377.
- Pinto, M., C. Linaza, C. Pastenes, A. Riquelme, M. Berti. 2000. Efecto de la radiación ultravioleta-B sobre el crecimiento y la fotosíntesis de siete variedades de trigo. *Rv. Chil. Hist. nat.* 73(1).
- Poppe, C., U. Sweere, H. Drumm-Herrel y E. Schäfer. 2001. The blue light receptor cryptochrome 1 can act independently of phytochrome A and B in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant J.* 16(4):465-471.

- Poudel, P. R., I. Kataoka y R. Mochioka. 2007. Effect of red- and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture: An Intl. J. on Biotechnol. of Higher Plants*.
- Plénet, D., A. Mollier y S. Pellerin. 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *Plant Soil* 224:259-272.
- Quail, P. H. 2002. Phytochrome photosensory signalling networks. *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* 3:85-93.
- Raghavan, V. 2003. Some reflections on double fertilization from its discovery to the present. *New Phytol.* 159: 565-583.
- Rajagopal, R. y A. Madsen. 1981. Barley leaf unrolling. The proline connection. *Physiol. Plant.* 51:7-12.
- Rapparini, F., A. Rotondi y R. Baraldi. 1999. Blue light regulation of the growth of *Prunus persica* plants in a long term experiment: morphological and histological observations. *Trees* 14:169-176.
- Reddy, G. V., M. G. Heisler, D. W. Ehrhardt y E. M. Meyerowitz. 2004. Real-time lineage analysis reveals oriented cell divisions associated with morphogenesis at the shoot apex of *Arabidopsis thaliana*. *Development* 131:4225-4237.
- Resh, H. M. 2001. *Cultivos hidropónicos*. 5th ed. Mundi-Prensa, Spain. p. 457-459. [In Spanish].
- Riga, P., M. Anza y C. Garbisu. 2008. Tomato quality is more dependent on temperature than on photosynthetically active radiation. *J. Sci. Food Agric.* 88(1):158-166.
- Rivard Cary, L. y J. Louws Frank. 2008. Grafting to Manage Soilborne Diseases in Heirloom Tomato Production. *Hortscience* 43(7):2104-2111.
- Rivero, R. M, J. M. Ruiz y L. Romero. 2003. Can grafting in tomato plants strengthen resistance to thermal stress? *J. Sci. Food Agric.* 83:1315-1319.
- Rivero, R. M, J. M. Ruiz, y L. Romero. 2004. Iron metabolism in tomato and watermelon plants: influence of grafting. *Journal of plant nutrition* 27(12):2221-2234.
- Rockwell, N. C, Y. S. Su y J. C. Lagarias. 2006. Phytochrome structure and signaling mechanisms. *Annu. Rev. Plant Biol.* 57:837-858.
- Rogel, I., R. Muñoz y J. Cruz. 2000. Propagación del aguacatero por acodo, utilizando etiolación, AIB y obstrucción de savia. *Revista Chapingo (Seri Horticultura)* 6(1):101-104.
- Rojas, L. y F. Riveros. 2001. Efecto del método y la edad de las plántulas sobre prendimiento y desarrollo de injertos en melón. *Agricultura técnica* 61 (3):262-274.
- Romano C. P., P. R. H. Robson, H. Smith, M. Estelle, y H. Klee. 1995. Transgene mediated auxin overproduction in *Arabidopsis* hypocotyl elongation phenotype and interactions with the hy6-1 hypocotyl elongation and axr1 auxin-resistant mutants. *Plant. Mol. Biol.* 27:1071-1083.
- Ruiz, J. M., B. Blasco, R. M. Rivero y L. Romero. 2005. Nicotine-free and SALT-tolerant tobacco plants obtained by grafting to salinity-resistant rootstocks of tomato. *Physiologia Plantarum* 124:465-475.

- Ruiz, J. M., R. M. Rivero, L. M. Cervilla, R. Castellano y L. Romero. 2006. Grafting to improve nitrogen use efficiency traits in tobacco plants. *J. Sci. Food Agric.* 86:1014-1021.
- Ruiz, R. y W. Rathgeb. 1990. Effects in established tomato plants of P rates applied in seedbed and NPK absorption rhythm of cv Ace 55 VF. *Agricultura Técnica (Chile)* 50(3):274-280.
- Runkle, E. S. y R. D. Heins. 2006. Manipulating the Light Environment to control flowering and morphogenesis of herbaceous plant. *Proc. Vth IS on Artificial Lighting. Acta Hort.* 711. Ed. R. Moe.
- Sager, J. C., W. O. Smith, J. L. Edwards y K. L. Cyr. 1988. Use of spectral data to determine photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibrium. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 31:1882-1889.
- Salama, H. M. H., A. A. Al Watban y A.T. Al-Fughom. 2011. Effect of ultraviolet radiation on chlorophyll, carotenoid, protein and proline contents of some annual desert plants. *Saudi J. Biological Sci.* 18:79-86.
- Sanada, Y., H. Ueda, K. Kuribayashi, T. Andoh, F. Hayashi, N. Tamai y K. Wada. 1995. Novel Light-Dark Change of Proline Levels in Halophyte (*Mesembryanthemum crystallinum* L.) and Glycophytes (*Hordeum vulgare* L. and *Triticum aestivum* L.) Leaves and Roots under Salt Stress. *Plant and Cell Physiol.* 36(6):965-970.
- Salazar Mato, J. F. 2000. Análisis técnico-financiero de los programas operativos de las organizaciones de productores de frutas y hortalizas (OPFH) de la provincia de Almería, Resúmenes divulgativos de proyectos de investigación. FIAPA.
- Saleh, B. E. A. y M. C. Teich. 1994. *Fundamental of photonics.* John Wiley & Sons Inc.
- Salisbury, F. y C. Ross. 1994. *Fisiología Vegetal.* Iberoamericana ed. México D.F., México.
- Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 2000. *Fisiología de las plantas.* 2000. Paraninfo-Thomson Learning.
- Sánchez, E., J. M. Soto, J. M. Ruiz y L. Romero. 2006. Biomasa, actividad enzimática y compuestos nitrogenados en plantas de frijol ejotero bajo diferentes dosis de potasio. *Agric. Téc. Méx* [online], 32(1):23-37.
- Sánchez-Rodríguez, E., M. Rubio-Wilhelmi, L. M. Cervilla, B. Blasco, J. J. Rios, M. A. Rosales, L. Romero y J. M. Ruiz. 2010. Genotypic differences in some physiological parameters symptomatic for oxidative stress under moderate drought in tomato plants. *Plant Sci.*, 178:30-40.
- Saniewski, M., H. Okubo, K. Miyamoto y J. Ueda. 2005. Auxin induces growth of stem excised from growing shoot of cooled tulip bulbs. *J. Fac. Agr.* 50(2):481-488.
- Saradhi, P. P., A. Alia, K. Prasad y S. Arora. 1995. Proline accumulates in plants exposed to UV radiation and protects them against UV induced peroxidation. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 209(1):1-5.
- Sato, T., N. Kudo y R. Nishimura. 2009. Effect of day extension treatments with far red light on flowering of *Esutoma grandiflorum* in early winter. In: 6th International Symposium on Light in Horticulture, November 15-19, 2009, Tsukuba, Japan, p 141 (Abstr.).

