



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS ALIMENTOS
PROGRAMA DE POSGRADO EN ALIMENTOS DEL
CENTRO DE LA REPÚBLICA (PROPAC)

“Estudio del efecto de la calidad de luz sobre la síntesis y la acumulación de
licopeno en frutos de tomate cultivados en invernadero”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Doctor en ciencias

Presenta:

Lorenzo Jarquín Enríquez

Dirigido por:

Edmundo Mercado Silva

SINODALES


Dr. Edmundo Mercado Silva
Presidente

Dr. Eduardo Castaño Tostado
Secretario

Dr. Javier López Baltazar
Vocal

Dra. Guadalupe Malda Barrera
Suplente

Dr. Jose Luis Maldonado Barrera
Suplente


M.S.P. Sergio Pacheco Hernández
Director de la Facultad de Química


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio, 2013

RESUMEN

En nuestra dieta, el tomate (*Solanum lycopersicum*) es la principal fuente de compuestos antioxidantes como el licopeno involucrados en la prevención de enfermedades crónicas como el cáncer. El contenido de este compuesto y su color son los principales factores que determinan la calidad, de este fruto. La síntesis de licopeno es controlada por factores genéticos y medio ambientales como la luz y la temperatura, los cuales pueden ser modificados para incrementar el contenido de este componente en los frutos. La producción en invernadero permite hasta cierto punto manipular dichas condiciones ambientales para provocar los efectos en calidad deseados. La presente investigación se llevó a cabo en 2 etapas: En la primera se comparó, en diferentes periodos de producción, la acumulación de licopeno y el desarrollo de color de frutos de tomate cv. 'Gerónimo' en diferentes estados de madurez cultivados bajo dos tipos de cubierta de invernadero (polietileno de doble capa K50 Clear + K50 IR / AC ó vidrio de 4 mm de espesor cubierto con una solución de CaCO₃ al 15 %). En la segunda etapa se estudiaron las fuentes de luz y los tiempos de exposición de los frutos para identificar las mejores condiciones de esos factores que incrementarían el contenido de licopeno en los frutos de tomate durante su almacenamiento poscosecha. La primera etapa, se realizó en ocho invernaderos comerciales cubiertos con las cubiertas bajo estudio; a las 21, 25 y 29 semanas después del trasplante (Enero, Febrero y Marzo), 24 racimos de tomate fueron etiquetados en cada invernadero. Tres semanas después del etiquetado, los frutos fueron cosechados, clasificados por estado de madurez y analizados el índice de color y el contenido de licopeno. Datos de temperatura interna, luz externa e internas, fueron recolectados a través de una estación meteorológica ubicada en el sitio experimental. Nuestros resultados indicaron que la estación de producción y las condiciones de luz y temperatura en el invernadero, afectaron el proceso de síntesis de licopeno: el contenido de licopeno incrementó cuando el fotoperiodo aumentó; en la semana 32 el contenido fue mayor en los frutos cosechados en invernaderos con polietileno de doble capa (414 µg g⁻¹ fruto liofilizado) respecto de los frutos cosechados bajo cubierta de vidrio con CaCO₃ (241 µg g⁻¹ fruto liofilizado). En la segunda etapa, frutos de tomate en estado verde maduro fueron cosechados y expuestos a 2 diferentes tratamientos de luz (roja y azul) proporcionadas por 2 lámparas, alta presión de sodio (HPS) y halogenuros metálicos (MH), durante 0, 10, 60 ó 240 minutos día⁻¹ y almacenados a 20 °C hasta su completa madurez. Los frutos tratados con luz roja por 60 min día⁻¹ contenían más licopeno (599.0 µg g⁻¹) que los frutos madurados en oscuridad (538.0 µg g⁻¹) o luz azul. Los tratamientos de luz no modificaron la textura o el contenido de sólidos solubles pero mejoró el color de los frutos

Palabras claves: *Solanum lycopersicum*, cubierta de invernadero, luz, color, contenido de licopeno.

SUMMARY

Color and lycopene content in tomato fruit (*Solanum lycopersicum*) are the main factors that determine their quality, also this fruit is the principal source of antioxidant compounds involved in the chronic diseases prevention like cancer. The lycopene biosynthesis is controlled by genetic and environmental factors like light and temperature which could be modified to increase the content of this compound in the fruits. This research was divided in two experiments: 1.- To compare color development and lycopene accumulation in tomato fruits cv 'Geronimo' at different maturity stages, grown in greenhouses covered with two types of covers: (double-layer polyethylene K50 Clear + K50 IR / AC or flat glass 4 mm thick coated with a 15% CaCO₃ solution) in different periods of production and 2.- To identified the best source of light and exposure time to increase the content of lycopene in tomato fruits during their post-harvest storage. In the first experiment 24 clusters of tomatoes from 21, 25 and 29 weeks after transplanting were labeled per experimental unit. Three weeks after labeling, tomato fruits were harvested, sorted by maturity, and analyzed for color index and lycopene content. External and internal temperatures and light data were recorded through a meteorological station. Our results suggested that the season of production, temperature and lighting conditions in the greenhouse, affected the lycopene biosynthesis process. Lycopene content increased as the photoperiod was expanded and at the 32nd week, was higher in fruits collected in greenhouses with double layer of polyethylene (414 μg g⁻¹ freeze-dried fruit) than that in fruits grown under a covered with flat glass coated with CaCO₃ (241 μg g⁻¹ freeze-dried fruit). In the second experiment, tomato fruits were harvested in mature green stage and submitted at two light sources (red and blue) provided by two types lamps, High Pressure Sodium (HPS) and metal halide (MH), for 0, 10, 60 or 240 min day⁻¹ and stored at 20 °C until full maturity. Fruit treated with red light for 60 min day⁻¹ had a higher lycopene content (599.0 μg g⁻¹) than the fruit ripened in darkness (538.0 μg g⁻¹) or blue light. The light treatment did not modify the texture or SSC (soluble solids content) but improved the red color and lycopene content of the fruits.

Key words: *Solanum lycopersicum*, greenhouse cover, light, color, lycopene content.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Horticultura protegida y su importancia comercial.	4
2.2. Generalidades de los invernaderos	5
2.3. Importancia mundial y nacional del tomate	6
Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP (2011).....	8
2.4. Aspectos generales del licopeno en tomate.	8
2.4.1. Síntesis de carotenoides	9
2.4.2. Fotorreceptores	13
2.5. Factores que afectan la síntesis y acumulación de licopeno	14
2.5.1. Sistema de cultivo	14
2.5.2. Factores ambientales	15
2.5.2.1. Temperatura	16
2.5.2.2. Luz.....	16
2.5.3. Estado de madurez y cosecha	21
III. HIPÓTESIS DE TRABAJO	23
IV. JUSTIFICACIÓN	24
V. OBJETIVOS	25
VI. MATERIALES Y METODOS	26
6.1. Evaluación en campo del efecto de los tipos de cubierta de invernadero sobre la acumulación de licopeno.....	26
6.1.1. Material vegetal y configuración experimental	26
6.1.2. Descripción de los invernaderos	27
6.1.3. Datos climáticos durante la evaluación	27
6.1.4. Características de la luz espectral transmitida por las cubiertas.....	28
6.1.5. Cosecha y clasificación de los frutos.....	28
6.1.6. Color.....	29
6.1.7. Extracción de Carotenoides	29
6.1.8. Cuantificación de licopeno	30
6.1.9. Análisis estadístico	30
6.2. Evaluación y selección de fuentes de luz	31
6.2.1. Papel celofán y vidrio	31
6.2.1.1. Maduración de frutos en cámara	31
6.2.1.2. Determinación de color y licopeno.....	31
6.2.2. Diodos emisores de luz (LEDS)	32

6.2.2.1. Maduración de frutos en cámara	32
6.2.2.2. Determinación de color y licopeno	32
6.2.3. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)	32
6.2.3.1. Maduración de frutos en cámara	33
6.2.3.2. Determinación de color y licopeno	33
6.3. Efecto de la duración de la intensidad de la luz sobre la síntesis de licopeno.	33
Para determinar si la síntesis de licopeno es dependiente de la duración del tiempo de exposición a la luz, se utilizaron las lámparas de HID que fueron con las que mejores resultados se obtuvieron en el punto 6.2.	33
6.3.1. Material Biológico	33
6.3.2. Maduración de frutos en cámara.....	34
6.3.3. Análisis estadístico.....	35
6.4. Comparación de la evolución de color y licopeno en frutos madurados en poscosecha con luz vs. frutos madurados en oscuridad	35
6.4.1. Material Biológico	35
6.4.2. Maduración de frutos en cámara.....	35
6.4.3. Análisis estadístico.....	36
VII. RESULTADOS Y DISCUSION	37
7.1. Evaluación en campo del efecto de los tipos de cubierta de invernadero sobre la acumulación de licopeno.....	37
7.1.1. Espectros de transmisión de luz a través de las cubiertas del invernadero	37
7.1.2. Datos climáticos durante la evaluación	38
7.1.2.1. Temperatura	38
7.1.2.2. Luz.....	39
7.1.3. Mediciones del color y contenido de licopeno durante la maduración del fruto	41
7.1.4. Relación del fotoperiodo con la acumulación de licopeno.....	44
7.2. Evaluación del efecto de la fuente de luz en el desarrollo de color y acumulación de licopeno.	46
7.2.1. Selección de medios para crear un ambiente espectral de luz.	47
7.2.1.1 Espectros de transmitancia de papel celofán de diferentes colores	47
7.2.1.2. Desarrollo de color y acumulación de licopeno bajo el espectro de luz con filtros de celofán.	48
7.2.2. Diodos emisores de luz	50
7.2.2.1. Espectros de emisión de luz.....	51
7.2.2.2. Cambios de color y contenido de licopeno de frutos bajo luz de diferentes LEDs	52
7.2.3. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)	55
7.2.3.1. Espectros de lámparas HID.....	55
7.2.3.2. Desarrollo de color y contenido de licopeno bajo el espectro de luz de lámparas HID.....	56

7.2.4. Efecto de la duración del tiempo de exposición a las fuentes de luz sobre la síntesis de licopeno	57
7.2.4.1. Acondicionamiento de las cámaras para el desarrollo de los experimentos.	57
7.2.4.2. Correlación índice color con contenido de licopeno.....	61
7.2.5. Cambios de color y contenido de licopeno durante la maduración de frutos tratados con luz roja y en oscuridad.....	62
VIII. CONCLUSIONES	67
IX. LITERATURA CITADA.....	69

ÍNDICE DE CUADROS

Datos estadísticos nacionales de producción, rendimiento y valor de la producción de tomate cultivado en invernadero.	8
Diseño del experimento para determinar el efecto de la duración de la exposición a diferentes tipos de luz y diferentes periodos de tiempo, sobre la acumulación de licopeno en frutos de tomate.	34
Comparación del índice de color (a^*/b^*) de frutos de tomate en diferentes estados de madurez cultivados en invernaderos con cubierta de polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3	42
Comparación del contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ de tejido liofilizado) de frutos de tomate en diferentes estados de madurez cultivados en invernaderos con cubierta de polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3	43
Relación entre contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ tejido liofilizado) de frutos de tomate en estado de madurez rojo maduro cultivados en invernaderos con cubierta de polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3 ., y el fotoperiodo en el área de estudio.	44
Contenido de sólidos solubles ($^\circ\text{Brix}$), textura (N), color (a^*) y el contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ tejido liofilizado) en frutos de tomates cv. WV63 madurados en diferentes condiciones de luz	50
Color superficial (a^*) y contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ fruto liofilizado) en frutos de tomates madurados en diferentes condiciones de luz 20°C	53
Valores de color superficial a^* de frutos de tomates cv. WV63 madurados en diferentes condiciones de luz: alta presión de sodio (HPS) para luz roja y halogenuros metálicos (MH) para luz azul, tratamiento de oscuridad como control. Los tratamientos de luz fueron por 60 minutos.	56
Contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ fruto liofilizado) en frutos de tomate cv. WV63 madurados en diferentes condiciones de luz: alta presión de sodio (HPS) para luz roja y halogenuros metálicos (MH) para luz azul, tratamiento de oscuridad como control. Los tratamientos de luz fueron por 60 minutos.	57
Índice de color de frutos de tomate expuestos a dos diferentes Fuentes de luz: azul (lámpara de halogenuros metálicos MH) y rojo (lámpara de alta presión de sodio HPS) por 0,10, 60 y 240 minutos por día almacenados 11 días a 20°C	59

Contenido de licopeno de frutos de tomate expuestos a dos diferentes Fuentes de luz: azul (lámpara de halogenuros metálicos MH) y rojo (lámpara de alta presión de sodio HPS) por 0,10, 60 y 240 minutos por día almacenados 11 días a 20°C 59

Efecto de la maduración de frutos de tomate expuestos luz roja (HPS) por 60 minutos por día u oscuridad por 11 días a 20°C ± 2, sobre la firmeza, contenido de sólidos solubles (SSC), índice de color y licopeno. 62

ÍNDICE DE FIGURAS

Cambios en la concentración de pigmentos en frutos de tomate durante la maduración (cv.Homestead). 1. Licopeno; 2. Fitoeno; 3. β -caroteno; 4. Fitoflueno; 5. γ -caroteno; 6. δ -caroteno. Estados de madurez: A. verde maduro; B. Rompiente; C. Cambiante; D. rosa; E. Naranja; F. Rojo. (Davies y Hobson, 1981).	10
Ruta de biosíntesis de carotenoides en plantas. DOXP (1-deoxi-D-xilulosa 5-fosfato); MEP (2C-metil-eritritol- 4-fosfato; GA-3-P (gliceraldehido 3-fosfato);CDP-MEP (4-difosfocitidil-2C-metileritritol); CDP-ME- 2-P (4-difosfocitidil-2C-metileritrol 2-fosfato); MECDP (2C-metil-D-eritrol 2,4-ciclodifosfato); DMAPP, (dimetilalil difosfato); IPP (isopentenil difosfato); CrtL-e (licopeno ϵ -ciclase; CrtL-b, licopene β -ciclase). Adaptada de Bramley (2002).	12
Espectro de acción a diferentes tiempos para la respuesta morfogénica de alta intensidad (Ting, 1982).....	14
Ángulo del sol con el horizonte a las 7:00 y 14:00 horas durante el ciclo productivo 2003-2004, en el estado de Querétaro.....	18
Radiación energética para diversos ángulos del sol con el horizonte, las líneas punteadas, muestran el rango de la radiación fotosintéticamente activa.	18
Temperaturas internas: diurnas promedio (a), promedio 24 h (b), nocturnas promedio (c) y diferencias diurna/nocturna (d) de invernaderos cubiertos con polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 cubierto con 15% CaCO_3	39
Intensidad de luz externa e interna de invernaderos cubiertos con polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3	40
Índice de color y contenido de licopeno de frutos de tomate en diferentes estados de madurez cultivados en invernaderos cubiertos con polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3	41
Espectro de transmitancia del papel celofán rojo y azul + rojo.....	48
Apariencia de los frutos de tomate expuestos a diferentes tratamientos con luz blanca, papel celofán rojo como filtro de luz roja, papel celofán rojo-azul como filtro de luz azul y oscuridad.....	49
Espectros de emisión de tres LEDs (Diodos emisor de luz) empleados como fuentes de luz en este trabajo.	51

Las características espectrales de estos LEDs permitieron utilizarlos para realizar estudios más controlados sobre los efectos de esas fuentes de luz en el desarrollo de color y acumulación de licopeno.	52
Apariencia de los frutos de tomate madurados con diferentes tratamientos de luz utilizando lámparas LEDs y madurados en oscuridad como control.	52
Espectros de energía relativa para las lámparas de alta intensidad HID, halogenuros metálicos (a) alta presión de sodio HPS (b).	55
Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) en 2 cámaras de maduración, cada una con una fuente de luz: alta presión de sodio (HPS) y halogenuros metálicos (MH). Se muestra la distribución de las cajas con frutos de tomate para diferentes tiempos de exposición. (Oscuridad, 10, 60 y 240 min).	58
Regresión lineal del índice de color a^*/b^* y contenido de licopeno de frutos de tomate expuestos a tratamientos de luz o almacenados en oscuridad a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	61
Cambios en el índice de color de frutos de tomate expuestos a luz roja (HPS) por 60 minutos por día u oscuridad durante 11 días a $20^{\circ}\text{C} \pm 2$	64
Cambios en el contenido de licopeno de frutos de tomate expuestos a luz roja (HPS) por 60 minutos por día u oscuridad por 11 días a $20^{\circ}\text{C} \pm 2$	65

I. INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos con altos rendimientos, a menores costos y con alta calidad es uno de los retos más importantes que enfrenta el mundo. La producción agrícola bajo sistemas protegidos ha hecho más eficiente el uso de los recursos para la producción así como también ha permitido el uso de avances tecnológicos que permiten manipular el ambiente del cultivo para hacer más eficientes los sistemas de producción. En estos sistemas es común el uso de sistemas computacionales que permiten un control eficiente del contenido de CO₂ para optimizar la función fotosintética de la planta, el control de la temperatura (a través de la apertura automática de ventanas) así como la frecuencia de riegos que permiten un control más preciso de los nutrientes al cultivo y de la transpiración del mismo. No obstante, el control de los niveles de iluminación dentro de los invernaderos solo se había abordado parcialmente. A partir de las dos últimas décadas del siglo pasado y lo que lleva el presente siglo, la investigación en este aspecto ha sido muy intensa y actualmente se aborda de manera consistente el mejorar las características de las cubiertas para mejorar las condiciones ambientales al interior del invernadero.

El color del tomate es el factor más importante de calidad para el consumidor y la industria y está determinado principalmente por el contenido de licopeno, este compuesto representa alrededor del 83% del total de los pigmentos de los frutos, siendo también el carotenoide más abundante que constituye aproximadamente el 90 % de todos estos compuestos en frutos maduros.

Los rendimientos de producción por unidad de superficie en el cultivo de tomate en invernaderos es 5 veces mayor que la registrada por las producciones a cielo abierto; no obstante, bajo producciones a cielo abierto, el contenido de licopeno de esos frutos es tres veces mayor respecto de los frutos cultivados en

invernaderos. La explicación que se ha dado a este hecho es que el nivel de luz (intensidad y longitud de onda) interceptada por cada una de las cubiertas de invernadero es alta y esto afecta la síntesis de carotenoides y también se ha indicado que hay una interacción con altas temperaturas dentro del invernadero, las cuales tienen un efecto negativo en el proceso de síntesis y acumulación de licopeno.

Existen diferentes tipos de invernaderos que se ajustan de acuerdo a las condiciones climáticas de la región donde se instalarán así como de los requerimientos climáticos del cultivo. Estas diferencias entre invernaderos se dan de acuerdo al tipo de estructura que se utilizará o al tipo de cubierta de cerramiento. Las propiedades aislantes del material de cubierta del invernadero, genera un micro ambiente particular que afecta directamente la intensidad y longitudes de onda de luz al interior del mismo invernadero, así como la humedad relativa, la temperatura del aire interior y la temperatura de la hoja de la planta. Además de estos factores que son afectados por las cubiertas, también es importante considerar que la transmitancia de luz que tienen los tipos de cubierta a las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm requeridas para la fotosíntesis, puede ser variable y por tanto puede afectar de forma diferencial la eficiencia de esta actividad fisiológica de la planta y por tanto también afectar directamente el volumen y calidad de la producción.

Se ha demostrado que tanto la intensidad (cantidad) y longitudes de onda (calidad) de luz así como la temperatura ambiental tienen un efecto importante sobre la síntesis y acumulación de licopeno en frutos de tomate, sin embargo, estos cambios de contenido de licopeno aún no han quedado del todo explicados, puesto que algunos autores lo atribuyen a la longitud de onda de luz roja y roja lejana y otros además mencionan a la luz azul, estos tres tipos de longitudes de onda de luz influyen directamente en la activación de los fitocromos localizados en los frutos, que son moléculas reguladoras de la acumulación del licopeno en el pericarpio del fruto de tomate durante la maduración.

Otros autores mencionan que el proceso de acumulación de licopeno afectado por la luz, también es dependiente del tiempo de exposición a los que se someten los frutos a las longitudes de onda que genera la acumulación de licopeno.

Es importante hacer notar que dadas las fluctuaciones de altura en el horizonte que tiene el sol (la fuente de luz) durante el año en diferentes latitudes geográficas; es lógico pensar que también hay una variación en la intensidad lumínica que llega a las cubiertas de los invernaderos en diferentes épocas del año generando también un patrón de acumulación de licopeno que estará a su vez afectado por las características de transmitancia a la luz que tengan las cubiertas utilizadas.

No obstante lo anteriormente expuesto, hasta el presente solo se han establecido las diferencias de contenido de licopeno en tomates cultivados a cielo abierto así como de tomates de invernadero; pero no se han realizado estudios de cómo las longitudes de onda de luz se ve modificada durante las diferentes estaciones del año en un ciclo de cultivo, ni como las distintas cubiertas al ser también modificadoras de las longitudes de onda de luz afectan el contenido de este carotenoide

En nuestro medio, la información técnica respecto de los efectos de diferentes tipos de cubiertas en la calidad de luz obtenida al interior de los invernaderos y de como esa calidad de luz altera la síntesis de licopeno y el color de los frutos es muy escasa; por ello el presente trabajo pretende dar las bases para entender las relaciones entre las longitudes de onda de luz y proceso de acumulación de licopeno con el fin de mejorar la tecnología de producción de tomate de invernadero ya que aumentando el contenido de licopeno de los frutos, se mejora el color del fruto y por lo tanto el valor como alimento nutraceútico del tomate.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Horticultura protegida y su importancia comercial.

Existen muchas definiciones y conceptos acerca de la producción de hortalizas en invernaderos, algunos la conocen simplemente como producción en invernaderos, otros como agricultura protegida, horticultura protegida etc., pero según la SAGARPA (2012) se refieren a la “Actividad que se realiza bajo métodos de producción que ayudan a ejercer determinado grado de control sobre los diversos factores del medio ambiente. Permitiendo con ello minimizar las restricciones que las malas condiciones climáticas ocasionan en los cultivos”

De acuerdo al nivel tecnológico, los invernaderos se pueden clasificar en tres niveles: aquellos de bajo nivel tecnológico los cuales se caracterizan por ser completamente dependientes del ambiente y usan tecnologías simples y similares a las utilizadas en cultivo a cielo abierto; aquellos de tecnología media los cuales son semiclimatizados, se realizan riegos programados, y utilizan suelo o hidroponía; y finalmente aquellos de tecnología alta que forman instalaciones con climatización automatizada permitiendo mayor independencia del clima externo, riegos automatizados, inyecciones de CO₂, uso de sustratos (De Rijk, 2008)

Según la SAGARPA (2012) en el país existen alrededor de 20 mil hectáreas bajo agricultura protegida de las cuales aproximadamente 12 mil son de invernadero y las otras 8 mil corresponden a malla sombra y macro túnel principalmente. El 50% de la superficie con agricultura protegida se concentra en cuatro estados: Sinaloa (22%), Baja California (14%), Baja California Sur (12%) y Jalisco (10%). Los principales cultivos que se producen bajo agricultura protegida son el jitomate (70%), pimiento (16%) y pepino (10%). En los últimos años se ha intensificado la diversificación de cultivos como la papaya, fresa, chile habanero, flores, plantas aromáticas.

Tomando en consideración los datos de producción de SAGARPA 2011, el cultivo de tomate en México, se realizó en un total de 57 000 hectareas, esto significa que aproximadamente un 35 % de la superficie dedicada a este cultivo (el más importante de las hortalizas) está siendo utilizada por invernaderos.

El sistema integral de información de la Universidad de Colima y con datos de FAOSTAT y del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (http://siic.ucol.mx/Archivos_prov%5CProducciondeTomateenInvernadero.pdf) señalan que las exportaciones en el año 2007 de tomate fresco a los estados Unidos satisfacían el 85 % de las importaciones de los Estados Unidos y que dentro de esta actividad, el crecimiento de las importaciones de tomate de invernadero se habían duplicado en el periodo 2000-2007 mientras que las importaciones de tomate de cielo abierto solo lo habían hecho en 1.5 veces. Esto señala la importancia que está adquiriendo la producción de esta hortaliza en ambientes protegidos.

2.2. Generalidades de los invernaderos

En la norma mexicana NMX-E-255-CNCP-2008, un invernadero está definido como una construcción agrícola de estructura metálica usada para el cultivo y/o protección de plantas, con cubierta de película plástica traslúcida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior. Los invernaderos pueden contar con un cerramiento total de plástico o de plástico en la parte superior y malla en los laterales.

La elección de un tipo de invernadero para un cultivo determinado, está en función de una serie de aspectos técnicos tales como las exigencias bioclimáticas del cultivo, y las características climáticas de la zona o área geográfica (Matallana,

y Montero 1995). Las relaciones existentes entre las características físicas del invernadero y los elementos del clima, permiten diseñar el invernadero en función de las necesidades fisiológicas de la planta. Según Fernández y col. (1992) el material de la cubierta y la forma del invernadero son los dos aspectos de construcción más importantes.

El material de cubierta del invernadero constituye el agente generador del clima interior del invernadero y este clima interior dependerá obviamente del clima natural de la zona donde se construya dicho invernadero. Las propiedades aislantes y la transmitancia de luz del material de cubierta afectan la temperatura interior de invernadero, de la hoja, y la humedad relativa (Noble y Holder, 1989; Papadopoulus y Hao, 1997) generando un microclima particular con efectos significativos sobre el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo (Papadopoulus y Hao, 1997; Dorais y col., 2002).

Para el desarrollo óptimo de las plantas se requiere que las cubiertas dejen pasar las longitudes de onda entre 400 a 700 nm que es la región de luz fotosintéticamente activa. En este intervalo, la energía de la luz se transfiere a los productos fotosintetizados (Matallana y Montero, 1988) y por ello influyen directamente sobre el crecimiento y la calidad de los productos. Los materiales que se utilizan en las cubiertas de los invernaderos dejan pasar distintos porcentajes de esas longitudes de onda con efectos diferenciales para cada una de ellas.

2.3. Importancia mundial y nacional del tomate

La importancia del tomate a nivel mundial radica en la amplia diversidad de usos que tiene en la alimentación de prácticamente todos los grupos de población humana, quienes lo utilizan como componente principal de muchas comidas, para agregar o añadir sabor o para ser utilizado en fresco, en salsas, purés, pastas,

jugos, etc. (Ocaña, 2004). Esta amplia demanda se debe también al amplio rango de climas y sistemas de cultivo donde puede producirse, ya que puede ser cultivado tanto en climas fríos como tropicales (Bringas, 2004), así como a cielo abierto o en invernaderos (Atherton y Rudich, 1996). Esto le ha dado un alto valor comercial, que genera altos volúmenes de producción y consumo. Adicionalmente, el tomate también ha recibido mucha atención científica, ya que esta planta se ha utilizado como un modelo para realizar diferentes investigaciones genéticas, fisiológicas y patológicas (Atherton y Rudich, 1996).

El tomate es la segunda hortaliza mas importante en volúmenes de producción a nivel mundial, de acuerdo con las estadísticas de FAOSTAT en el año de 2011 se alcanzaron un total de 145 751 507 toneladas siendo los principales países productores China (48 576 853 tons) seguida por La India (16 826 000 tons), Estados Unidos (12 624 700 tons) y Turkía (11 003 400) mientras que México ocupó el onceavo lugar. No obstante, en ese mismo año México ocupó el primer lugar como país exportador de esta hortaliza alcanzando un valor de exportaciones de más de dos mil millones de dólares.

En México, el cultivo de tomate sobresale por ser una de las hortalizas que más han contribuido al desarrollo y crecimiento del sector hortícola; abastece el mercado nacional y es el producto de exportación agrícola de mayor valor comercial en el país. En la temporada 2011 la producción nacional de tomate alcanzó 1 872 481 toneladas en una superficie sembrada de 53 780 hectareas obteniéndose un rendimiento promedio de 41.6 ton ha⁻¹ (SIAP, 2011). Además de ser un producto de alto valor agregado por unidad de peso es rentable en unidades de producción pequeñas (Ocaña, 2004). Los datos de producción, rendimiento y valor de la producción de tomate de invernadero se presentan en el Cuadro 1, donde se puede apreciar que a pesar de que la producción ha ido en aumento constante durante ese periodo, el rendimiento disminuyó el último año y por lo tanto el valor de la producción disminuyó. La comparación de los datos de producción nacional a cielo abierto y bajo invernadero dentro del periodo 2008

2011 señalan que la producción en invernadero se ha ido incrementando paulatinamente alcanzando un 23 % en el año 2011, lo cual señala con claridad la tendencia que tiene la producción de este cultivo en sistemas protegidos.

Cuadro 1.- Datos estadísticos nacionales de producción, rendimiento y valor de la producción de tomate cultivado en invernadero.

Año	Producción (Ton)	Rendimiento (ton/Ha)	Valor de la producción (miles de pesos)	% de la producción Nal.
2008	207,456	160	1'627,910	9.1
2009	259,737	175	2'051,254	12.7
2010	413,096	171	3'053,547	18.1
2011	444,393	142	2'699,846	23.7

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP (2011)

2.4. Aspectos generales del licopeno en tomate.

El color del tomate es el factor más importante de calidad para el consumidor y la industria (Stevens y Rick, 1986) y está determinado principalmente por el contenido de licopeno (Stevens y Rick, 1986; Johjima y Matzuso, 1995; Shi y col., 1999), el cual representa cerca del 83% del total de los pigmentos del fruto (Gould, 1992) y por ello es el carotenoide más abundante en frutos maduros (Davies y Hobson, 1981; Shi y col., 1999; Ishida y col., 2001; Fraser y col., 1994; Alba y col., 2000; Dumas y col., 2002).