- Schobert, B. y H. Tschesche. 1978. Unusual solution properties of proline and its interactions with proteins. *Biochim. Biophys. Acta* 541:240-277.
- Schweiger, J., M. Lang y H. K. Lichtenthaler. 1996. Differences in fluorescence excitation spectra of leaves between stressed or non-stressed plants. *J. Plant Physiol.* 148:537-547.
- Segura, S. 2005. Los jardines en la antigüedad. 1^o ed. Universidad de Deusto. Bilbao
- Serrano, Z. 1990. Técnicas de Invernadero. Ed. el autor. Sevilla. pp.644.
- ShanFa, L. 2001. The grafting of excised hypocotyl segment of plant in sterile culture. *Source Acta Botanica Yunnanica* 23(1):91-96.
- Shani, U. y L. M. Dudley. 2001. Field studies of crop response to drought and salt stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1522-1528.
- Sheng, J., J. Jeong y M. C. Mehd. 1993. Plant Biology Developmental regulation and phytochrome-mediated induction of mRNAs encoding a proline-rich protein, glycine-rich proteins, and hydroxyproline-rich glycoproteins in *Phaseolus vulgaris* L. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 90:828-832.
- Shimomachi, T., D. Larson, K. Jordan y J. L. Cuello. 2006. Energy balance and three-dimensional radiation distribution of water-cooled HPS lamps and of a light-emitting diode (LED) array. *Act Hort. (ISHS)* 711:393-398
- Shuangxia, J., L. Shaoguang, Z. Xianlong, N. Yichun y G. Xiaoping. 2006. An efficient grafting system for transgenic plant recovery in cotton (*Gossypiumhirsutum* L.) *Plant Cell, Tissue and Organ Cult.* 85:181-185.
- Singh, K. y S. N. Pandey. 2011. Effect of nickel-stresses on uptake, pigments and antioxidative responses of water lettuce, *Pistia stratiotes* L. *J. Environ. Biol.* 32:391-394.
- Smith, H. 1982. Light Quality, Photoreception and Plant Strategy. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 33:481-518.
- Smith, A. M. y M. Stitt. 2007. Coordination of carbon supply and plant growth. *Plant, Cell and Environment* 30:1126-1149.
- Smith, H. 1994. Sensing the light environment: the functions of the phytochrome family, p. 377-416. In: R.E. Kendrick and G.H.M. Kronenberg (eds.). *Photomorphogenesis in plants*, 2nd ed. Kluwer.
- Sommer, A. P., A. L. Pinheiro, A. R. Mester, R. P. Franke y H. T. Whelan. 2001. Biostimulatory windows in low-intensity laser activation: lasers, scanners and NASA's light-emitting diode 770 array system. *Journal of Clinical Laser Medicine Surgery* 19:29-33.
- Spencer, D. F., y G. Ksander. 2003. Nutrient limitation of *Zannichellia palustris* and *Elodea canadensis* growing in sediments from Fall River, California, *Journal of Freshwater Ecology* 18:207-213.
- Srivastava, L. M. 2002. *Plant Growth and Development: hormones and Environment*. Elsevier Science (USA).
- Starr, C., R. Taggart, C. A. Evers y L. Starr. 2004. *Biología: la unidad y diversidad de la vida*. 12th ed. Cengage Learning. MX.

- Steiner, A. 1961. A universal method for preparing nutrient solution of a certain desired composition. *Plant Soil* 15:134-154.
- Steiner, A. A. 1973. The selective capacity of tomato plants for ions in a nutrient solution. Proceedings of 3rd International Congress on Soilless Culture, Sassari, Italy. pp. 43-54.
- Sundström, V. 2000. Light in elementary biological reactions. *Progress in Quantum Electronics* 24:187-238.
- Szabados, L. y A. Savoure. 2009. Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in Plant Sci.* 15(2):89-97.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2002. *Plant Physiology* (3rd ed) Sinauer Associates, Inc. Publishers, Massachusetts, USA.
- Takemiyaa, A., S. Inouea, M. Doib, T. Kinoshitaa y K. Shimazakia. 2005. Phototropins Promote Plant Growth in Response to Blue Light in Low Light Environments. *The Plant Cell* 17:1120-1127.
- Tennessen, D. J., R. J. Bula y T. D. Sharkey. 1995. Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation. *Photosyn. Res.* 44:261-269.
- Thornton, R. M. y K. V. Thimann. 1967. Transient Effects of Light on Auxin Transport in the Avena Coleoptile. *Plant Physiol.* 42(2):247-257.
- Tien, T. M., M. H. Gaskin y D. H. Hubbell. 1979. Plant Growth Substance produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). *Appl. Environ. Microbiol.* 37:219-226.
- Tofiño, A., H. M. Romero y H. Ceballos. 2007. Effect of abiotic stress on starch, synthesis and degradation. A review. *Agronomía Colombiana* 25(2):246-254.
- Tomás, M., J. Gomariz, J. Costa y M. S. Catalá. 1999. Recuperación de una variedad tradicional de tomate precoz de tipo pimiento. *Actas de Horticultura* (24):113-116.
- Tremblay, N., M. J. Trudel y A. Gosselrn. 1997. Influence of irradiance photoperiod combination on tomato mineral nutrition. *Can. J. Plant Sci.* 67:559-566.
- Turquois, N. y M. Malone. 1996. Non-destructive assessment of developing hydraulic connections in graft union of tomato. *Jor. Exp. Bot.* 47:298.
- Veglio, A. 2010. The shade avoidance syndrome: A non-Markovian stochastic growth model. *J. Theoretical Biol.* 264:722-728.
- Wainwright, H. y J. Marsh. 1986. The micropropagation of watercress (*Rorippa nasturtium-aquaticum* L.). *J. Hortic. Sci.* 61:251-256.
- Waldren, R. P., I. D. Teare y S. W. Ehler. 1974. Changes in Free Proline concentration in Sorghum and Soybean Plants under Field Conditions *Crop. Sci. Soc. of Amer.* 14:447-450.
- Walter, A., H. Spies, S. Terjung, R. Küsters, N. Kirchessener y U. Schurr. 2002. Spatio-temporal dynamics of expansion growth in roots: automatic quantification of diurnal course and temperature by digital image sequence processing. *Journal of Experimental Botany* 53:689-698.

- Walter, A. y W. Schurr. 2005. Dynamics of leaf and root growth: endogenous control versus environmental impact. *Annals of Botany* 95:891-900.
- Weaver, R. 1998. *Reguladores de crecimiento de las plantas en la Agricultura*. California Univ. Press, Davis ed. Trillas, Chapingo, MX.
- Wellburn, A. R. 1994. The Spectral Determination of Chlorophylls A and B, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *J. Plant Phys.* 144:307-313.
- Wellman, E. 1983. UV Radiation in Photomorphogenesis. In: W. Shropshire and H. Mohr (Eds.). *Photomorphogenesis*. Encyclopedia of Plant Physiology Volume 16B. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, Germany. pp. 745-760.
- Weston, L. y B. Zandstra. 1986. Effect of roots container size and location of production on growth and yield of tomato transplants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111:498-501.
- Wolf, B. 1982. A comprehensive system of leaf analysis and its use for diagnosing crop nutrient status. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 13:1035-1059
- Yanagi, T. y K. Okamoto. 1997. Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth. *Acta Hort. (ISHS)* 418:223-228.
- Yelle, S., A. A. Gosselin y M. J. Trudel. 1987. Effets à long terme de l'enrichissement carboné sus la tomate de serre cultivée avec ou sans éclairage d'appoint. *Can. J. Plant Sci.* 67:899-907.
- Yi, H. G. y T. J. Guilfoyle. 1991. An auxin responsive promoter is differentially induced by auxin gradients during tropisms. *Plant Cell* 3:1167-1175.
- Yoshida, Y, T. Kiyosue, K. Nakashima, K. Yamaguchi-Shinozaki y K. Shinozaki. 1997. Regulation of levels of proline as an osmolyte in plants under water stress. *Plant Cell and Physiol.* 38:1095-1102.
- Zeiger, E. y L. Taiz. 2007. *Plant Physiology*. 3rd ed. Universitat Jaume I, Castellò.
- Zornoza, O. Carpena, A. Najera y J. Peñalosa. 1987. Effect of light intensity on NH₄⁺ tolerance in tomato plants. *Plant and Soil.* 102(1):93-97.

ANEXO I. PUBLICACIONES

HortScience 46(5):698-704. 2011.

Changes in Endogenous Auxin Concentration in Cultivars of Tomato Seedlings under Artificial Light

Eva María Almansa and Antonio Espín

Civil Engineering Department of Superior Technical School, University of Granada, Fuente Nueva S/N, CP18071 Granada, Spain

Rosa María Chica

Rural Engineering Department of Superior Engineering School, University of Almería, La Cañada de San Urbano CP 04120, Almería, Spain

María Teresa Lao¹

Crop Production Department of Superior Engineering School, University of Almería, La Cañada de San Urbano CP 04120, Almería, Spain

Additional index words: B-LEDs, fluorescent lamps, PAR:NIR, B:R, B:FR and R:FR ratios

Abstract. In this work, we present the study of the behavior of 15 tomato cultivars under different grow lights to evaluate the quality of seedlings in the production system. The lamps used are: compact fluorescent, high-efficiency fluorescent, fluorescent, and pure blue light-emitting diodes (B-LEDs). The trial was carried out in a culture chamber with the temperature and relative humidity continuously controlled. Spectral radiation was measured at the canopy level. The following were quantified: fresh, dry biomass partitioning organs (leaves, stems, and roots), the total dry weight/total fresh weight relationship, shoot/root ratio, and indole acetic acid. We found high-efficiency fluorescent light treatment has a very interesting spectral quality for all cultivar applications as a result of it having the lowest photosynthetically active radiation (PAR):near infrared (NIR), blue:red (B:R), blue:far red (B:FR), and red:far red (R:FR) ratios; 'Conquista', 'Velasco', and 'Lynna' are cultivars that show sensitivity to special wavebands (ultraviolet, B, R, and FR). 'Ikram', 'Saladar', and 'Delizia' tolerate the lack of minimum energy and spectral quality.