Según Collins y col., (1999) el licopeno tiene un papel dual en la fisiología de plantas y animales; en la planta funciona como un elemento antioxidante que confiere protección al ataque oxidativo que se puede presentar en el funcionamiento de los fotosistemas y aparece en los cromoplastos durante la

maduración y se especula que tiene funciones ecológicas que mejoran la atracción, consumo y dispersión de las semillas por los herbívoros.

La función del licopeno en la fisiología de la planta es mejorar la cosecha de luz para la fotosíntesis y proteger a la planta del daño fotooxidativo (Conn y col., 1991), en flores y frutos, los carotenoides ayudan a la atracción de insectos y animales para facilitar la polinización y dispersión de semillas (Giuliano y col., 1993). Desde el punto de vista de nutrición humana a este compuesto se le asocian propiedades nutraceuticas, el consumo de alimentos ricos en licopeno se ha asociado con un menor riesgo de desarrollar cáncer del tracto digestivo y del próstata (Giovanucci y col., 1995 y Collins y col., 1999).

El licopeno se encuentra en los cromoplastos dispersos dentro de las células del fruto, aparece como microcristales sólidos que al reflejar la luz, genera el color rojo brillante típico del fruto. El contenido de licopeno varía de acuerdo al cultivar, con rangos de variación de 55-180 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Davies y Hobson, 1981, Silviero y col., 2000 y Dumas y col., 2003).

2.4.1. Síntesis de carotenoides

Aunque los carotenoides son formados en los plástidos, es conocido que ocurren intercambios de metabolitos citoplasmáticos y plastídicos, los cuales varían dependiendo hasta del tipo y estado de desarrollo del tejido (McCaskill y Croteau, 1998).

Durante la maduración la concentración de carotenoides incrementa entre 10 y 14 veces, debido principalmente a la acumulación de licopeno (Fraser y col., 1994). Davies y Hobson (1981), mencionan que la concentración de carotenoides varía según el estado de madurez del fruto (Figura 1) siendo el licopeno el carotenoide que aumenta más rápidamente conforme el fruto va madurando. López-Camelo y Gómez (2004), mencionan que al madurar el fruto se va oscureciendo por la síntesis de carotenoides pasando de color verde a rojo, ésta

pérdida de color verde es debido a la síntesis de licopeno y la simultánea degradación de la clorofila (Arias y col., 2000).

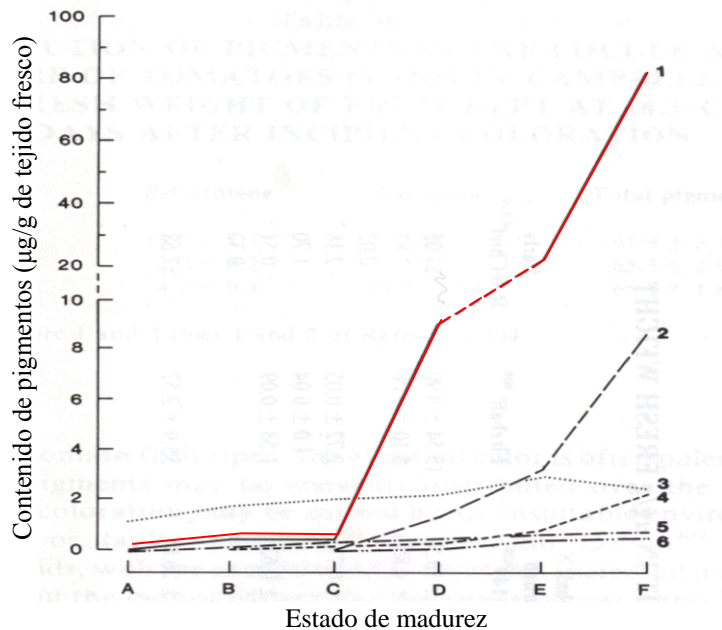


Figura 1. Cambios en la concentración de pigmentos en frutos de tomate durante la maduración (cv.Homestead). 1. Licopeno; 2. Fitoeno; 3. β-caroteno; 4. Fitoflueno; 5. γ-caroteno; 6. δ-caroteno. Estados de madurez: A. verde maduro; B. Rompiente; C. Cambiante; D. rosa; E. Naranja; F. Rojo. (Davies y Hobson, 1981).

El tomate es de las hortalizas que acumulan grandes cantidades de licopeno. Todos los carotenoides son derivados del isopentenil difosfato y son producidos en plastidios. Estudios genéticos y moleculares han establecido que el DNA nuclear codifican todos los genes de las enzimas de la ruta y posteriormente [son](#) transportados al interior del cloroplasto (Bartley y Scolnick 1995 y Bramley, 2002).

En la síntesis de carotenoides (Figura 2) el primer punto de control importante, se encuentra en el paso de acción de la enzima fitoeno sintasa que cataliza la conversión de dos moléculas de geranil-geranil pirofosfato en prefitoeno pirofosfato y posteriormente a fitoeno. Esta enzima se considera clave en la regulación de síntesis de carotenoides.

Posterior a este paso ocurre una serie de 4 desaturaciones por la creación de un sistema de dobles enlaces conjugados, llevan al fitoeno a la conversión de licopeno, en esta reacción está involucrada la fitoeno desaturasa (Bartley y Scolnik, 1995). Hasta el momento no existe suficiente información de cómo estos sistemas enzimáticos se ven afectados por las diferentes longitudes de onda de luz existentes al interior del invernadero que explique la acumulación de licopeno en frutos de tomate. No obstante, el efecto de la luz ha sido demostrado en diferentes sistemas donde se han utilizado fuentes de luz constantes; Bohne y Linden (2005) utilizando el alga verde *Chlamidomonas reinhartii* observaron una sobre regulación de los genes de las enzimas fitoeno sintasa y fitoeno desaturasa en respuesta a la luz azul mientras que la luz roja no tuvo efectos sobre la expresión de estos genes. Para el caso de *Capsicum annum*, Simkin y col., 2003 indicaron una síntesis de intermediarios de carotenoides en hojas expuestas a la luz mientras que esta actividad fue completamente inhibida en condiciones de oscuridad. Algunas moléculas involucradas en la activación de las rutas de síntesis de carotenoides, se conocen como fotoreceptores.

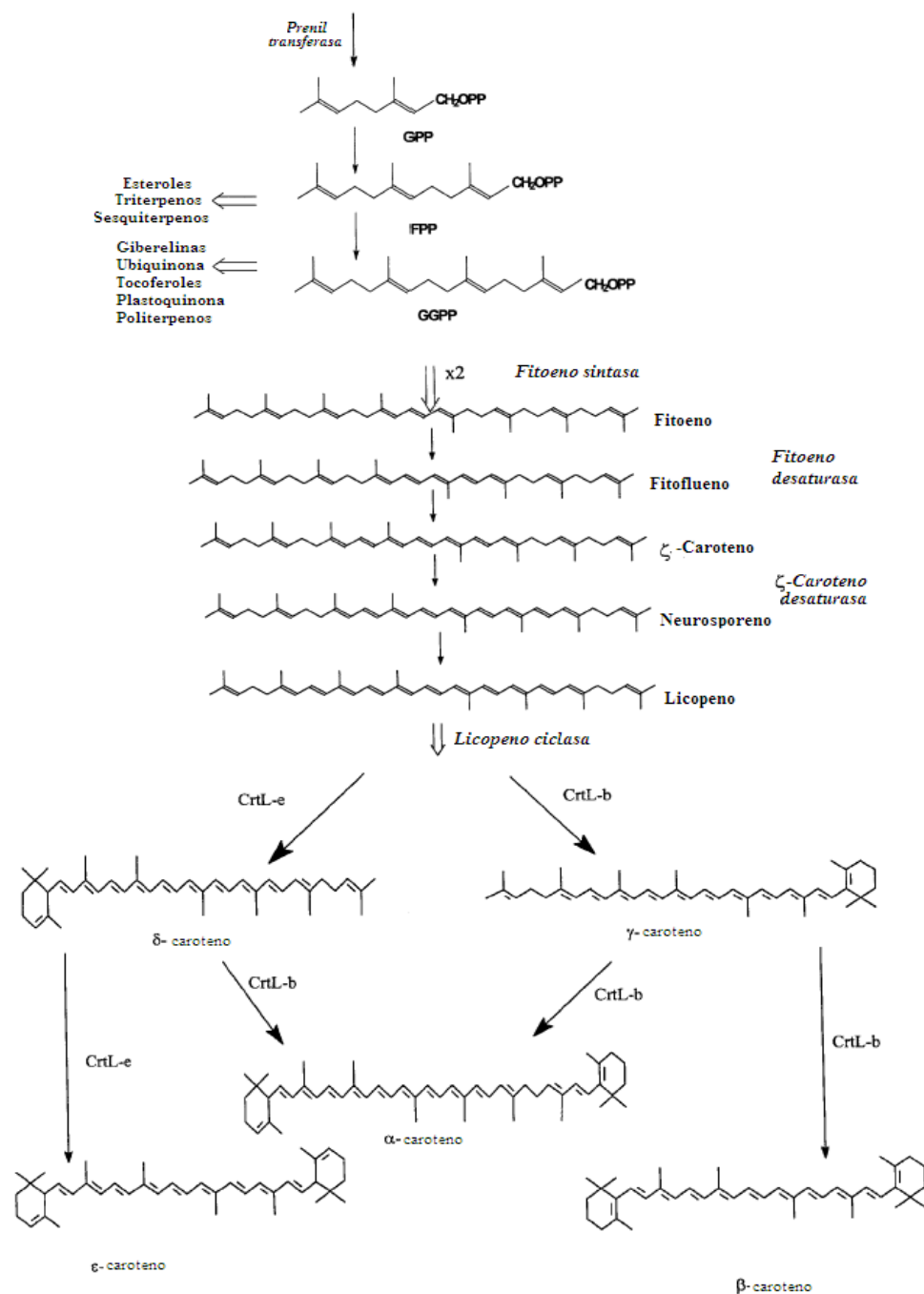


Figura 2. Ruta de biosíntesis de carotenoides en plantas. DOXP (1-deoxi-D-xilulosa 5-fosfato); MEP (2C-metil-eritritol- 4-fosfato); GA-3-P (gliceraldehido 3-fosfato); CDP-MEP (4-difosfocitidil-2C-metileritritol); CDP-ME- 2-P (4-difosfocitidil-2C-metileritrol 2-fosfato); MECDP (2C-metil-D-eritrol 2,4-ciclodifosfato); DMAPP, (dimetilalil difosfato); IPP (isopentenil difosfato); CrtL-e (licopeno ε-ciclasa; CrtL-b, licopene β-ciclasa). Adaptada de Bramley (2002).

2.4.2. Fotoreceptores

La naturaleza produce un amplio número de moléculas que absorben luz que ayudan a los organismos para responder a cambios en la luz ambiental. Las señales de luz pueden regular cambios en la estructura y forma, tales como germinación de semillas, expansión de hojas, elongación de tallos, iniciación de floración y síntesis de pigmentos (Aphalo, 2006).

Estos fotoreceptores o pigmentos son moléculas fotosensibles que al absorber fotones de luz (320 nm - 760 nm), pasan a un estado excitado y la energía liberada por la excitación puede ser retransmitida como luz (luminiscencia) térmicamente disipada, o transferida a otras moléculas; pero lo más importante es que dicha energía en los fotones absorbidos pueden provocar transformaciones químicas, tales como transferencia de electrones, fosforilación o cambios en las moléculas fotosensibles y con ello pueden conformar redes de señalización que desencadenan eventos morfogénicos. Estos pigmentos se pueden clasificar en dos grupos: los pigmentos masa, que son los que se encuentran en grandes cantidades en los tejidos de la planta (antocianinas, flavonoides y carotenoides) y los pigmentos que solo absorben una pequeña fracción de la luz incidente llamados pigmentos sensores (fitocromos y criptocromos).

Los pigmentos sensores están involucrados en procesos como la fotomorfogénesis que se define como el crecimiento y desarrollo directamente dependientes de la luz pero no relacionados con la fotosíntesis. Los fenómenos fotomorfogénicos (como la síntesis de pigmentos) son respuestas de alta irradiancia (HIR) en las cuales se requiere de una irradiación de intensidad moderada o elevada y continua de luz roja o roja lejana, y muestran dependencia también del tiempo (Figura 3) ya que en períodos breves de iluminación (inducción) aparece un pico a 660 nm. En irradiaciones prolongadas (de 6 a 12 horas) el espectro de acción muestra picos en la zona del azul y del rojo lejano

(Ting, 1982) lo cual afectará la eficiencia de la irradiancia sobre alguna respuesta morfogénica.

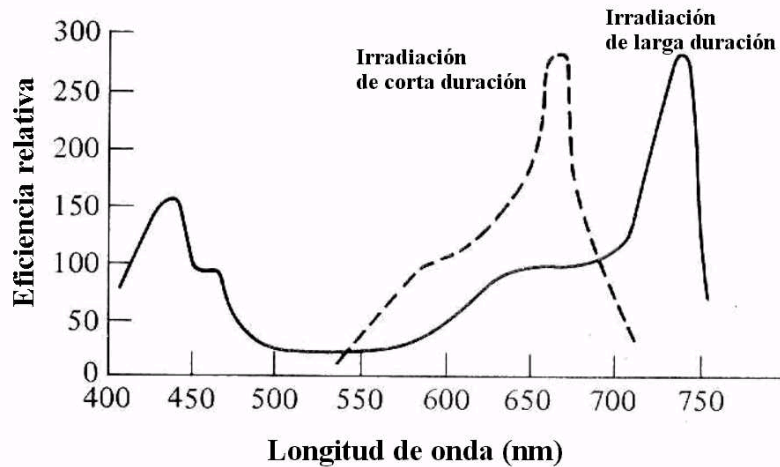


Figura 3. Espectro de acción a diferentes tiempos para la respuesta morfogénica de alta intensidad (Ting, 1982).

2.5. Factores que afectan la síntesis y acumulación de licopeno

Dumas y col. (2003) indicaron que hay muchos factores que afectan la calidad del fruto y el contenido de licopeno en el tomate tales como el ambiente (luz y temperatura) y las prácticas de cultivo (variedad, nutrición mineral, disponibilidad de agua, fecha de cosecha, etc.).