There are a large number of cultivars of tomato used in commercial production under greenhouse conditions. Their growth is influenced by environmental conditions, cultural techniques, and market requirements (Moreno, 1998, 2002). Moreover, the physiological responses of different cultivars are not similar (Goykovic and Saavedra, 2007) and, therefore, it is necessary to make a detailed study of each variety separately.

The most studied environmental factors used to differentiate among cultivars are: light and temperature (Allen and Rudich, 1978; Bartsch et al., 1985; Dinar and Rudich, 1985; el Ahmadi and Allen, 1979), salinity resistance to pests and diseases (Hanafi and Schmitzler, 2004), and nutritional factors.

Indole-3-acetic acid (IAA) is the most studied auxin and, moreover, it has the highest natural occurrence in plants. Different types of auxin are found in plants as free acids or conjugated forms such as ester and amide derivatives (Normandy et al., 2004).

It is believed that the most important sites of IAA synthesis are generally in young tissues (buds and young leaves, young fruits, and immature seeds) because the endogenous levels

in these tissues are higher than in other tissues. There seem to be two sites of biosynthesis inside the cells, as tryptophan, considered as a precursor of IAA, which is synthesized in plastids, but it has also been found at the cytoplasm (Srivastava, 2002). It can be synthesized in leaves and travels down by polar transport promoting plant growth (Hartmann and Keeter, 1983); synthesis and polar transport-promoting growth was observed only with light grown seedling (Boenjan et al., 1995; Jensen et al., 1998; Romano et al., 1995). On the other hand, it has also been observed that one of the two major peaks of auxin production is in the cell division phase (Mapelli et al., 1978).

Bohner and Bangerth (1988) observed in experiments with isogenic lines of tomato that the decrease in the rate of cell divisions is associated with rapid reductions in the levels of IAA. Although not finding a correlation between the concentration of IAA and cell expansion, positive correlations were found between the level of auxin and cell expansion in various tissues of other species (Cleland, 2004). Auxin, in very small quantities, stimulates root growth and in larger amounts inhibits it, favoring the development of lateral roots (Campbell and Reece, 2007).

Auxin controls other organic processes: initiation of radicle and adventitious roots (Hartmann et al., 2002; Weaver, 1998), flowers and fruit retention (Erner, 1989), transition from flower to fruit (Raghavan, 2003), young

foliage (complex interaction) (Zeiger and Taitz, 2007), and tropisms (Campbell et al., 2001; Even and Eichhorn, 1992; Starr-Taggart et al., 2004; Zeiger and Taitz, 2007). At low concentrations, auxins stimulate metabolism and development; however, high concentrations of auxin inhibit metabolism and development (Campbell et al., 2001).

Auxin synthesis was modified by intensity and quality spectrum light (Kuspin et al., 2007a, 2008; Pacheco, 2001; Tofito et al., 2007). Concerning the activity of auxin, the light produces a transfer of electrons to the molecule of auxin that blocks its synthesis on the side that receives the light. This causes a higher gradient of concentration on the side without any light (Thornton and Thimann, 1967). The longitudinal and lateral transport of auxin results in its asymmetric distribution and this causes differential growth in plants (Horwitz, 1994; Yi and Guilfoyle, 1991). Irradiation at 730 nm (FR) promotes auxin synthesis in leaves, and irradiation at 660 nm (R) promotes synthesis of the inhibitor (Muir and Zhu, 2006). Blue light (B) produces a higher quantity of auxin in leaves; this production can be put down to cell differentiation (Horwitz, 1994) and growth of secondary roots (Giles, 2000) to ensure the survival of young plants (Geffner et al., 1999).

Transplant seedling production has increased in recent years as a result of the huge advantages of this production system compared with bare-root seedling production. The successful production of seedlings for transplantation requires the control of several factors, one of which is light (Ohyanma et al., 2003). In the cultivation of tomato seedlings, incident radiation on the canopy affects photosynthesis (Papadopoulos and Omrod, 1990).

There are parameters to define quality tomato seedlings: total fresh weight (aerial part and roots), total dry weight (aerial part and roots), dry weight/fresh weight partition, total height, number of leaves, foliar surface, stem diameter, root length, etc. (Carbonell, 1995). Hoyos (1990) states that the total dry weight is the best parameter to define quality tomato seedling. The effect of IAA on the length and fresh and dry weight of the stem segment is to increase them all (Saniewski et al., 2005). In wheat cultivars, auxin increased hypocotyl length, seedling fresh, and dry weight and hypocotyl dry weight but did not influence the seed germination percentage and radicle length (Akbari et al., 2007).

The aim of our study is to compare the effect of light sources: compact fluorescent lighting (low consumer), high-efficiency fluorescent, fluorescent tubular light discharges (TLD), and light-emitting diode (LED) used in seedlings production on endogenous auxin concentrations in leaves of different cultivars of tomatoes.

Materials and Methods

The test began on 16 July 2009 with the planting of 15 cultivars of tomatoes (Table 1) in four expanded polyethylene trays. On each tray, 10 seeds of each variety were distributed.

Received for publication 23 Feb. 2011. Accepted for publication 28 Mar. 2011.

¹To whom reprint requests should be addressed; e-mail: mtao@ual.es.

Table 1. Commercial and industrial characteristics of different cultivars of tomato used in the assay.

Cultivar	Plant	Frut	Caliber	High resistance (HR)
Krus (K)	Vigor, semiopen, good setting even at low temperatures	In bouquets, very uniform, firm, good flavor and color	M-MM	ToMV 0-2; Fol 1-2, V
Saladar (S)	Suitable for salt water, long life, very productive during all the cycle of cultivation	In bouquets, firm, ideal for export	M-MM	M, TSWV, TYLC
Atlético (A)	Hybrid, long conservation, small leaves of average half-leaves, great fecundation	In bouquets, smooth, red very attractive	G-GG	ToMV, Fol 0-1, Va, Vd
Delicia (D) and Conquista (C ₁₉)	Good production, short cultivation, cycle hybrid	Black neck, sweet taste	M-G	Fusarium
Cornabel (C)	Average yield, bears the heat	Good shape fruit pear, red color	G	Va, Vd, Fol 0-1
Rambo (R)	Vigorous plant, of scant distance between posica, cultivation in greenhouse	Slightly marked shoulders, good flavor and color	G-GG	ToMV 0-2; V; Fol 1-2; For; intermediate resistance (IR): M
Anemon (A ₉)		Towering quality excellent color		TYLCV, M, For
Velasco (V)	Type beef, extraordinary vigor, excellent candel with low temperatures	Consistent, uniform, white neck	G-GG	ToMV; FE 1-5; Va; Vd; Fol 0, 1; For
Bigas (B)	Vigorous	Bouquet	M	TYLCV
Myriade (M _v)	Vigorous, very precocious	Lengthened good conservation postharvest	G-GG	TMV, M, V, For, Fol2, FB
Monte negro RZ (M _c)	Homogeneous cultivation	Large, green collar, great flavor, excellent preservation postharvest	G-GG	M, TYLC
Prodigy RZ (P)	Very balanced regarding internode length and vegetation	Green collar, good: uniformity, turning to red in the maturation, firmness, conservation	G-GG	ToMV, Va., Fol 0-1, For, My, TSWV, TYLCV
Zayno RZ (Z)	Internode compact plant environment	Dark markedly neck, Bouquet, Excellent taste, firmness and conservation	GG	ToMV, Va, Fol 0-1, For, M, IR: TYLCV
Lyma RZ (L)	Vigorous, uniform fields	Red, collection in cluster or individually, great firmness, commercial long life	M-MM	ToMV, Gae, Fol 0-1, My, TSWV, TYLCV

ToMV 0-2 = Tomato mosaic virus; Fol 1, 2 = *Fusarium oxysporum* f. sp. *lyopersici*; V = *Verticillium*; M = nematodes; TSWV and TYLC = *Tomato spotted wilt virus*; and *oxoni*; Va = *Viral amplicon*; Vd = *Verticillium dahliae*; For = *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis lycopersici*; FB = *Chlorophium* 5.

Peat moss covered with vermiculite substrate was used. The density was 421 plants/m². In the pre-experiment period, for 2 d, the trays were kept in a germination chamber at 27 °C with 90% relative humidity (RH) without illumination. The sprouts were moved to the greenhouse at 34 to 35 °C and 53% to 55% RH. After 8 d, the seedlings had a vigorous appearance and they were scheduled for follow-up in a chamber where they were then randomly assigned to each light treatment. The chamber was kept at a constant temperature and humidity (34 °C and 55% RH, respectively). The chamber was equipped with four light sources as described in Table 2. All plants were grown under a 24-h photoperiod, and a complete nutrient solution was used to avoid any water or nutrient limitation. The trial ended on 24 Aug. 2009 when it came to sampling. Experimental design consisted of four lighting treatments (Fig. 1) with 10 replications for each variety and treatment.

Although T₄ shows less energy than the other treatments, it allows us to study the morphogenetic reaction of the crop generated by PAR and B which, according to Dougher and Bugbee (2001), allows the effect of B on the photoequilibrium level of phytochrome and PAR radiation to be separated.

Spectral radiation was measured in each shelf using a LI-COR 1800 (LI-COR Inc., Lincoln, NE) at the canopy level.

At the end of the trial, plants were evaluated. Fresh and dry weight partitioning among assimilation (leaves), conductive (stems and petioles), and absorption (roots) organs were

Table 2. Characteristics of light treatments

Treatments	Lamps and lighting	Power (W m ⁻²)
T1	Compact fluorescent (8 lamps 23 W)	184
T2	Fluorescent at TL5 (2 lighting × 2 lamps 35 W)	140
T3	TLD fluorescent (3 lighting × 2 lamps 18 W)	108
T4	Pure blue light-emitting diodes (B-LEDs) RGB (four lines ALUM 40° 25 LED SMD RGB × 9 W with console DN-RGB fiber light)	36

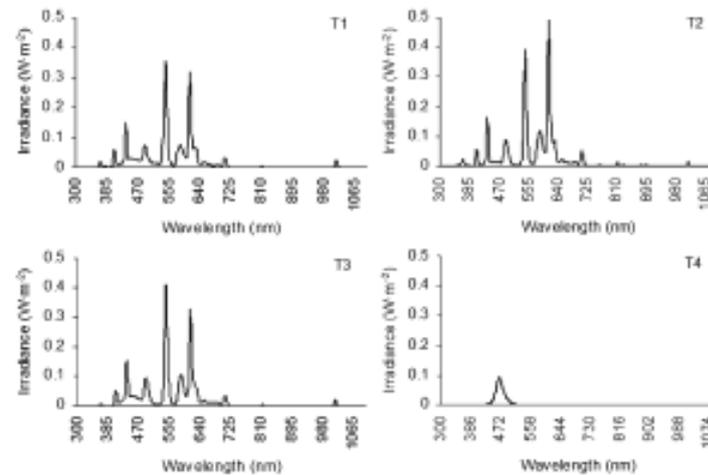


Fig. 1. Spectral quality of different treatments measured at canopy level.

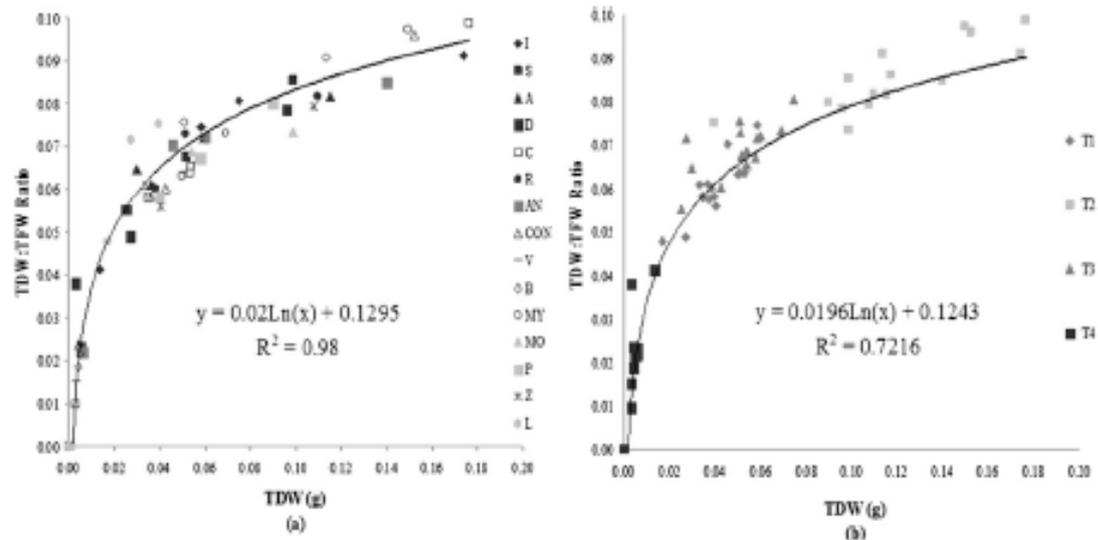


Fig. 2. (A-B) The relationship between TDW:TFW and TDW. TDW = total dry weight; TFW = total fresh weight.

measured by a precision balance (Mettler Toledo classic PB303-S, Greifensee, Switzerland).

Extraction was made by grinding fresh leaves with 95% + 70% (1:1 v/v) ethanol. After filtering and centrifuging the samples at 5500 rpm for 10 min, IAA was quantified in supernatant fractions by colorimetry with a Spectrophotometer (Shimadzu ultra-violet-1201; Shimadzu, Kyoto, Japan) (Tien et al., 1979).

Analysis of data was made using the software packages Excel 7.0 and Statgraphics (Stat-Point, Herndon, VA) plus 4.0. Analysis of variance and the Tukey test for $P < 0.05$ were used to assess the significance of parameters: fresh weight (FW) and dry weight (DW) for all parts of the plants; least significant difference (LSD) test for $P < 0.05$ was used to assess the significance of the relationship between aerial and root parts [Leaves+Stem Dry Weight:Root Dry Weight (LSDW:RDW)] in the treatments studied.

Results and Discussion

Spectral quality light. Figure 1 shows spectral quality of different treatments measured at the canopy level. Common peak occurred at 436, 544, and 612 nm for T₁, T₂, and T₃, respectively but only T₄ presents a wide peak at 470 nm. The lowest total radiation is presented by T₄.

Interesting values associated with radiation from the agricultural point of view to characterize the quality of light (Baillie et al., 2003) and the relationship between different spectral radiation ranges are presented in Table 3.

T₁ and T₂ show similar ultraviolet radiation (UV), higher than T₃, whereas T₄ does not show ultraviolet radiation. UVA and UVB can produce changes in the reduction of the stem length as a result of degrading IAA (Musk and Tevini, 1996).

Table 3. Agronomic characterization of quality light (Wm^{-2}).

Treatments	T1	T2	T3	T4
Ultraviolet (300-400 nm)	0.31	0.32	0.11	0.01
B (400-500 nm)	3.90	3.42	4.24	2.55
R (600-700 nm)	4.50	6.62	4.73	0.00
FR (700-800 nm)	0.42	0.63	0.40	0.00
PAR (400-700 nm)	14.40	16.57	15.39	2.71
NIR (700-1100 nm)	0.66	0.95	0.58	0.00
Total (300-1100 nm)	15.18	17.70	15.94	2.72
PAR:total	0.95	0.94	0.97	1.00
PAR:NIR	21.73	17.50	26.48	—
B:R	0.87	0.52	0.90	—
B:FR	9.36	5.47	10.66	—
R:FR	10.81	10.59	11.90	—

B = blue; R = red; FR = far red; PAR = photosynthetically active radiation; NIR = near infrared.

The gradient of B radiation is T₃ > T₁ > T₂ > T₄. B light affects photomorphogenic aspects of plant growth and their development (Sundström, 2000). Carotene, xanthophylls (orange and yellow), and anthocyanins (red pigments) absorb mainly in the B region of the spectrum. Chlorophyll also absorbs in the B (Buiten and Clevers, 1993). Likewise, B light stimulates synthesis of auxin through the activity of the auxin: IAA protein family, which is related to endogenous levels of IAA (Folta et al., 2003). Also, Zeng et al. (2009) found in *Ambidopsis* that the cryptochrome photoreceptors regulate root growth by changing auxin transport.

T₂ shows the highest values of R and FR parameters, whereas T₁ and T₃ are similar. Briggs (1963) documented R light suppresses auxin production in corn coleoptiles. Phytochromes (Hall and Rao, 1999) are responsible for plant response at R and FR ranks.