2.5.1. Sistema de cultivo

Según Cabibel y Ferry (1980) el contenido de licopeno es mayor en los frutos cultivados a cielo abierto (129 mg kg^{-1}), respecto de los frutos cultivados en invernaderos con cubierta de plástico o cubierta de vidrio, (42 y 37 mg kg^{-1} respectivamente). Dichos autores concluyen que la intensidad de luz interceptada por cada una de las cubiertas, afecta la síntesis de carotenoides y que su interacción con altas temperaturas dentro del invernadero, también tuvo un efecto en el proceso, lo cual dejó en evidencia que la acumulación de licopeno, en

invernaderos, se ve limitada respecto de los frutos cultivados a cielo abierto. Mientras que Brandt y col. (2006) observaron un comportamiento inverso donde encontraron mayores contenidos de licopeno en tomates cosechados en invernaderos respecto de frutos procedentes de cielo abierto (83 y 59.2 mg kg⁻¹ respectivamente) lo cual puede deberse a un mejor control de la intensidad luz transmitida por la cubierta dentro del invernadero y de prácticas culturales que permiten que el fruto no esté expuesto a la luz solar directa

2.5.2. Factores ambientales

La luz y la temperatura dentro del invernadero son afectadas principalmente por las propiedades ópticas de los materiales de la cubierta (Noble y Holder, 1989; Papadopoulus y Hao, 1997); así como también por la radiación solar durante las diferentes estaciones del año (Pearce y col., 1993). Estos factores crean un microclima particular con efectos significativos en el crecimiento, desarrollo y productividad del cultivo (Dorais y col., 2002).

Rosales y col., (2010) observaron que tanto la alta temperatura y la irradiación solar disminuyen el contenido de licopeno y de β -caroteno e inducen la peroxidación de lípidos y la oxidación de ascorbato en frutos cherry mientras que Anza y col. (2006) mostraron que diferentes variedades de tomate cultivadas en la primavera tuvieron mejor calidad organoléptica así como también alta capacidad antioxidante. Toor y col. (2006) también indicaron que la radiación solar, la temperatura dentro del invernadero y el número de frutos por racimo afectaron la capacidad antioxidante de diferentes variedades de tomate aunque ellos no indicaron el tipo de cubierta utilizada. Por otro lado Rosello y col. (2011) indicaron que tanto la acumulación de licopeno como de β -caroteno tienen una alta relación genética.

2.5.2.1. Temperatura

Dumas y col. (2003) indicaron que el rango de temperaturas óptimas para la biosíntesis de licopeno es de 16 a 26 °C; mientras que Helyes y Lugasi (2006) y Gautier y col., (2008) indicaron que temperaturas entre 27 – 32 °C disminuyeron la acumulación de licopeno y fue inhibida por arriba de 32 °C lo cual también fue establecido por Farkas (1994), el rango óptimo de temperaturas donde se favorece la síntesis de licopeno es entre 20-25 °C y Koskitalo y Omrod (1972) mencionaron que temperaturas de 25.6, 17.8 y 7.8 °C (diurna, nocturna y diferencial respectivamente), incrementaron el contenido de licopeno.

2.5.2.2. Luz

La síntesis de licopeno puede favorecerse cambiando las condiciones de iluminación de las plantas durante la maduración de los frutos (Pék y Helyes 2010; Pék y col., 2011).

Dorais (2007) y Dorais y col. (2008) describieron que la acumulación de fitoquímicos como el licopeno son fuertemente afectados por la intensidad, duración y longitudes de onda de la luz. Pék y col. (2011) también indican que los frutos de tomate expuestos a la irradiación directa del sol tuvieron menores contenidos de licopeno que los frutos crecidos bajo sombra; esta diferencia fue debida a la alta temperatura en la superficie del fruto expuesta a la luz solar directa.

Una completa descripción de la luz incidente en la planta requiere la caracterización de su intensidad (irradiancia de fotones o energía), duración (tiempo), calidad (composición espectral) y dirección (localización relativa de la fuente y grado de esparcimiento). La luz también es una fuente de energía para la fotosíntesis en plantas verdes, además que actúa como una fuente de información

para el fotoperiodo (longitud de la luz diurna/nocturna), fototropismo (dirección de la luz) y fotomorfogénesis (cantidad y longitudes de onda de luz).

Dorais y col. (2008) notaron que la luz roja (660 nm) estimula la acumulación de carotenoides mientras que la luz roja lejana (730 nm) detuvo la producción de licopeno y también añadieron que el sombreado de la planta, las pantallas, el invernadero o las cubiertas tipo túnel influyen en la intercepción de luz, lo cual potencialmente influirían el contenido de fitoquímicos.

Por otro lado, se sabe que la cantidad de irradiación solar que recibe la Tierra cambia durante el año y que esto depende de la posición de la Tierra respecto del sol (estaciones del año o movimiento de traslación), del movimiento de rotación mismo y de la inclinación que guarde el eje de rotación de la Tierra respecto del sol lo que provoca periodos de horas luz distintos en distintas localidades y también provoca ángulos de incidencia de rayos solares distintos en diferentes zonas geográficas.

La altura del sol en el horizonte del estado de Querétaro durante el ciclo de producción 2003-2004 (<http://sunheight.free.fr>), presentó las variaciones que se muestran en la Figura 4 en dos diferentes horas del día. Serrano (1994) indicó que a mayor ángulo del sol con el horizonte, la cantidad de luz visible es mayor, especialmente en la región de radiación fotosintéticamente activa (Figura 5), se esperaría que hubiese variaciones del contenido de licopeno a lo largo del ciclo de cultivo, por lo que se asume que durante los meses donde el ángulo del sol con el horizonte es menor, (noviembre, diciembre, enero y febrero) se esperaría una disminución del contenido de carotenoides mientras que a mayores intensidades se vería favorecida la síntesis de este compuesto.

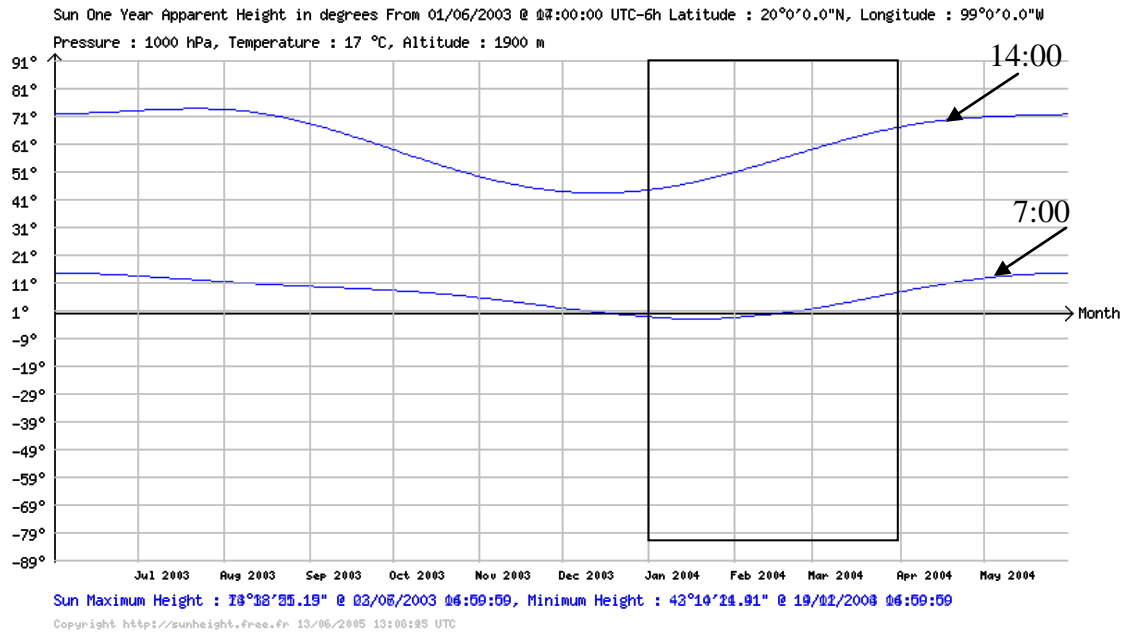


Figura 4. Ángulo del sol con el horizonte a las 7:00 y 14:00 horas durante el ciclo productivo 2003-2004, en el estado de Querétaro

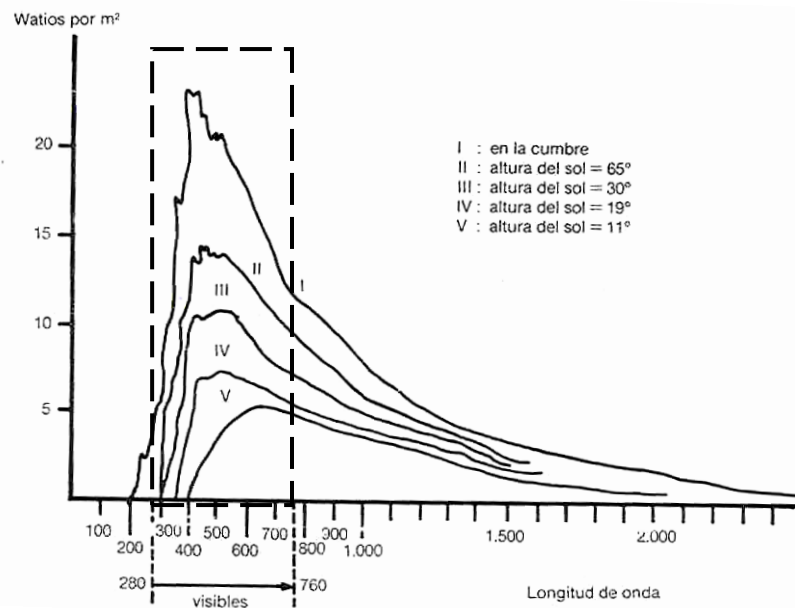


Figura 5. Radiación energética para diversos ángulos del sol con el horizonte, las líneas punteadas, muestran el rango de la radiación fotosintéticamente activa.

En esta dos últimas décadas se ha desarrollado un gran esfuerzo para manipular el ambiente en el interior de los invernaderos y así desarrollar sistemas que permitan controlar la iluminación dentro de los invernaderos y así mejorar la eficiencia de los sistemas de producción. A este respecto la International Society for Horticultural Science (ISHS) ha organizado diferentes simposiums internacionales específicos que abordan este aspecto; en el V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture del año 2006 destacan los trabajos de Heuvelink y col. (2006) quienes estudian las ventajas de la iluminación suplementaria para aumentar rendimientos y calidad de diferentes productos; señalando que en ese año la iluminación suplementaria no era factible económicamente pero que diferentes procedimientos de iluminación suplementaria podían mejorar el rendimiento y la calidad de los productos. Moe y col., (2006) discuten sobre las limitaciones de los sistemas de iluminación utilizados y proponen que para mantener una producción continua a lo largo del año se debe tener en cuenta que la alta velocidad de fotosíntesis, el crecimiento y desarrollo de las plantas están basados sobre una interacción muy compleja entre la luz y los demás factores de desarrollo del cultivo (fertilización, CO₂, riego etc.) y hacen recomendaciones sobre el flujo fotosintético de fotones, el periodo de iluminación diario y la luz integral diaria en contraposición al concepto de intensidad de luz corrientemente utilizado para mejorar el desempeño de los cultivos. Por su parte Hemming y col., (2006) analizan las ventajas del uso de cubiertas de invernadero que hacen difusa la luz observando que la producción de pimiento morrón podía incrementarse hasta un 6 % por el uso de estas cubiertas. El uso primario de fuentes de luz LEDs fue iniciado por Kim y col (2006) del grupo de investigación de Ciencias Biológicas de la NASA en plantas de lechuga; indicaron que la adición de 24 % de luz verde a la luz roja y azul proporcionada por las lámparas LEDs potenció el crecimiento de la planta. El efecto del uso de diferentes lámparas como fuentes de luz en el crecimiento de una planta de fotoperiodo corto fue abordado por Pérez y col., (2006) quienes señalaron para su modelo de planta que el crecimiento vegetativo y desarrollo floral esta regulado por los fotoreceptores rojo/rojo lejano (fitocromos) y los fotoreceptores de luz azul (criptocromos) y que la

luz roja y azul provocan una floración más temprana mientras que la luz roja lejana hacen lo opuesto.

En un evento similar la ISHS en el 2012 organizó el VII International Symposium on Light in Horticultural Systems donde se discutieron los avances en diferentes aspectos de los sistemas de iluminación para la producción bajo sistemas de invernadero; destacándose trabajos donde se analizan diferentes aplicaciones de los diodos emisores de luz (LEDs); Jokinen y col., (2012) analizan las ventajas del uso de LEDs como fuentes de luz de baja emisión de calor y por tanto como elementos ventajosos para ser ubicados dentro de la canopia de las plantas y con ello favorecer el crecimiento de la planta. La ubicación de LEDs dentro de la canopia de la planta incrementó en un 16 % los rendimientos de plantas de pimiento morrón en comparación con aquellas plantas no iluminadas con estas fuentes, indicando que el incremento en el rendimiento se debió a un mayor número de frutos en las plantas iluminadas con LEDs. Por su parte Duek y col., (2012) realizan estudios en la temporada invernal para comparar la producción de tomate en invernaderos cubiertos con vidrio con características de difusividad a la luz menores (50 y 6%) respecto del vidrio normal observando que la luz penetró de manera más profunda en los ambientes con vidrio difuso y las plantas tuvieron una mayor capacidad fotosintética pero solo en el invierno. Los rendimientos fueron mayores debido a un peso mayor de los frutos, también se observó una menor incidencia de *Botritis cinerea*. Goto (2012) hace un análisis general de la iluminación artificial de las fábricas de plantas, de acuerdo con este autor el uso de LEDs en la horticultura han sido planteados para disminuir los costos de electricidad y de enfriamiento del invernadero y plantea que es necesario realizar más investigación para desarrollar LEDs específicos que permitan la promoción de la fotosíntesis, el control de la expresión de genes, la foto morfogénesis y la síntesis de metabolitos secundarios.

Dentro de los aspectos del diseño de mejores sistemas de iluminación, de Visser y col., (2012) plantean modelos tridimensionales para calcular las lámparas

más eficientes, su posición dentro del invernadero así como la estructura de la planta y plantean estrategias de iluminación más eficientes cuando la luz está dirigida hacia el cultivo por medio de reflectores o inter iluminación del cultivo con LEDS, que también mejoró la intercepción de la luz por el cultivo. Por su parte Baeza y López (2012) resaltan la importancia que tiene una adecuada selección de las cubiertas de los invernaderos anotando que las propiedades ópticas que definen la transmisión de luz, es uno de los factores fundamentales para esta selección.

2.5.3. Estado de madurez y cosecha

El tomate es un fruto climatérico (Rick, 1978), como tal puede madurarse en la planta si se deja el tiempo suficiente, y puede incluso tener más desarrollado el aroma y el sabor característicos que los que maduran fuera de la planta. Los frutos de tomate cosechados en estado de madurez fisiológica (verde maduro) continúan el proceso de maduración durante el tránsito hasta el destino final en condiciones adecuadas (Kader y col., 1977). Es importante cosechar los frutos en el momento oportuno, si estos se cosechan fisiológicamente inmaduros no alcanzan una calidad aceptable de consumo. Si por el contrario, se cosechan en estado avanzado de madurez fisiológica tendrán una corta vida luego de cosechados.

Se ha demostrado que los frutos madurados fuera de la planta acumulan mayor cantidad de licopeno comparado con los frutos madurados en planta (Arias y col. 2000; Giovanelli y col. 1999; Thompson y col. 2000 y Moulinex y col. 2004).