T₂ shows the best value of PAR; T₂, T₃, and T₁ have higher values than those mentioned in the literature for all lighting systems (Gaudreau et al., 1994; Poudel et al., 2007; Tennesen

et al., 1994). PAR is the portion of the spectrum that participates in photosynthesis; PAR and temperature are critical parameters related to tomato plant performance in the greenhouse (Jones, 2008).

T₂ has a higher NIR value, although T₁ has greater power (Table 2); also, T₁ did not have a light system.

NIR is mainly determined by the absence of absorption by pigments; this means that the energy passes through the leaf (the leaf is transparent) or that it is reflected, producing more transition of air to cell walls (Buiten and Clevers, 1993). NIR is a useful part of the radiation for photosynthesis mainly related to heat and the greenhouse energetic balance (Castilla, 2005). Nevertheless, in a culture chamber with light at every level of the crop, NIR only results in plant overheating and the possibility of damaging tissues.

Total radiation received by the canopy plant in T₁ and T₃ is similar; T₂ has the highest value of all treatments. Total radiation measurement at T₄ is very low compared with other treatments.

High photosynthetic efficiency radiation can be connected with partition *PAR*:total whose value must be equal or closer to 1. In all treatments, this condition is known.

T₃ has the best relationship between both spectral regions. The *PAR*:NIR relationship must be high in artificial lighting systems because it can mean that there is no damage by heating.

T₃ has a B:R value equal to 0.90 and T₂ has the value furthest from 1 for this param-

eter with regard to all of the treatments. When there is an excess of B with very little R, growth will be shortened, and the cuticle will be dark-colored and hard; if there is an excess of R over B, the growth will become soft with long internodes, resulting in lanky plants (Jones, 2006). A value closer to 1 indicates balance in the B and R wavebands.

T₂ has the lowest values of these parameters. B:FR and R:FR may be critical parameters in the cultures. Blue light will result in

a thicker cuticle if it is reflective. These wavelength bands alter the proportions of esters and leaf wax alcohols in the leaves of pepper (Kasperbauer and Wilkinson, 1995).

Flowers evaluation. Table 4 shows morphological parameters of studied cultivars under light treatments. The cultivars A, R, M₀, P, Z, and L show a light compensation point higher than that offered by T₀, because they died in the course of the trial. The compensation point for light intensity varies according to

Table 4. Fresh and dry weight (g) for all parts of the plant and different partitions.

		LFW*	SFW	RFW	TFW	LDW	SDW	RDW	TDW	TDW:TFW	LSDW:RDW
I	T ₁	0.39 b	0.30 bc	0.09 b	0.78 b	0.03 a	0.03 b	0.01 b	0.06 bc	0.07 b	5.62 a
	T ₂	0.76 a	0.92 a	0.23 a	1.91 a	0.04 a	0.11 a	0.02 a	0.17 a	0.09 a	6.50 a
	T ₃	0.46 ab	0.36 b	0.10 b	0.93 b	0.03 a	0.03 b	0.01 b	0.07 b	0.08 b	6.67 a
	T ₄	0.18 b	0.12 c	0.03 b	0.33 b	0.01 b	0.01 b	0.002 b	0.01 c	0.04 c	8.44 b
S	T ₁	0.34 b	0.22 b	0.05 b	0.60 b	0.02 a	0.02 b	0.003 c	0.04 b	0.06 b	6.97 a
	T ₂	0.53 a	0.51 a	0.11 a	1.16 a	0.03 a	0.05 a	0.02 a	0.10 a	0.09 a	5.4 b
	T ₃	0.41 ab	0.26 b	0.10 a	0.76 a	0.02 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.07 ab	4.84 b
	T ₄	0.15 c	0.09 c	0.02 b	0.26 c	—	0.003 c	0.001 c	0.01 c	0.02 c	2.75 c
A	T ₁	0.34 b	0.23 b	0.03 b	0.60 b	0.02 b	0.02 b	0.005 b	0.04 b	0.06 b	6.35 a
	T ₂	0.64 a	0.58 a	0.20 a	1.41 a	0.03 a	0.06 a	0.02 a	0.12 a	0.08 a	3.96 b
	T ₃	0.28 b	0.13 b	0.05 b	0.46 b	0.02 b	0.01 b	0.005 b	0.03 b	0.06 b	5.67 b
	T ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D	T ₁	0.31 b	0.20 b	0.05 b	0.55 b	0.01 b	0.01 b	0.003 b	0.03 b	0.05 b	6.41 a
	T ₂	0.51 a	0.55 a	0.16 a	1.22 a	0.03 a	0.05 a	0.02 a	0.10 a	0.08 a	5.55 ab
	T ₃	0.23 b	0.18 b	0.05 b	0.46 b	0.01 b	0.01 b	0.004 b	0.03 b	0.06 b	3.99 b
	T ₄	0.01 c	0.006 c	—	0.02 c	—	—	—	—	0.01 c	—
C	T ₁	0.41 b	0.33 b	0.09 bc	0.84 b	0.02 b	0.03 b	0.01 b	0.05 b	0.05 b	8.02 a
	T ₂	0.69 a	0.79 a	0.31 a	1.79 a	0.04 a	0.11 a	0.03 a	0.18 a	0.08 a	5.57 b
	T ₃	0.40 b	0.30 b	0.12 b	0.82 b	0.02 b	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.06 b	5.96 b
	T ₄	0.16 c	0.13 c	0.02 c	0.31 c	—	—	—	—	0.04 c	—
R	T ₁	0.33 b	0.24 b	0.06 b	0.64 b	0.015 b	0.02 b	0.01 b	0.04 b	0.06 b	5.44 a
	T ₂	0.52 a	0.60 a	0.22 a	1.34 a	0.03 a	0.06 a	0.02 a	0.11 a	0.08 a	4.33 a
	T ₃	0.37 b	0.25 b	0.09 b	0.70 b	0.02 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.07 a	5.57 a
	T ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₀₁	T ₁	0.35 b	0.25 b	0.05 bc	0.65 b	0.02 b	0.02 bc	0.01 b	0.05 bc	0.07 b	7.29 a
	T ₂	0.64 a	0.80 a	0.21 a	1.65 a	0.03 a	0.09 a	0.02 a	0.14 a	0.08 a	5.30 b
	T ₃	0.44 b	0.31 b	0.09 b	0.84 b	0.02 b	0.03 b	0.01 b	0.06 b	0.07 ab	5.13 b
	T ₄	0.16 c	0.09 c	0.02 c	0.28 c	—	0.01 c	—	0.01 c	0.02 c	—
C ₀₀₁	T ₁	0.29 b	0.20 b	0.06 bc	0.55 bc	0.01 b	0.02 b	0.01 b	0.03 bc	0.06 ab	5.90 a
	T ₂	0.71 a	0.87 a	0.27 a	1.58 a	0.04 a	0.09 a	0.02 a	0.15 a	0.10 a	5.37 a
	T ₃	0.37 b	0.22 b	0.12 b	0.71 b	0.02 b	0.02 b	0.01 b	0.04 b	0.06 ab	4.43 a
	T ₄	0.11 c	0.05 c	0.01 c	0.17 c	0.002 c	0.002 b	—	0.004 c	0.02 b	—
V	T ₁	0.35 b	0.22 bc	0.07 b	0.65 b	0.017 b	0.02 b	0.004 b	0.04 bc	0.06 b	7.93 a
	T ₂	0.56 a	0.61 a	0.19 a	1.36 a	0.03 a	0.07 a	0.02 a	0.12 a	0.09 a	7.04 a
	T ₃	0.44 ab	0.27 b	0.09 b	0.79 b	0.02 ab	0.02 b	0.007 b	0.05 b	0.06 b	6.08 a
	T ₄	0.12 c	0.07 c	0.01 b	0.20 c	0.002 c	—	0.001 b	0.003 c	0.02 c	2.00 b
B	T ₁	0.32 b	0.22 b	0.06 bc	0.60 b	0.01 b	0.02 b	0.01 b	0.03 c	0.06 c	5.46 a
	T ₂	0.53 a	0.54 a	0.18 a	1.25 a	0.03 a	0.06 a	0.02 a	0.11 a	0.09 a	4.01 a
	T ₃	0.37 b	0.22 b	0.08 b	0.67 b	0.02 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.08 b	5.03 a
	T ₄	0.12 c	0.08 c	0.02 c	0.22 c	—	0.004 c	—	0.004 c	0.02 d	—
M ₁	T ₁	0.41 a	0.29 b	0.09 bc	0.79 b	0.02 b	0.02 b	0.01 b	0.05 bc	0.06 b	5.15 a
	T ₂	0.58 a	0.71 a	0.25 a	1.54 a	0.04 a	0.09 a	0.02 a	0.15 a	0.10 a	5.52 a
	T ₃	0.50 a	0.31 b	0.14 b	0.94 b	0.03 ab	0.03 b	0.01 b	0.07 b	0.07 b	4.12 a
	T ₄	0.13 b	0.10 b	0.01 c	0.23 c	—	0.01 b	—	0.005 c	0.02 c	—
M ₀	T ₁	0.32 b	0.20 b	0.07 b	0.59 b	0.01 b	0.02 b	0.01 b	0.03 b	0.058 b	4.97 a
	T ₂	0.61 a	0.55 a	0.19 a	1.34 a	0.03 a	0.05 a	0.02 a	0.10 a	0.073 a	4.52 a
	T ₃	0.43 ab	0.24 b	0.12 b	0.79 b	0.03 a	0.02 b	0.01 b	0.05 b	0.069 ab	5.38 a
	T ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P	T ₁	0.38 b	0.23 c	0.08 a	0.68 b	0.016 b	0.02 c	0.007 b	0.04 b	0.058 b	4.20 a
	T ₂	0.56 a	0.45 a	0.11 a	1.12 a	0.034 a	0.04 a	0.014 a	0.09 a	0.08 a	5.71 a
	T ₃	0.41 b	0.32 b	0.12 a	0.86 b	0.02 ab	0.03 b	0.01 ab	0.06 b	0.066 ab	4.26 a
	T ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Z	T ₁	0.39 b	0.25 b	0.08 a	0.72 b	0.02 b	0.02 b	0.007 b	0.04 b	0.056 b	5.06 a
	T ₂	0.68 a	0.54 a	0.14 a	1.36 a	0.04 a	0.05 a	0.014 a	0.11 a	0.08 a	6.60 a
	T ₃	0.39 b	0.33 b	0.09 a	0.82 b	0.02 b	0.03 b	0.01 ab	0.06 b	0.07 a	4.90 a
	T ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
L	T ₁	0.23 a	0.11 b	0.02 a	0.36 b	0.01 a	0.01 a	0.001 b	0.02 b	0.05 a	6.00 a
	T ₂	0.30 a	0.19 a	0.04 a	0.53 a	0.02 a	0.02 a	0.005 a	0.04 a	0.08 a	7.13 a
	T ₃	0.24 a	0.12 b	0.02 a	0.38 ab	0.01 a	0.01 a	0.001 b	0.03 ab	0.07 a	7.00 a
	T ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*Significant difference at P < 0.05 by the Tukey's multiple range test with different letter(s) within column by variety. FW = fresh weight; L = leaf; S = stem; R = roots; T = total; DW = dry weight; D W L S = dry weight leaf + dry weight stem.

the type of plant, but it is typically 40 to 60 Wm⁻² for sunlight. The compensation point for light, in the tomato plant, can be reduced (somewhat) by increasing the amount of carbon dioxide available to the plant, allowing the plant to grow under conditions of lower illumination.

Total dry weight (TDW) is higher in T₂ > T₃ > T₁ > T₄. Lighting systems produced different effects on TDW; a linear relationship between cumulative intercepted PAR and tomato dry mass production has been reported (Heuvelink and Donis, 2005; Riga et al., 2008).

S and V seem to be have an acceptable behavior to T₄, although they are not the highest quality plants; they are cultivars that can survive poorly under this quality light. This behavior was mentioned by Gellner et al. (1999) and they explained that the B light supplied by the LED appears to increase the survival of young seedlings such as these ones.

Figures 2 (a) and (b) present the relationship between TDW/TFW and TDW. It can be observed that TDW/total fresh weight (TFW) is related to TDW but not to cultivars and treatments. The plant increases its hardness in relation to the dry material that accumulates. These results agree with those of Miller and Timmer (1997) who found an increase of shoot (99% to 142%) and root (five- to 10-fold) biomass in *Pinus maritima* during hardening.

TDW:TFW ratios close to 0.10 may indicate that the seedling is a better quality one than others that show lower values. Likewise, plants with TDW:TFW close to 0.10 show greater hardening and more successful transplant (Wainwright and Marsh, 1986).

For the LSDW:RDW ratio, no direct effect of light treatment was found among treatments T₁, T₂, and T₃ except in cultivars S, A, D, C, and A₆₁. These cultivars show the highest values in T₁; this can be related to the low level of R, the R:FR ratio, and ultraviolet and PAR radiation (Table 3). Inada (1984) classified growth responses to light qualities into two groups: 1) species in which R inhibits cell elongation more effectively than B; and 2) species in which the response was reversed. Tomato could be considered in the first group. These results agreed with Kurepin et al. (2010) who found wild-type tomato seedlings responded to a low R:FR ratio with increased stem elongation. UVA and UVB can produce changes in reduction of stem length (Mark and Tevini, 1996).

Looking at Table 4 for cultivar I, it is noteworthy that T₄ shows the highest value of LSDW:RDW, as does the TDW, and if we consider the parameter LSDW:RDW, it is curious how this variety is capable of developing its aerial parts very quickly but has slow root development; the plants are not good quality but are survivors. On the other hand, the LSDW:RDW ratio clarifies the status of the seedling. If the values of this parameter are very high, we can deduce that the roots are not developed, so the plant is not getting its water and nutritional needs and because of this, the aerial part will not develop much more (Partida et al., 2007).

Table 5 shows the relationship between aerial and root parts (LSDW:RDW) for all

cultivars for all treatments. In general, the treatments did not affect these parameters, but the intrinsic morphological characteristics of each variety can affect it. 'I', 'C', 'A₆₁', 'V', 'Z', and 'L' are the group with higher values, presenting significantly lower values for other cultivars. A lower value of this parameter involves obtaining a plant with a well-developed root and some tightening; it is important to transplant outdoors (Liptay et al., 1998; Nicola, 1998). Seedlings with a relatively large root system generally suffer less transplant stress and, thus, further growth is anticipated for them than for those with smaller roots (Weston and Zandstra, 1986).

Plant development and indole-3-acetic acid. Endogenous auxin concentration in leaves (Fig. 3) shows significant differences in each variety by treatment (150 test *P* < 0.05). All cultivars under T₂ conditions show the highest auxin concentration and, under T₄, they always show a lower concentration. Most of the cultivars have similar concentrations of auxin in T₁ and T₃. Even in 'D' and 'V', no significant differences in the concentration of auxin among T₁, T₂, and T₃ have been found. Moreover, the concentration of auxin in 'C₆₁' is similar in T₁ and T₂ but T₃ shows a lower concentration. However, 'S' and 'B' have a higher concentration in T₁ than in T₁. These results may be the result of the different sensitivity of different cultivars for different regions of the spectrum (UV, B, R, and FR) to act together. The most important sensi-

tivity is that related to R:FR with a maximum value in T₂ (Table 3), except in the performance of the cultivar D and V. These results are consistent with Kurepin et al. (2007a). They found low R:FR ratios associated with an increase in endogenous IAA levels.

No differences between the concentrations of auxin in T₁ and T₃ were found. We might consider that differences in UV and B applied in both treatments did not modify the synthesis of auxin in most of the cultivars studied. However, the highest concentration of auxin in the Sand B cultivars in T₂ compared with T₁ may involve a high sensitivity to the B and UV region in these cultivars.

In lighting conditions produced by T₄, only nine cultivars survived ('I', 'S', 'D', 'C', 'A₆₁', 'C₆₁', 'V', 'B', and 'M₆'). Under T₄, variety 'I' has the highest value of auxin, but all parameters (Table 4) indicate that seedlings in this treatment are not good quality ones as a result of the low PAR radiation received.

Figure 4 shows the correlations between auxin concentration and TDW, in which all cultivars show a high correlation with both parameters. Correlation is shown by a linear equation and coefficient *R*² = 0.63. This coefficient of determination could be considered good because differential behavior of cultivars is also an important influence. These results agreed with Kurepin et al. (2007b), who found that TDW seedling is associated with endogenous levels of hormones such as auxins, cytokinins, and abscisic acid (Kurepin et al.,

Table 5. LSDW:RDW relationship among cultivars.