Alba y col. (2000) describen que los frutos madurados en poscosecha regularmente se almacenan en oscuridad y bajas temperaturas, sin embargo el licopeno se seguirá acumulando por efecto de los fitocromos localizados en el pericarpio del fruto. Por otro lado, Toor y Savage, (2006) indicaron que si la temperatura de almacenamiento se mantiene en un rango de 15 a 25 °C, la

acumulación de licopeno es tres veces mayor respecto de los frutos almacenados a 7 °C.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, hasta el presente solo se ha establecido las diferencias de contenido de licopeno en tomates cultivados a cielo abierto así como de tomates de invernadero; pero no se han realizado estudios de cómo las longitudes de onda de luz son modificadas en las diferentes estaciones del año en un ciclo de cultivo, ni como las distintas cubiertas al ser también modificadoras de la calidad de luz afectan el contenido de este carotenoide.

La exposición de frutos de tomate en estado verde maduro a diferentes condiciones de luz no ha sido previamente propuesto como un posible tratamiento poscosecha para mejorar el contenido de licopeno, por lo tanto es necesario conocer el papel de la luz en diferentes ambientes de invernaderos, conocer intervalos de intensidad de luz necesaria para ayudar a incrementar el contenido de licopeno y qué tipo de luz es mejor para activar la ruta de síntesis de licopeno.

Por ello en el presente trabajo, se estudiaron los efectos de los cambios de luz en interior de invernaderos cubiertos con dos diferentes cubiertas en diferentes fechas del ciclo de cultivo y su efecto en la acumulación de licopeno en los frutos de tomate. Así mismo se evaluaron el efecto de diferentes tipos de luz en la acumulación de licopeno en ambientes poscosecha.

III. HIPÓTESIS DE TRABAJO.

La altura del sol en el horizonte así como el tipo de cubierta utilizada en el invernadero permitirá un espectro de luz al interior del mismo con una mayor cantidad de luz roja que propiciará una mayor acumulación de licopeno y desarrollo del color en frutos de tomate.

Si durante el proceso de maduración en poscosecha, los frutos se ven sometidos a pulsos de luz que activen la acción de los fotoreceptores, se provocará una mayor acumulación de licopeno y también un mejor desarrollo del color.

IV. JUSTIFICACIÓN

Debido a que los frutos de tomate cultivados en invernadero presentan menor contenido de color y licopeno en comparación de los frutos cultivados en campo abierto, es importante estudiar los factores que influyen sobre estos factores de calidad

No están reportados los intervalos de luz (intensidad y longitudes de onda) necesaria para ayudar a incrementar el contenido de licopeno

Exposición de frutos de tomate en estado verde maduro a diferentes condiciones de luz no ha sido previamente propuesto como un posible tratamiento poscosecha para mejorar el contenido de licopeno

V. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de la calidad de luz al interior de los invernaderos sobre el desarrollo de color y acumulación de licopeno en frutos de tomate cultivados en invernaderos.

Objetivos específicos

Estudiar el efecto de la luz sobre el color y licopeno de frutos de tomate cultivados en invernaderos con dos diferentes tipos de cubierta.

Tener una fuente de luz roja y azul para aplicar tratamientos de luz controlada que permitan incrementar el contenido de licopeno y desarrollo de color en frutos de tomate cultivados en invernadero.

Comparar la acumulación de licopeno en tomates cultivados en invernadero con diferentes fuentes de luz y tiempo de exposición

VI. MATERIALES Y METODOS

El trabajo fue dividido en una serie de experimentos independientes con la finalidad de encontrar un tratamiento para incrementar el contenido de licopeno con fuentes de luz en poscosecha. Los experimentos se iniciaron con pruebas de campo para la evaluación del contenido de licopeno en frutos cultivados en invernaderos comerciales evaluando las propiedades ópticas de las cubiertas de dichos invernaderos, posteriormente se llevaron a cabo experimentos para encontrar un tratamiento de luz controlada utilizando papel celofán de colores como filtros de luz blanca y 2 fuentes de luz: diodos LEDS y lámparas de descarga de alta intensidad con la finalidad de evaluar el efecto de dos tipos de luz (roja y azul) sobre la acumulación de licopeno, con este experimento se seleccionó la mejor fuente de luz, se procedió a evaluar diferentes tiempos de exposición de los frutos a las fuentes de luz artificial sobre la acumulación del licopeno, finalmente se evaluó con la mejor fuente de luz y el mejor tiempo el efecto del tratamiento con luz artificial sobre la acumulación de licopeno, color, sólidos solubles y firmeza durante la maduración de frutos en poscosecha.

6.1. Evaluación en campo del efecto de los tipos de cubierta de invernadero sobre la acumulación de licopeno

6.1.1. Material vegetal y configuración experimental

Las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) cv. 'Gerónimo' (De Ruiters Seeds[®] Holland) fueron cultivadas en invernaderos comerciales localizados en Colón, Querétaro, México, a 20° N y 99° W y una altitud de 1900 metros sobre el nivel del mar. Esta variedad es tipo Beefsteak con hábito indeterminado y 240 g de peso promedio, las semillas fueron germinadas e injertadas sobre un porta injerto Maxifort plantado en macetas en tezontle. Las macetas fueron colocadas en cada uno de los invernaderos estudiados.

6.1.2. Descripción de los invernaderos

Se utilizó un sistema de cultivo sin suelo con tezontle (roca volcánica) como sustrato y un sistema de fertirrigación automático. Las prácticas de cultivo fueron llevadas a cabo de acuerdo con los procedimientos utilizados por los estándares comerciales.

Las áreas estudiadas fueron cuatro invernaderos de 5000 m² para cada tipo de cubierta (plástico y vidrio). La cubierta de plástico utilizada fue una doble capa de polietileno de Clear K50 + K50 IR/AC (Klerks Hyplast Inc.) de 6 mils de espesor (0.152 mm); la cubierta de vidrio templado fue de 4 mm de espesor, recubierto con una capa de CaCO₃ preparada a partir de una solución acuosa (15 % w/v) aplicada por aspersión.

6.1.3. Datos climáticos durante la evaluación

El periodo de evaluación (enero, febrero y marzo) se determinó tomando en cuenta los meses del año donde mayor altura en el horizonte existió en la región de estudio (<http://sunheight.free.fr>), ya que a mayor altura del sol, la cantidad de luz visible es mayor, especialmente en la región de radiación fotosintéticamente activa (Serrano, 1994). Durante el periodo de evaluación, la irradiación externa e interna del invernadero fueron registrados semanalmente, así como también fueron registradas las temperaturas internas (diurna, media del día y la noche y la diferencia diurna/nocturna). Estos datos fueron registrados utilizando una estación meteorológica (Priva™ Computers Inc.) con sensores localizados en el centro de cada uno de los invernaderos. La longitud del fotoperiodo en el área estudiada fue calculado con las coordenadas geográficas en un programa del the Astronomical Applications Department of the U.S. Naval Observatory (http://aa.usno.navy.mil/cgi-bin/aa_durtablew.pl).

6.1.4. Características de la luz espectral transmitida por las cubiertas

Las características de la luz transmitida por las cubiertas fueron obtenidas por un barrido continuo de la densidad óptica dentro de un rango de longitud de onda del espectro de luz visible 380 a 730 nm utilizando un espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer Lambda Model 40) equipado con dos fuentes de radiación, una lámpara de deuterio (rango UV) y una lámpara de halógeno (rango de luz visible). Muestras de 3 x 3 cm de cada una de las cubiertas fueron analizadas en el espectrofotómetro midiendo su densidad óptica; la transmitancia fue calculada utilizando la fórmula:

$$\text{Transmitancia} = 10^{-\text{densidad óptica}}$$

6.1.5. Cosecha y clasificación de los frutos

En la semana 4 después del trasplante se seleccionaron 24 plantas de cada uno de los invernaderos; en las semanas 21, 25 y 29 (para enero, febrero y marzo respectivamente) se marcaron en cada una de las plantas, un racimo con cuatro frutos en estado de madurez fisiológica para formar un conjunto de 96 frutos. Tres semanas después del marcado, los frutos fueron cosechados y clasificados por color de acuerdo a la carta de color de la California Tomato Commission (2002), y se clasificaron como Rompiente (B), cambiante (T), Rosa (P), Rojo (R) y rojo maduro (RR). El estado de madurez verde maduro (MG) no fue considerado en el muestreo debido a que su contenido de licopeno fue despreciable (Davies y Hobson, 1981). La unidad experimental estuvo formada por tres frutos de cada estado de madurez de tamaño similar y buena apariencia. La fecha de cosecha de cada muestreo correspondió a las semanas 24, 28 y 32 después del trasplante.

6.1.6. Color

El color de cada fruto fue medido utilizando un espectrofotómetro Konica Minolta CM 2002 (Konica Minolta®) el cual utiliza un bulbo de arco de luz de xenón pulsado que ilumina una apertura redonda de 0.8 cm de diámetro donde el fruto completo fue colocado. La luz reflejada fue enfocada sobre un fotodiodo de sílice donde se midió la luz reflejada entre 400 y 700 nm. Los valores CIE L*a*b* (Luminosidad, rojo/verde y amarillo/azul de las coordenadas de cromaticidad) fueron medidos utilizando un observador a 10° y el iluminante D65. Se hicieron cinco mediciones de cada uno de los frutos (una en la zona peduncular, dos en la zona ecuatorial y dos en la zona distal). Los valores a* y b* fueron utilizados para estimar el índice de color del tomate (a^*/b^*) como lo recomendaron Arias y col., (2000b); Brandt y col., (2006); Helyes y Lugasi, (2006); Lopez-Camelo y Gomez, (2004); Hyman y col. (2004); y D´Souza y col. 1992).

6.1.7. Extracción de Carotenoides

Después de la medición de color, frutos individuales fueron congelados en N₂ líquido y liofilizadas. Cada fruto liofilizado fue molido y el polvo fue almacenado en bolsas de plástico en oscuridad a 20°C. Un gramo del polvo fue mezclado con 20 mL de solución de extracción (acetona:hexano 1:1 v/v) y agitada (15 min); 20 mL de agua grado HPLC fueron añadidos, agitados otra vez (5 min) y filtrados a través de un filtro Wathaman 4. La mezcla filtrada fue puesta en un embudo de separación para recuperar los carotenoides de la fase hidrofóbica. Durante la extracción, las muestras fueron protegidas de la luz (adaptada de Arias y col., 2000). Finalmente los extractos de carotenoides fueron filtrados a través de una membrana de nylon (0.2 µm) y almacenados a -20 °C en viales de 4 mL hasta su análisis por HPLC.

6.1.8. Cuantificación de licopeno

La separación y cuantificación de licopeno fue llevada a cabo por un gradiente de concentración utilizando una doble bomba HPLC (Waters Model 510; Millipore Corporation, Milford MA, USA) equipado con una columna Symetric C18 (Waters Ireland) de 3.5 mm de tamaño de partícula y de 4.6 x 100 mm de diámetro y longitud respectivamente, y un detector de arreglo de diodos Waters 996 (Millipore Corporation, Milford MA, USA), el cual registró la absorbancia a 470 nm (máxima absorción del licopeno). La separación fue llevada a cabo utilizando un sistema de gradiente binario de alta presión con una fase móvil A (acetonitrilo-metanol-diclorometano 30:5:65 (v/v)) y una fase móvil B (acetonitrilo-metanol-diclorometano 65:20:15 (v/v)) corriendo la fase móvil B desde 0 a 80% en 5 min, manteniendo 5 min y regresando a las condiciones iniciales (80 a 0%) en 5 min y manteniéndose estas durante 10 min. Los datos del cromatograma fueron procesados a través de una Estación de trabajo Millennium 32 (Waters Co. Milford MA USA). Los tiempos de retención y los espectros de absorción obtenidos de cada muestra fueron comparados con el espectro de un estándar de licopeno comercial (Sigma® CAT L9879) analizado bajo el mismo procedimiento. Los tiempos de retención (8.5 min) y los espectros de absorción fueron comparados con los picos de las muestras. La cantidad de licopeno en cada muestra fue calculada utilizando una curva estándar.

6.1.9. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados estadísticamente por análisis de varianza (ANOVA) como un diseño factorial 2 x 3 con cuatro réplicas utilizando el programa JMP 5.0 (SAS Institute Inc[®]), para detectar las diferencias significativas entre los tratamientos la prueba de t student a $P < 0.05$ fue utilizada. La unidad experimental estuvo formada por tres frutos de cada uno de los estados de madurez evaluados.

6.2. Evaluación y selección de fuentes de luz

6.2.1. Papel celofán y vidrio

Para seleccionar los materiales a utilizar en los experimentos con luz controlada, se evaluaron los espectros de absorción de distintos materiales de vidrio y de papel celofán de diferentes colores en un espectrofotómetro marca Perkin Elmer® modelo lambda 40 y el coeficiente de transmitancia se calculó de la misma manera que el punto 6.1.4.

6.2.1.1. Maduración de frutos en cámara

Se cosecharon 80 frutos cultivados en invernadero en estado verde maduro o rompiente y se dividieron en lotes de 20 frutos por tratamiento en cajas blancas cubiertas con el material seleccionado para cada longitud de onda de luz como a continuación se describe: luz blanca, luz azul (B), luz roja (R) y oscuridad como control. Los cajas de los tratamientos se colocaron en una cámara de maduración marca Conviron® modelo CMP 3244 equipada con lámparas fluorescentes e incandescentes que emiten longitud de onda de entre 400-700 nm, con temperatura y humedad constante 25 °C y 75 % respectivamente, y un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 oscuridad.

6.2.1.2. Determinación de color y licopeno

A los 12 días del inicio del tratamiento cuando los frutos alcanzaron el estado de madurez rojo, se les determinó el color y se les cuantificó licopeno siguiendo la metodología descrita en los puntos 6.1.6, 6.1.7. y 6.1.8.

6.2.2. Diodos emisores de luz (LEDS)

Se utilizaron lámparas de LEDS de 1W TecnoLite® modelo MR16-LED, su espectro de emisión se midió en el centro de investigaciones en óptica (CIO) para cada lámpara color (rojo, azul, blanco) utilizando un espectrómetro Ocean Optics® S2000.

6.2.2.1. Maduración de frutos en cámara

Se cosecharon 48 frutos cultivados en invernadero en estado verde maduro o rompiente y se dividieron en lotes de 6 frutos por tratamiento en cajas blancas de cartón con 1 repetición, los tratamientos fueron: luz blanca, luz azul (B), luz roja (R) y oscuridad como control. Los cajas de los tratamientos se colocaron en una cámara de maduración marca Conviron® modelo CMP 3244 equipada con lámparas fluorescentes e incandescentes que emiten longitud de onda de entre 400-700 nm, con temperatura y humedad constante 25 °C y 75 % respectivamente, y un fotoperiodo de 12 horas luz y 12 oscuridad.

6.2.2.2. Determinación de color y licopeno

A los 6 y 12 días del inicio del tratamiento cuando los frutos alcanzaron el estado de madurez rojo, se les determinó el color y se les cuantificó licopeno, siguiendo la metodología descrita en los puntos 6.1.6, 6.1.7. y 6.1.8.