Variety/ (LSDW:RDW)	I	S	A	D	C	R	A ₆₁	C ₆₁	V	B	M ₆	M ₃	P	Z	L
I/6.77															
S/5.07	*														
A/5.19	*	*													
D/4.85	*	*	*												
C/6.52	*	*	*	*											
R/5.12	*	*	*	*	*										
A ₆₁ /5.91	*	*	*	*	*	*									
C ₆₁ /5.23	*	*	*	*	*	*	*								
V/6.63	*	*	*	*	*	*	*	*							
B/4.83	*	*	*	*	*	*	*	*	*						
M ₆ /4.93	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*					
M ₃ /4.95	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				
P/4.72	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
Z/5.52	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
L/6.92	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

*Significant differences among varieties according to the statistical analysis (least significant difference test *P* < 0.05) for (LSDW:RDW) parameter.

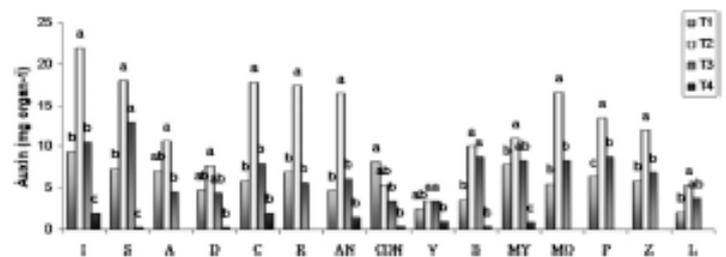


Fig. 3. Auxins concentration in leaves.

auxins shoots: Putative roles for gibberellins, auxin, cytokinins, abscisic acid and ethylene in leaf and internode growth. *J. Exp. Bot.* 58:215-217.

Karepin, L.V., W.-K. Yip, R. Fan, E.C. Young, and D.M. Reid. 2010. The roles and interactions of ethylene with gibberellins in the far-red enriched light-mediated growth of *Solanum lycopersicon* seedlings. *Plant Growth Regulat.* 61:215-222.

Liptay, A., P. Sikkema, and W. Fonteno. 1998. Transplant growth control through water deficit stress: A review. *HortTechnology* 8:540-543.

Magelli, S.C., C. Friso, G. Torti, and G. Sorrosi. 1978. Relationship between set, development and activities of growth regulators in tomato fruits. *Plant Cell Physiol.* 19:1281-1288.

Mark, U. and M. Tevini. 1996. Combination effects of UV-B radiation and temperature on sunflower (*Helianthus annuus* L., cv Polstar) and maize (*Zea mays* L., cv Zenit 2000) seedlings. *J. Plant Physiol.* 148:49-56.

Miller, B.D. and V.R. Timmer. 1997. Nutrient dynamics and carbon partitioning in nutrient loaded *Picea mariana* [Mill.] B.S.P. seedling during hardening. *Scand. J. For. Res.* 12:122-129.

Moreno, R. 1993. Programa de transgénicos introducidos en Hortaliças. *J. Hort.* 8:55-67.

Moreno, R. 2002. Producción Integrada: Un reto científico. *J. Hort.* Extra 1:145-153.

Muir, R.M. and L.-J. Zhu. 2006. Effect of light in the control of growth by auxin and its inhibitor(s) in the sunflower. *Physiol. Plant.* 57:407-410.

Nicola, S. 1998. Understanding root systems to improve seedling quality. *HortTechnology* 8:544-549.

Normanly, I., J.P. Slovin, and J.D. Cohen. 2004. Auxin biosynthesis and metabolism, p. 36-62. In: Davies, J. (ed.). *Plant hormone: Biosynthesis, signal transduction, action*. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, The Netherlands.

Ohyama, K., K. Marabe, Y. Omasu, C. Kubota, and T. Kozai. 2003. A comparison between

closed-type and open-type transplant production systems with respect to quality of tomato plug transplants and moisture consumption during summer. *Env. Control in Biology*, 41:57-61.

Pacheco, R. 2001. Evaluación del efecto de la luz sobre la propagación masiva de *Strawberry* especie via organogénesis. Escuela de Biología, Costa Rica Inst. Tecnol., Cartago, Costa Rica.

Papadopoulos, A.P. and D.P. Omond. 1990. Plant spacing effects on yield of the greenhouse tomato. *Can. J. Plant Sci.* 50:563-573.

Patida, L., T.J. Velázquez, B. Acosta, F. Ayala, T. Díaz, J.F. Izuzua, and J.E. Cruz. 2007. Paclobutrazol y crecimiento de raíz y parte aérea de plántulas de pepino morón y berenjena. *Rev. Fitotec. Mex.* 30:145-149.

Poudel, P.R., I. Kataoka, and R. Mochizuki. 2007. Effect of red- and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 92:147-153.

Raghavara, V. 2008. Some reflections on double fertilization from its discovery to the present. *New Phytol.* 159:565-583.

Rigo, P., M. Anza, and C. Garbasi. 2008. Tomato quality is more dependent on temperature than on photosynthetically active radiation. *J. Sci. Food Agr.* 88:158-166.

Romano, C.P., P.R.H. Robson, H. Smith, M. Estelle, and H. Klee. 1995. Transgenic-mediated auxin overproduction in *Arabidopsis* hypocotyl elongation phenotype and interactions with the *hy5-1* hypocotyl elongation and *axr1* auxin-resistant mutant. *Plant Mol. Biol.* 27:1071-1083.

Sanicewski, M., H. Okubo, K. Miyamoto, and J. Ueda. 2005. Auxin induces growth of stem excised from growing shoot of cooled tulip bulbs. *J. Fac. Agr.* 50:481-488.

Sérvatava, L.M. 2002. Auxins, p. 155-169. In: *Plant Growth and Development: hormones and environment*. Academic Press, New York.

Stær, C., R. Taggart, C.A. Eves, and L. Stær. 2004. *Biología: La unidad y diversidad de la vida*. 12th Ed. Cengage Learning, Mexico.

Sandoz, V. 2000. Light in elementary biological interactions. *Prog. Quantum Electron.* 24:187-238.

Tanesson, D.J., R.J. Bala, and T.D. Sharkey. 1994. Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation. *Photosynth. Res.* 44:261-269.

Thomson, R.M. and K.V. Thimann. 1967. Transient effects of light on auxin transport in the *Avena* coleoptile. *Plant Physiol.* 42:247-257.

Tien, T.M., M.H. Gaskin, and D.H. Hulbert. 1979. Plant growth substance produced by *Aspergillus brasiliensis* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). *Appl. Environ. Microbiol.* 37:219-226.

Toffno, A., H.M. Romero, and H. Coballos. 2007. Effect of abiotic stress on starch, synthesis and degradation. A review. *Agrociencia Colombiana* 25:246-254.

Veglio, A. 2010. The shade avoidance syndrome: A non-Markovian stochastic growth model. *J. Theor. Biol.* 264:722-728.

Wainwright, H. and J. Marsh. 1986. The micro-propagation of watercress (*Rorippa nasturtium-aquaticum* L.). *J. Hort. Sci.* 61:251-256.

Weaver, R. 1998. Reguladores de crecimiento de las plantas en la Agricultura. California Univ. Press, Davis ed. Tillam, Chipping, Mexico.

Wetton, L. and B. Zandstra. 1986. Effect of roots container size and location of production on growth and yield of tomato transplants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111:498-501.

Yi, H.G. and T.J. Guilfoyle. 1991. An auxin responsive promoter is differentially induced by auxin gradients during topisms. *Plant Cell* 3:1167-1175.

Zeiger, E. and L. Taiz. 2007. *Plant physiology*. 3rd Ed. Universitat Jaume I, Castelló.

Zeng, J., Q. Wang, J. Liu, K. Deng, D. Tang, X. Zhao, and X. Liu. 2009. The effects of cryptochrome photoreceptors on root growth in *Arabidopsis*. *A.E. J. Biotechnol.* 8:3179-3183.

Karin-Neumann, R. 2003. Genomic and early cryptochrome 1 for auxin and gibberellin growth by blue light. *Plant Physiol.* 133:111-119.

U. L. Vezina, and A. Od and PPF influence greenhouse-grown lettuce. *Plant Physiol.* 133:111-119.

N. Christoph. 1999. *El vino VIII*. La J. *Almansa*. 2007. Algunas el cultivo del tomate de su manejo. *Almansa*

... and IAA oxidase in cuttings of three ... of 24.97-10.1. *Photosynthesis: Studies in*. Press, Cambridge.

... 2004. Integrated in greenhouse tomato *Science* 6:59-295-300.

Kester. 1983. *Plant and practices*. 4th Ed. Cliffs, NJ.