6.2.3. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)

Lámparas de alta presión de sodio (HPS) y de halogenuros metálicos (MH) fueron usados como fuente de luz roja y azul respectivamente, los espectros de irradiancia fueron proporcionados por el proveedor.

6.2.3.1. Maduración de frutos en cámara

Frutos de tomate (cv. WV63) en estado de madurez verde maduro fueron cosechadas de la granja de Agronomía de la Universidad de West Virginia y madurados en una cámara de crecimiento a 20 °C bajo 3 tratamientos utilizando lámparas de descarga de alta intensidad como fuentes de luz HPS como tratamiento con luz roja y MH como tratamiento de luz azul, el grupo control fue madurado en la oscuridad. Los frutos tratados fueron expuestos diariamente durante 1 hora a las fuentes de luz para la duración día 12 del experimento

6.2.3.2. Determinación de color y licopeno

Con la finalidad de monitorear la evolución de la síntesis de licopeno en los frutos de tomate, se hicieron muestreos de frutos a los 4, 8 y 12 días del inicio del tratamiento, se les determinó el color y se les cuantificó licopeno, siguiendo la metodología descrita en los puntos 6.1.6, 6.1.7. y 6.1.8.

6.3. Efecto de la duración de la intensidad de la luz sobre la síntesis de licopeno.

Para determinar si la síntesis de licopeno es dependiente de la duración del tiempo de exposición a la luz, se utilizaron las lámparas de HID que fueron con las que mejores resultados se obtuvieron en el punto 6.2.

6.3.1. Material Biológico

Plantas de tomate (*Solanum lycopersicon* Mill.) cv. 'Ivonne' (De Ruiter Seeds[®] Holland) fueron cultivadas en invernaderos comerciales localizados en Colon, Querétaro, México, a 20° N y 99° W y una altitud de 1900 metros sobre el nivel del mar

6.3.2. Maduración de frutos en cámara

Las cámaras de maduración fueron acondicionadas con lámparas de descarga de alta intensidad, alta presión de sodio (HPS) para el tratamiento de luz roja; y para el tratamiento de luz azul se utilizó una lámpara de halogenuros metálicos (MH). En cada cámara se colocaron 9 cajas de cartón con tapa de 30 x 30 cm de área y 10 cm de espesor a una distancia de 1 metro de la lámpara. Se tomaron en 3 puntos de cada caja, lecturas de la densidad de flujo de fotones (PPFD) en un área 1 m^{-2} , utilizando un Medidor de luz marca Li-cor modelo LI-250A equipado con un sensor LI-210 con la finalidad de obtener el perfil de PPFD en $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Los tratamientos se llevaron a cabo en una cámara de maduración con temperatura a $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ teniendo como factor la luz (oscuridad, luz roja y azul) y el tiempo (0, 10, 60 y 240 minutos) (Cuadro 2), la unidad experimental fue de 5 frutos por tratamiento con 2 réplicas, teniendo como variable respuesta el color y el contenido de licopeno. A los 12 días se les determinó el color y se les cuantificó licopeno, siguiendo la metodología descrita en los puntos 6.1.6, 6.1.7. y 6.1.8.

Cuadro 2. Diseño del experimento para determinar el efecto de la duración de la exposición a diferentes tipos de luz y diferentes periodos de tiempo, sobre la acumulación de licopeno en frutos de tomate.

Luz	Tiempo (min)
Oscuridad	10
	60
	240
Azul	10
	60
	240
Roja	10
	60
	240

6.3.3. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados estadísticamente por análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa JMP 5.0 (SAS Institute Inc[®]), para detectar las diferencias significativas entre los tratamientos la prueba de t student a $P < 0.05$ fue utilizada.

6.4. Comparación de la evolución de color y licopeno en frutos madurados en poscosecha con luz vs. frutos madurados en oscuridad

6.4.1. Material Biológico

Se utilizaron plantas de tomate de la misma variedad descrita en la sección 6.3.1.

6.4.2. Maduración de frutos en cámara

Para comparar el efecto de la luz sobre el color y el licopeno en frutos madurados en poscosecha, 90 frutos de tomate en estado rompiente fueron cosechados y almacenados en 2 grupos de 45 frutos en cámaras de maduración individuales con temperatura controlada de $20^{\circ}\text{C} \pm 2$. En la cámara 1 se aplicó el mejor tratamiento obtenido en el experimento 6.3. (luz roja y 60 min) y en la cámara 2 los frutos fueron madurados en oscuridad como comercialmente se realiza. Cada día durante un periodo de 11 días hasta que los frutos alcanzaron su estado de madurez rojo maduro, 4 frutos previamente etiquetados al azar, fueron retirados de la cámara para la medición del color y contenido de licopeno siguiendo la metodología descrita en los puntos 6.1.6, 6.1.7. y 6.1.8, con la finalidad de comprobar que los parámetros de calidad del fruto sabor (sólidos

solubles) y textura (firmeza) no son afectados por el tratamiento de luz, a la par de las mediciones de color y licopeno, se cuantificaron el contenido de sólidos solubles (SSC), mediante el índice de refracción del jugo extraído de cada fruto usando un refractómetro Abbé (Atago 3). La firmeza fue medida con un texturómetro TA-HD (Stable Micro Systems) registrando la máxima fuerza (Newton) para penetrar 10 mm al fruto en el área ecuatorial del fruto, con una sonda de metal (5 mm diámetro) a 1 mm s^{-1} . Todas las mediciones se hicieron por triplicado.

6.4.3. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados estadísticamente por análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa JMP 5.0 (SAS Institute Inc[®]), para detectar las diferencias significativas entre los tratamientos la prueba de t student a $P < 0.05$ fue utilizada.

VII. RESULTADOS Y DISCUSION

7.1. Evaluación en campo del efecto de los tipos de cubierta de invernadero sobre la acumulación de licopeno

7.1.1. Espectros de transmisión de luz a través de las cubiertas del invernadero

El vidrio plano sin la cubierta de CaCO_3 mostró mayor transmisión de luz en comparación a la doble capa de polietileno. La Figura 6 muestra los patrones espectrales de la luz transmitida en ambas cubiertas (polietileno y vidrio plano cubierto con 15% de CaCO_3). Entre 380 y 600 nm, el vidrio plano permitió una mayor transmisión de luz que el PE de doble capa, mientras que en el rango de 650 y 760 nm (región de luz roja), hubo mayor transmisión de luz en la cubierta de plástico que en la cubierta de vidrio cubierta con CaCO_3 . La disminución de la luz transmitida por la aplicación de CaCO_3 es uno de los objetivos de las técnicas de recubrimiento para el control de la humedad y temperatura dentro de los invernaderos. No obstante, por tener un efecto también en las características espectrales de la luz transmitida, esta práctica podrá tener efectos fisiológicos importantes (Van Leperen 2012). A este respecto Nanya y col. (2012) indicaron que diferentes proporciones de luz roja y azul tiene efectos en el crecimiento del tallo y la posición del primer racimo de flores de plantas de tomate, Indicando que una mayor proporción de luz azul promueve el crecimiento del tallo mientras que la luz roja promueve la floración. De igual forma Alba y col., (2000) señalaron que la luz roja induce una mayor síntesis de licopeno.

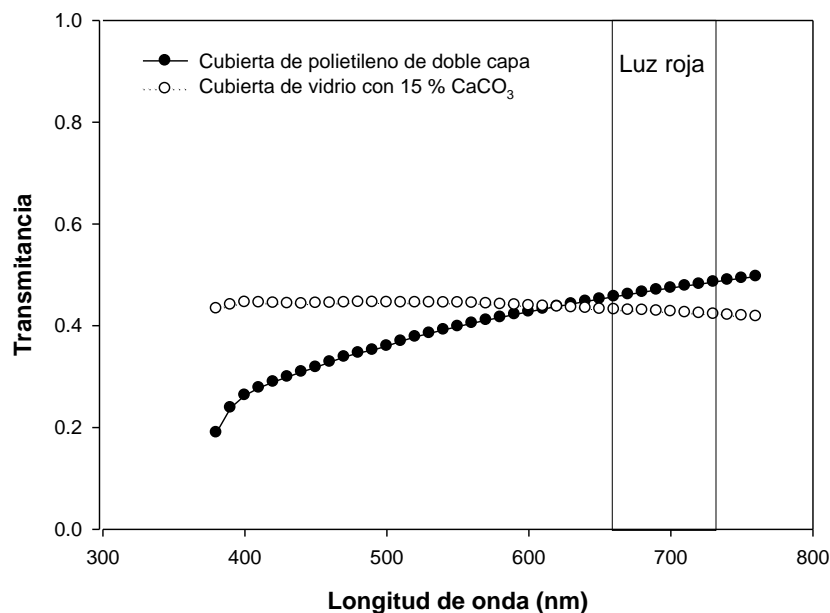


Figura 6.- Patrón de luz transmitida a través de 2 tipos de cubierta de invernadero: cubierta de polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15% CaCO₃.

7.1.2. Datos climáticos durante la evaluación

7.1.2.1. Temperatura

La Figura 7 muestra los cambios en las temperaturas promedio durante los experimentos los cuales fueron ligeramente mayores en los invernaderos de vidrio (promedio diario (18.01 - 20.87 °C), del día (21.24 - 25.75 °C), de la noche (14.83 - 16.75 °C) y la diferencia día/noche(6.09 - 8.97 °C)) que las registradas en los invernaderos de doble capa de plástico Clear K50 + K50 IR / AC (promedio diario (17.77 - 20.02 °C), promedio día (20.67 - 24.16 °C), promedio noche (14.84 - 16.43 °C) y diferencia día / noche (5.50 - 7.73 °C)]. No obstante, estos valores estuvieron ubicados dentro del rango de temperaturas requerido para la biosíntesis de licopeno como lo recomendaron Robertson y col. (1995) en tomate 'Cherry' (16-18 °C to 26 °C) y Thai y col., (1990) para tomate en general (12 a 30 °C) o por Dumas y col., (2003) quienes recomendaron rangos de 12 a 32 °C. En

ambas cubiertas de invernadero, las temperaturas del día variaron de 20 a 25 °C, mientras que las temperaturas de la noche estuvieron entre 14 y 17 °C, y la diferencia entre el día/noche fueron de 6-8 °C.

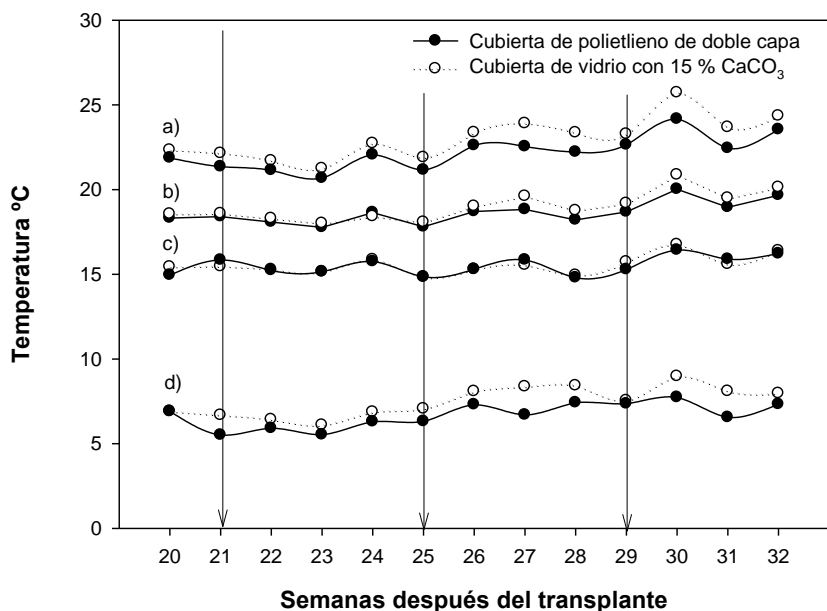


Figura 7.- Temperaturas internas: diurnas promedio (a), promedio 24 h (b), nocturnas promedio (c) y diferencias diurna/nocturna (d) de invernaderos cubiertos con polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 cubierto con 15% CaCO₃.

7.1.2.2. Luz

La intensidad de luz transmitida dentro de los invernaderos con cubierta de polietileno de doble capa, en las semanas de cosecha 25, 29 y 32, fueron mayores que la intensidad de luz interna en los invernaderos de vidrio (Figura 8). La súbita caída en la luz transmitida observada con la cubierta de vidrio fue debida a la aplicación de la solución de CaCO₃ y a la presencia días nublados en el área en la semana 22 y 31 respectivamente. Para la cubierta de doble capa, la luz transmitida promedio fue de 412, 590 y 444 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para las semanas 21-24, 25-28 y 29-32 respectivamente (Figura 8) las cuales fueron mayores respecto de

las cubiertas de vidrio cubierto con CaCO_3 (341, 370 y $274 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente).

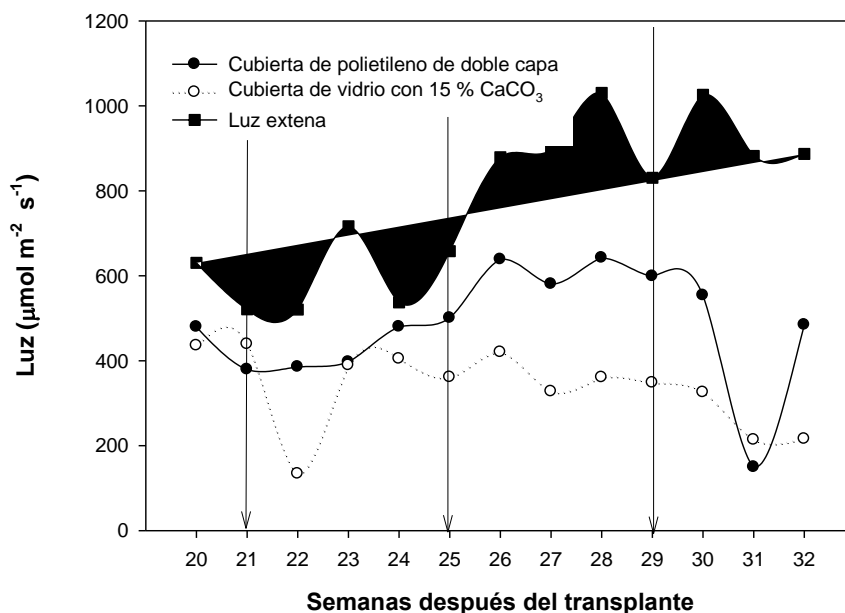


Figura 8.- Intensidad de luz externa e interna de invernaderos cubiertos con polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3

La transmisión de luz observada dentro de los invernaderos de vidrio recubiertos con CaCO_3 , dentro del periodo estudiado, fue significativamente menor que la mostrada por el polietileno de doble capa Clear K50 + K50 IR/AC. Esta baja transmisión de luz fue debida al recubrimiento con CaCO_3 , el cual es también utilizado para controlar la temperatura interna, pero la menor intensidad de luz también podría afectar la fisiología y la calidad de los frutos. No obstante, estos efectos pueden variar dentro de ciertos límites durante la estación de cosecha, porque el blanqueo con CaCO_3 puede ser removido y volver a ser aplicado además de la heterogeneidad del espesor de la capa durante su aplicación.

7.1.3. Mediciones del color y contenido de licopeno durante la maduración del fruto

Como se esperaba, el índice de color cambió y el contenido de licopeno incrementó con la maduración de la fruta en todos los tratamientos como se puede observar en la Figura 9 en los tomates producidos en ambos tipos de invernaderos. Por ejemplo, los frutos producidos en la semana 28 bajo cubiertas de vidrio el índice de color (a^*/b^*) incrementó desde -0.06 a 1.04 para frutos en estado rompiente y en estado rojo maduro respectivamente (Cuadro 3), mientras que el contenido de licopeno también incrementó desde 47.7 a 206 $\mu\text{g g}^{-1}$ para los mismos estados de madurez (Cuadro 4). Estos datos indican degradación de clorofila y biosíntesis de carotenoides durante el proceso de maduración de la fruta (Arias y col., 2000; López-Andreu y col., 1986 y Davies y Hobson, 1981).

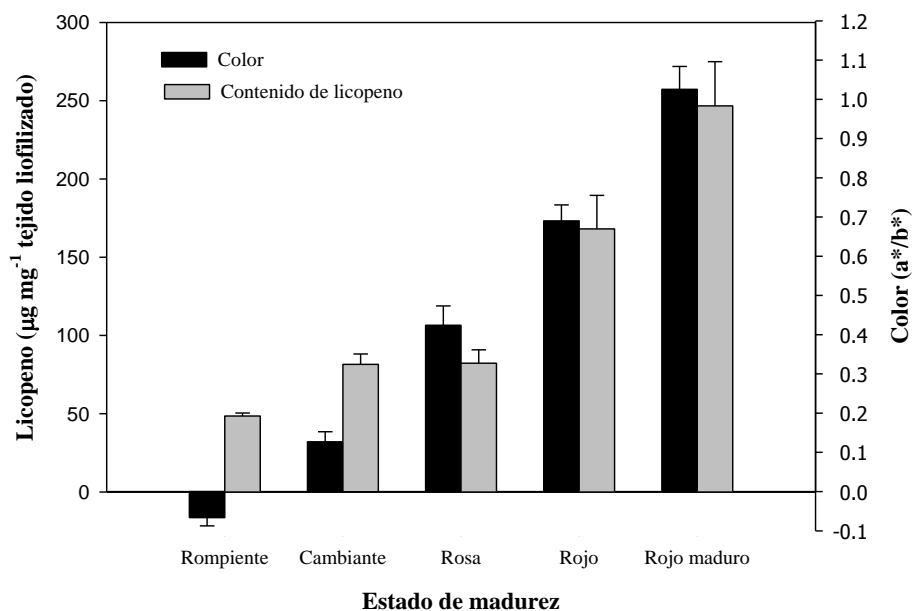


Figura 9.- Índice de color y contenido de licopeno de frutos de tomate en diferentes estados de madurez cultivados en invernaderos cubiertos con polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3

El cuadro 3 muestra los análisis estadísticos del efecto de la cubierta y de las semanas de muestreo y sus interacciones en el índice de color así como también la comparación de medias entre los diferentes tipos de cubiertas y

semanas de muestreo para cada estado de madurez. Ni el tipo de cubierta ni la interacción cubierta*semana mostraron efectos significativos en el índice de color en todos los estados de madurez pero la semana de cosecha tuvo un efecto altamente significativo ($P < 0.05$) en el estado rompiente los frutos cosechados en la semana 32 tuvieron un color más verde (menores valores a^*/b^*) que los frutos cosechados en las semanas 24 y 28 las cuales no mostraron diferencias significativas entre ellas. En el estado rojo maduro también los frutos cosechados en la semana 32 y producidos en el invernadero de vidrio tuvieron mayor color rojo que los frutos producidos en las semanas 24 ó 28.

Cuadro 3. Comparación del índice de color (a^*/b^*) de frutos de tomate en diferentes estados de madurez cultivados en invernaderos con cubierta de polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3 .

Cubierta	Semanas después del trasplante	Estado de madurez				
		Rompiente (± 0.037)	Cambiante (± 0.63)	Rosa (± 0.109)	Rojo (± 0.95)	Rojo maduro (± 0.076)
Polietileno de doble capa	24	-0.01 A	0.23 a	0.34 b	0.60 ab	0.99 ab
	28	-0.01 A	0.10 a	0.27 b	0.69 ab	1.22 ab
	32	-0.13 Bc	0.11 a	0.48 ab	0.80 ab	0.85 b
Vidrio	24	0.02 Ab	0.15 a	0.70 a	0.56 b	0.93 ab
	28	-0.04 Ab	0.07 a	0.33 b	0.64 ab	1.06 ab
	32	-0.21 C	0.10 a	0.42 ab	0.85 a	1.16 ab
	Cubierta	NS	NS	NS	NS	NS
	Mes	*	NS	NS	*	NS
	Cubierta X mes	NS	NS	NS	NS	NS

*, Diferencia significativa a $P < 0.05$, NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Student's t $P < 0.05$).

Por otro lado, el análisis estadístico del contenido de licopeno de frutos de tomate en diferentes estados de madurez producidos en las dos cubiertas y diferente semana de muestreo no mostró diferencias significativas en el contenido de licopeno en las frutas con estados de madurez rompiente y rosa en todos los periodos de muestreo analizados (Cuadro 4).

No obstante, en el estado de madurez cambiante hubo diferencias significativas en los frutos producidos en la semana 24 bajo cubierta de vidrio los cuales mostraron mayores contenidos de licopeno ($129.87 \mu\text{g g}^{-1}$) que los frutos producidas en invernaderos con doble capa de polietileno. Pero la diferencia más importante fue observada en las frutas con estado de madurez rojo y rojo maduro producidas en la semana 32 y bajo el polietileno de doble capa las cuales mostraron el más alto contenido de licopeno (302.31 y $414.05 \mu\text{g g}^{-1}$ en frutos en estado de madurez rojo y rojo maduro respectivamente). Estos datos mostraron que el tipo de cubierta y el periodo de muestreo tuvieron una influencia muy importante sobre el contenido de licopeno de la fruta; la doble capa K50 Clear + K50 IR/AC permitió una mayor acumulación de licopeno en las semanas 28 a 32 en comparación a la cubierta de vidrio recubierta con CaCO_3 .

Cuadro 4. Comparación del contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ de tejido liofilizado) de frutos de tomate en diferentes estados de madurez cultivados en invernaderos con cubierta de polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3 .

Cubierta	Semanas después del trasplante	Estado de madurez					
		Rompiente (± 5.37)	Cambiante (± 11.8)	Rosa (± 19.79)	Rojo (± 42.10)	Rojo maduro (± 30.58)	
Polietileno de doble capa	24	45.40 a	56.78 b	69.30 a	78.66 b	0.99 ab	
	28	50.00 a	84.78 b	60.55 a	183.47 ab	1.22 ab	
	32	48.27 a	79.46 b	115.12 a	302.31 a	0.85 b	
Vidrio	24	50.66 a	129.88 a	74.78 a	198.68 ab	0.93 ab	
	28	47.73 a	81.09 b	62.68 a	123.88 ab	1.06 ab	
	32	48.86 a	57.10 b	111.14 a	121.33 ab	1.16 ab	
	Cubierta	NS	NS	NS	NS	*	
	Mes	NS	NS	*	NS	NS	
	Cubierta X mes	NS	NS	**	NS	**	

*, ** Diferencia significativa a $P < 0.05$ y $P < 0.01$ respectivamente, NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Student's t $P < 0.05$).

7.1.4. Relación del fotoperiodo con la acumulación de licopeno

El cuadro 5 muestra los cambios en el fotoperiodo o longitud del día en el área donde los invernaderos estuvieron localizados y el contenido de licopeno en frutos rojo maduro bajo los dos tipos de cubierta estudiados en tres diferentes periodos de muestreo. Los incrementos en el contenido de licopeno siguieron una estrecha relación con el fotoperiodo siendo más notorio en los frutos producidos en invernaderos de doble capa de polietileno mientras que la acumulación de licopeno en frutos producidos bajo invernaderos con cubiertas de vidrio y CaCO_3 fue más limitada.

Cuadro 5. Relación entre contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ tejido liofilizado) de frutos de tomate en estado de madurez rojo maduro cultivados en invernaderos con cubierta de polietileno de doble capa (K50 Clear + K50 IR/AC) y cubierta de vidrio templado de 4 mm cubierto con 15 % CaCO_3), y el fotoperiodo en el área de estudio.

Semanas después del trasplante	Fotoperiodo* (horas luz por día)	Contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ tejido liofilizado)	
		Polietileno de doble capa	Vidrio
24	10.58-11.1	231.53b	180.30a
28	11.16-11.37	253.49b	206.00a
32	11.45-12.09	414.05a	241.07a

* Unidades en horas y fracciones decimales

Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Student's t P < 0.05).

Todos los resultados mostrados anteriormente sugieren que la temperatura dentro del invernadero, la estación de producción y las condiciones de iluminación dentro del invernadero afectan la biosíntesis de licopeno o su proceso de acumulación. Probablemente las mayores temperaturas observadas en los invernaderos de vidrio y especialmente la alta intensidad de luz registrada en las semanas 24 a 28 en los invernaderos de plástico permitieron una mayor biosíntesis de licopeno.

La menor transmisión de luz registrada en los invernaderos de vidrio parecen contradecir los resultados de Cabibel y Ferry (1980) quienes indicaron

mayor transmisión de luz en cubiertas de vidrio que en cubiertas de polietileno, esta diferencia puede ser explicada porque esos autores no cubrieron el invernadero de vidrio con CaCO_3 . Aunque esto ayudó a controlar la temperatura interior, también restringe el paso de luz lo cual limitó el desarrollo de color y la capacidad de síntesis de licopeno.

Dumas y col. (2003) reportaron que las temperaturas promedio por debajo de $12\text{ }^\circ\text{C}$ drásticamente redujeron la biosíntesis de licopeno y por arriba de $32\text{ }^\circ\text{C}$ pararon el proceso. Aunque las temperaturas dentro del invernadero de vidrio recubierto con CaCO_3 mostraron valores ligeramente altos (Figura 7), realmente el rango de temperaturas observado estuvo dentro del intervalo recomendado para la síntesis de licopeno. Los valores reportados en el presente trabajo fueron similares a aquellos reportados por Koskitalo y Omrod (1972) quienes observaron altos contenidos de licopeno a temperaturas de 25.6 , 17.8 y $7.8\text{ }^\circ\text{C}$ (día, noche y diferencia día/noche respectivamente).

El mayor contenido de licopeno observado en las semanas 28 y 32, mostraron un efecto estacional en la biosíntesis de licopeno, lo cual coincide con lo reportado por Toor y col. (2006) quienes indicaron que los frutos producida en verano en Nueva Zelanda (hemisferio sur) tuvo 31 % menos licopeno mostrando que a alta intensidad de luz hubo mayor biosíntesis de licopeno. En el presente trabajo se observó alta transmisión de luz en las semanas 29 a 32 en los invernaderos con doble capa de PE pero no en los invernaderos de vidrio (Figura 8) esto puede explicar la mayor acumulación de licopeno en los invernaderos de plástico.

El efecto de la luz en el proceso de acumulación de carotenoides fue estudiado por Thomas y Jean (1975) quienes indicaron que los frutos de tomate expuestos a luz roja incrementaron su contenido de carotenoides, después Alba y col. (2000) indicaron que la biosíntesis de licopeno estuvo ligado a la expresión de genes del fitocromo A el cual se incrementó 10 veces durante la maduración de

los frutos así como también los frutos tratados con luz roja incrementando 2 a 3 veces el contenido de licopeno mostrando que su acumulación está regulada por la actividad de aquel fitocromo en los frutos. La Figura 6 muestra que la cubierta de doble capa de polietileno permitió una mayor transmisión de luz en el rango de 650 a 730 nm (luz roja) lo cual también podría explicar la mayor acumulación de licopeno.

Los resultados de este trabajo indicaron que la alta intensidad luminosa en el exterior de la cubierta de polietileno de doble capa K50 Clear + K50 IR/AC facilitaron el paso de la luz roja lo cual mejoró la biosíntesis de licopeno mientras que en el invernadero de vidrio cubierto con CaCO_3 controló la temperatura pero disminuyó la transmisión de luz y no mejoró la transmisión de luz roja ni la biosíntesis de licopeno.

La cantidad de luz recibida por el fruto en el arranque de la maduración parece ser un factor muy importante para incrementar la biosíntesis de licopeno. Los frutos que recibieron una mayor cantidad de luz, acumularon más licopeno, desarrollaron mejor color y tuvieron una mejor calidad visual. Las técnicas de blanqueo, lavado y sombreado utilizadas para controlar la temperatura dentro del invernadero podrían también ser mejoradas si la intensidad de luz necesaria para mejorar el desarrollo de color y la acumulación de licopeno son consideradas.

7.2. Evaluación del efecto de la fuente de luz en el desarrollo de color y acumulación de licopeno.

Los resultados observados en la primera etapa de este estudio sugirieron la necesidad de investigar de forma más controlada cual sería el efecto de diferentes tipos de luz en el desarrollo del color y acumulación de licopeno en los frutos. Dadas las limitaciones prácticas para acondicionar los invernaderos para tener determinadas condiciones de luz en el interior de ellos; se decidió evaluar este efecto en frutos cosechados en estado verde maduro y posteriormente someterlos a diferentes fuentes de iluminación en condiciones de laboratorio.

7.2.1. Selección de medios para crear un ambiente espectral de luz.

El proporcionar un ambiente espectral de luz determinado a los frutos fue abordado mediante la técnica de poner filtros de papel celofán de diferentes colores frente a una fuente de luz blanca fluorescente.

7.2.1.1 Espectros de transmitancia de papel celofán de diferentes colores

El papel celofán rojo y azul mostraron mayores valores de transmitancia a las diferentes longitudes de onda (Figura 10) en comparación de los materiales de vidrio (Figura 6). El papel celofán rojo mostró una alta transmitancia en la región del espectro correspondiente al rojo; mientras que el papel azul mostró máximos de transmitancia en la región del azul pero también en la región de los rojos, aunque esta última fue menor que la mostrada por el celofán rojo. Dadas estas características, estos materiales fueron utilizados para estudiar el efecto de los tratamientos de luz roja y azul respectivamente en el proceso de acumulación de licopeno en los frutos en poscosecha.