F.T. Davies, and R.L. Pagnotta: Principles *Intelligence Hall*, Engle-

... 2005. *Tomatoes*. CABI Publishing,

Light treatments applied generate significant differences in the FW and DW of organs and plant as well as the concentration of auxin in leaves.

T₄ applied irradiation is under compensation point and it is insufficient for the survival of cultivars Adelfino, Rambo, Montenegro, Prodigy, Zayno, and Lynna.

The TDW:TFW ratio may be related to TDW presenting the same trend regardless of the treatments received and the cultivar concerned.

The LSDWRDW ratio has neither significant correlation with treatments nor with the endogenous concentration of auxin in leaves.

The concentration of auxins differs significantly in terms of lighting treatments applied, being highest in T₂ for all cultivars; this could be related with a low R:FR ratio. Different responses in auxin concentration in T₂ and T₁ are presented for cultivars and could be related to the different sensitivity of cultivars to UV and B fraction of light received. A significant correlation between auxin concentration and TDW produced has been found.

T₂ characterized for the lowest PAR:NIR, B:R, B:FR, and R:FR provides adequate light quantity and quality for all cultivars within the parameters RDW, TDW, TDW:TFW, and LSDWRDW.

Literature Cited

Akhari, G., S.A.M.M. Saravay, and S. Yousefzadeh. 2007. Effect of auxin and salt stress (NaCl) on seed germination of wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Pak. J. Biol. Sci.* 10:2557-2561.

Holmer, J. and F. Hangerth. 1988. Cell number, cell size and hormone levels in semi-isogenic mutants of *Lycopersicon pimpinellifolium* differing in fruit size. *Plant Physiol.* 72:316-320.

Briggs, W.R. 1963. Red light, auxin relationships and the phototropic response of corn and oat coleoptiles. *Amer. J. Bot.* 50:196-207.

Buitem, H.J. and J.G.P.W. Clevers. 1993. *Land observation by remote sensing: Theory and applications*. Gordon and Breach Science Publishers, The Netherlands.

Campbell, N.A., L.G. Mitchell, and J.B. Reece. 2001. *Biology: Concepts & connections*. 3rd Ed. Pearson Education, Mexico.

Campbell, N.A. and J.B. Reece. 2007. *Biology*. 7th Ed. Editorial. Médica Panamericana, Madrid, Spain.

Carbonell X. 1995. Seed, seedling and pattern. *Horticultura* 106.

Castilla, N. 2005. *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.

Cleland, R. 2004. Auxin and cell elongation, p. 204-220. In: Davies, J. (ed.). *Plant hormone: Biosynthesis, signal transduction, action*. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, The Netherlands.

Dinac, M. and J. Radich. 1985. Effect of heat stress on assimilate partitioning in tomato. *Am. Bot. (Lond.)* 56:239-248.

Dougher, T.A.O. and B. Bugbee. 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue light radiation. *Photochem. Photobiol.* 73:199-207.

el Ahmedi, B. and M.S. Allen. 1979. Reproductive responses of heat tolerant tomatoes to high temperatures. *J. Amer. Hort. Sci.* 104:696-691.

Emery, Y. 1989. *Citrus fruit set: Carbohydrate, hormone, and leaf mineral relationship*, p. 233-242. In: Wright, C.J. (ed.). *Manipulation of fruiting*. Butterworths, London, UK.

Event, R.F. and S.E. Eichhorn. 1992. *Biol. Plant* 2. 4th Ed. Reverte, Barcelona, Spain.

... and transducers blue light photoreceptors, p. 327-350. In: Kendrick, R.E. and G.H.M. Kronenberg (eds). *Photomorphogenesis in plants*. 2nd Ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Hoyos, P. 1990. *The last in horticulture seedlings (II)*. Horticultura 54.

Inada, K. 1984. *Photomorphogenesis: Light and plant growth*. Yokendo, Tokyo, Japan.

Jensen, P.J., R.P. Hangerter, and M. Estelle. 1998. Auxin transport is required for hypocotyl elongation in light-grown but not dark-grown *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 116:455-462.

Jones, J.B. 2008. *Tomato plant culture: in the field, greenhouse, and home garden*. 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis Group, p. 19-21; 56-60; 341.

Kasperbauer, M.J. and R.E. Wilkinson. 1995. Methyl surface color affects accumulation of epicuticular wax on developing leaves. *Photochem. Photobiol.* 62:940-944.

Karepin, L.V., R.J.N. Emery, C.C. Chinnappa, and D.M. Reid. 2008. Light irradiance differentially regulates endogenous levels of cytokinins and auxin in alpine and prairie genotypes of *Stellaria longipes*. *Physiol. Plant.* 134:624-635.

Karepin, L.V., R.J.N. Emery, R.P. Pharis, and D.M. Reid. 2007a. Uncoupling light quality from light irradiance effects in *Helianthus annuus* shoots: Putative roles for plant hormones in leaf and internode growth. *J. Expt. Bot.* 58:2145-2157.

Karepin, L.V., R.J.N. Emery, R.P. Pharis, and D.M. Reid. 2007b. The interaction of light quality and irradiance with gibberellins, cytokinins and auxin in regulating growth of *Helianthus annuus* hypocotyls. *Plant Cell Environ.* 30:147-155.

Karepin, L.V., R.J.N. Emery, R.P. Pharis, and D.M. Reid. 2007c. Uncoupling light quality from light irradiance effects in *Helianthus*

ANEXO II. ENCUESTA

ENCUESTA A ENTIDADES DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Fecha:

Nombre de la entidad:

Provincia: Municipio:

Nombre de la persona entrevistada:

1. ¿Emplean luz artificial en su sistema de producción? Si / No

A. No

B. Si -En caso de que utilice luz artificial:

1. 1. La utiliza para:

Iluminación de asimilación (iluminación complementaria para aumentar la producción y mejora de la calidad) INJERTOS

Cultivo sin luz solar.

Cultivo multicapa.

Iluminación fotoperiódica (para controlar la floración).

2. 2. Tipo de lámpara y potencia de la lámpara:

Incandescente:

Fluorescente:

Sodio de alta presión:

Halogenuros metálicos:

Otras:

2. ¿Dispone de electricidad en su explotación? (marcar con X o subrayar)

A. Si

Red de alta tensión

Transformador propio

Transformador compartido

Transformador de terceros

Red de baja tensión (urbana o industrial)

Generador o grupo electrógeno

¿Qué usos tiene la energía eléctrica en su explotación?

Automatismo de riego o fertirrigación

Automatismos de ventilación

Ventilación forzada

Bombeo de agua de riego

Iluminación artificial de las plantas

Iluminación general

Calefacción

Otros usos

Gasto eléctrico medio anual de su explotación

B. No

¿Le interesa la posibilidad de alimentación eléctrica mediante sistemas de energía solar fotovoltaica, en los casos que no exista red eléctrica? Si / No

3.- Características del invernadero

Tipo de estructura (marcar con X)

Macrotúnel

A dos aguas o en Capilla

Asimétricos

Plano o parral

Umbráculo

Otros

Material de estructura (marcar con X)

Madera

Acero (galvanizado)

Mixto (acero-madera) Otros

Número de módulos

Superficie del invernadero (m²)

Material de cubierta

Sustrato (marcar con X)

Suelo natural Enarenado

Sustrato inerte (lana de roca, perlita, sacos)

Hidropónico

Otros

Sistema de riego (marcar con X)

Goteo

Aspersión

Mixto goteo y aspersión

Otros

Sistema de calefacción (marcar con X)

Lecho caliente

Radiadores (tuberías de agua caliente elevadas o similares)

Aire caliente (cañones o tubos perforados)

Otros

Sistema de climatización

Seguimiento de temperatura y humedad

¿Dispone de instrumentos de medida de temperatura/humedad? Si/No

Doble cubierta

Pantalla térmica

Ventilación-aspiración forzada

Apertura cenital

Apertura lateral

Microaspersión para control de temperatura

Riego exterior de cubierta

Mallas de sombreado

Encalado

4. Especies vegetales que se cultivan

-
-
-
-
-

5. En caso de contar con sistemas de calefacción. ¿Qué tipo de energía utiliza en su calefacción? (marcar con X o subrayar)

Gasóleo (A, B o C)

Fueloil

Gas

Eléctrico

Otros

6. ¿Tiene previsto realizar mejoras en su invernadero? (marcar con X o subrayar)

A. Si

Estructura del invernadero Tipo.....

Calefacción

Sistema de riego

Aumento de la superficie.....m²

Iluminación

Pantalla térmica

Pantalla lumínica

Otra

B. No