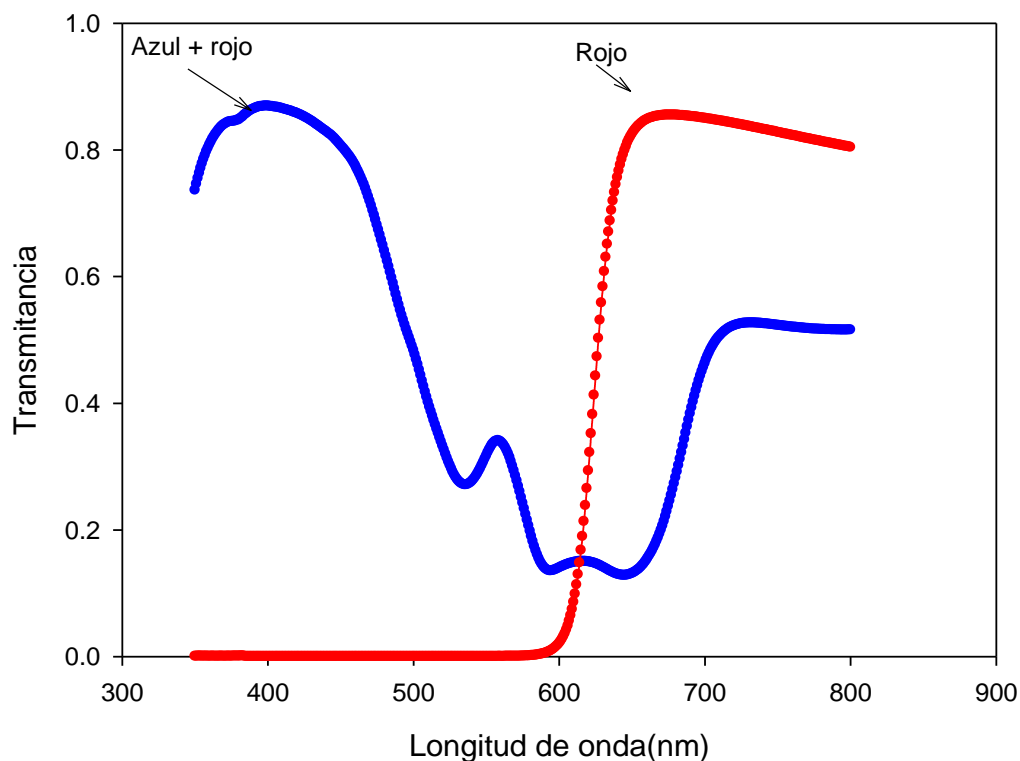


Figura 10. Espectro de transmitancia del papel celofán rojo y azul + rojo

7.2.1.2. Desarrollo de color y acumulación de licopeno bajo el espectro de luz con filtros de celofán.

La Figura 11 muestra de forma visual el color alcanzado por los frutos en poscosecha después de haber sido sometidos a luz blanca, oscuridad o al espectro de luz generado por los filtros de celofán. Mientras que el Cuadro 6 muestra los valores de color a^* y contenido de licopeno de los frutos sometidos a esos tratamientos. En general los tratamientos con luz roja y blanca fueron los que mejor apariencia presentaron en comparación con los tratamientos de oscuridad o de luz azul (rojo-azul) (Figura 11).



Figura 11. Apariencia de los frutos de tomate expuestos a diferentes tratamientos con luz blanca, papel celofán rojo como filtro de luz roja, papel celofán rojo-azul como filtro de luz azul y oscuridad.

El valor de color a^* fue mayor para los frutos tratados con luz blanca y papel celofán rojo en comparación de los madurados en la oscuridad o con luz azul; mientras que el contenido de licopeno fue significativamente mayor en los frutos madurados bajo papel celofán rojo seguidos por aquellos madurados bajo luz blanca y finalmente los frutos madurados en la oscuridad y bajo luz azul-roja mostraron los contenidos menores e iguales estadísticamente entre sí (Cuadro 6). Como elemento de prueba que los tratamientos de luz no afectaron el proceso de maduración, el Cuadro 6 muestra los valores de contenido de sólidos solubles totales y de firmeza de los frutos al final del tratamiento. Ambos parámetros no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos lo cual indicó que dichos tratamientos no afectaron la acumulación de azúcares ni la textura, así mismo también señaló que los tratamientos de luz solo afectaron los procesos de síntesis de licopeno. De manera colateral, estos resultados también soportan la conclusión

dada por Alba y col., (2000) respecto de que la acumulación de licopeno se da de manera independiente a la maduración catalizada por el etileno.

Cuadro 6. Contenido de sólidos solubles (°Brix), textura (N), color (a*) y el contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ tejido liofilizado) en frutos de tomates cv. WV63 madurados en diferentes condiciones de luz

Tratamiento	Sólidos solubles	Textura	Color a*	Licopeno				
Oscuridad	3.72	a	8.57	a	11.51	c	338	c
Blanca	4.28	a	8.53	a	14.02	a	540	b
Roja	4.16	a	8.29	a	14.33	a	847	a
Azul	4.02	a	8.14	a	13.08	b	384	c
	NS	NS			***		***	

***, diferencia significativa a $\alpha < 0.001$ respectivamente NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey a $P < 0.05$).

Estos resultados muestran una mayor evidencia que un ambiente de luz roja induce una mayor síntesis de licopeno y al mismo tiempo señalan que es factible que una cubierta que modifique las características espectrales de luz puede modificar la acumulación de licopeno en los frutos. Estos resultados están de acuerdo con los reportes señalados por Alba y col., (2000) quienes indicaron que el tratamiento de pulsos cortos de luz roja sobre frutos de tomate incrementaron hasta 3 veces el contenido de licopeno en los frutos.

No obstante, las observaciones obtenidas con los filtros de papel celofán, estos presentaron varios inconvenientes; por ejemplo el material no resiste mucho tiempo las exposiciones a la luz, presentaba variaciones en su transmitancia dependiendo del lote y del proveedor lo cual representó una limitante para su uso.

7.2.2. Diodos emisores de luz

Actualmente el uso de diodos emisores de luz o LEDs como fuentes de luz dentro de los invernaderos, es una herramienta alternativa para suministrar luz suplementaria a la luz natural o sustituir a las lámparas HPS; el uso de estos LEDs

se basa en diferentes ventajas que estas lámparas tienen como larga vida funcional, baja temperatura de operación, bajo consumo de energía y una salida espectral de luz selectiva (Hernández y Kubota, 2012).

7.2.2.1. Espectros de emisión de luz

En la figura 12, se muestran los espectros de salida de luz de las lámparas LEDS seleccionadas para los tratamientos con luz blanca, azul y roja, se puede apreciar que este tipo de lámparas emiten rangos de longitudes de onda muy estrechos y centrados en las longitudes de onda de interés (un máximo de 475 nm para la luz azul, un máximo de 633 nm para luz roja y dos máximos de 459 y 536 nm para luz blanca) a diferencia del papel celofán azul que filtró picos de varias longitudes de onda.

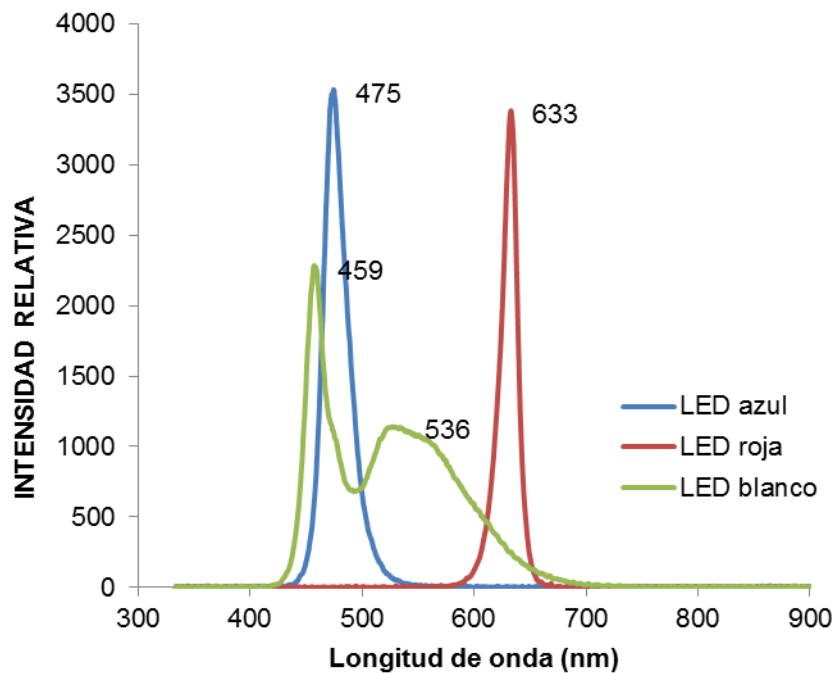


Figura 12. Espectros de emisión de tres LEDs (Diodos emisor de luz) empleados como fuentes de luz en este trabajo.

Las características espectrales de estos LEDs permitieron utilizarlos para realizar estudios más controlados sobre los efectos de esas fuentes de luz en el desarrollo de color y acumulación de licopeno.

7.2.2.2. Cambios de color y contenido de licopeno de frutos bajo luz de difentes LEDs

La Figura 13 muestra las características visuales de los frutos de tomate después de 12 días de maduración a 13 °C expuestos a diferentes condiciones de ambiente de luz (oscuridad, LED de luz blanca, LED de luz azul y LED de luz roja). Todos los frutos expuestos a las características espectrales de luz emitidas por los LEDs mostraron mayor desarrollo de color respecto de los frutos mantenidos en la oscuridad.



Figura 13. Apariencia de los frutos de tomate madurados con diferentes tratamientos de luz utilizando lámparas LEDs y madurados en oscuridad como control.

En el Cuadro 7 se muestran los datos del valor de color a^* y del contenido de licopeno de frutos madurados a 20 °C durante 6 y doce días bajo las lámparas LEDs. De forma lógica estos valores incrementaron a medida que transcurrió la

maduración de los frutos. No obstante, después de 12 días de maduración el valor de color a^* fue mayor y estadísticamente igual para los frutos tratados con luz blanca y luz roja, mientras que los frutos tratados con luz azul tuvieron un menor valor pero estadísticamente superior que los frutos madurados en la oscuridad, los cuales mostraron los valores más bajos de color. No obstante, el contenido de licopeno no mostró diferencias significativas para ese periodo de maduración pero comparando ese contenido a los seis días de maduración, se observó que los frutos tratados con LEDs de luz roja alcanzaron contenidos de licopeno estadísticamente mayores que los frutos madurados en la oscuridad o con luz blanca (los cuales fueron estadísticamente similares entre sí); así mismo también fueron estadísticamente superiores que los madurados con luz azul. Estos datos señalan que los frutos tratados con luz roja y luz azul alcanzan contenidos de licopeno de forma más rápida que los frutos no tratados con estos tipos de luz, lo cual podría representar una ventaja en la comercialización de los frutos.

Cuadro 7. Color superficial (a^*) y contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ fruto liofilizado) en frutos de tomates madurados en diferentes condiciones de luz 20 ° C

Luz	Día	Color a^*	Licopeno
Oscuridad	6	15.06	f
	12	16.59	ef
Blanca	6	17.85	cde
	12	20.35	a
Rojo	6	18.89	bc
	12	19.86	ab
Azul	6	17.45	de
	12	18.27	cd
	Luz	***	***
	Día	***	***
	Luz X día	**	NS

** , *** , diferencia significativa a $\alpha < 0.01$, 0.001 respectivamente NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey a $P < 0.05$).

Los efectos de la luz roja y rojo lejano sobre el proceso de acumulación de licopeno fue abordado por Alba y col., (2000) quienes indicaron que el RNAm del fitocromo A se acumuló 11 veces más durante el proceso de maduración de los frutos y que los tratamientos breves de luz roja incrementaron 2.3 veces la acumulación de

licopeno, mientras que la luz rojo lejána invertía este proceso. Los datos aportados en este trabajo parecen estar confirmados por los resultados de estos autores. Es decir que los tratamientos con LEDs de luz roja posiblemente incrementaron la expresión del fitocromo A lo cual llevo a una acumulación más rápida del licopeno en los frutos de manera independiente al proceso de maduración de los frutos. En cuanto a la acumulación de licopeno bajo el tratamiento de luz azul, Giliberto y col., (2005) utilizando técnicas de silenciado y sobre expresión de genes del critocromo 2 (fotoreceptor de luz azul) en plantas de tomate indicaron que la sobre la sobre expresión de este gen indujo un fenotipo con mayor pigmentación, mayor producción de antocianinas y clorofila en las hojas y mayor producción de flavonoides y licopeno en los frutos; estos datos parecen explicar los datos obtenidos en este trabajo; no obstante, los contenidos de los otros componentes (antocianinas y flavonoides) no fueron cuantificados en este trabajo y es posible que si estos se incrementaron, también influyeron en valor de color a*. Si las observaciones realizadas por estos investigadores operaron en el sistema estudiado, es posible indicar que aunque hay síntesis de licopeno en los distintos ambientes de luz, el mecanismo inductor de su síntesis para alcanzar dichos niveles parece ser diferente; en el caso de la luz roja parece ser inducida por el fitocromo A mientras que bajo luz azul el inductor pareciera ser el criptocromo. Para el caso de la luz blanca, la acumulación del compuesto estaría inducida posiblemente por ambos tipos de foto receptores aunque con los datos disponibles no es posible definir el grado de importancia de cada uno de ellos en la biosíntesis del compuesto. Para el caso de los frutos madurados en la oscuridad, parece posible indicar que durante el desarrollo de los frutos, en la planta, hay cierta expresión de los foto receptores que posteriormente inducen la vía de síntesis de licopeno; esto representaría un nivel basal de foto receptores a los cuales se les asociaría la síntesis de licopeno de esos frutos. Durante la maduración poscosecha de los frutos, es posible que bajo diferentes ambientes de espectros de luz halla una estimulación de nuevos receptores dependientes de esas condiciones de iluminación que explicarían los posteriores incrementos de concentración de licopeno. A este respecto, las respuestas a la luz moduladas por lo foto receptores implican un proceso que complejo de activación/desactivación de los receptores. El mecanismo de acción de estos foto receptores inicia cuando son activados por la luz, que los hace migrar a la membrana celular para desencadenar una cascada de señales que llevan a sintetizar licopeno (Liu y col., 2004).

7.2.3. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)

El uso de iluminación emitida por lámparas de descarga de alta intensidad es una práctica común dentro de los invernaderos. En esta sección se emplearon estas fuentes de luz para evaluar el efecto de estos tipos de luz en la acumulación de licopeno y desarrollo de color durante la maduración de los frutos en poscosecha.

7.2.3.1. Espectros de lámparas HID

Los espectros de las lámparas de descarga de alta intensidad propuestos para estos experimentos fueron obtenidos directamente del fabricante los cuales se muestran en la Figura 14. Las lámparas de alta presión de sodio (HPS) emiten un mayor porcentaje de luz roja (Figura 14b) en comparación de las lámparas de halogenuros metálicos (HID) que emiten, comparativamente, un mayor porcentaje de luz azul; por ello estas últimas se utilizaron como fuente de luz azul y las primeras como fuente de luz roja.

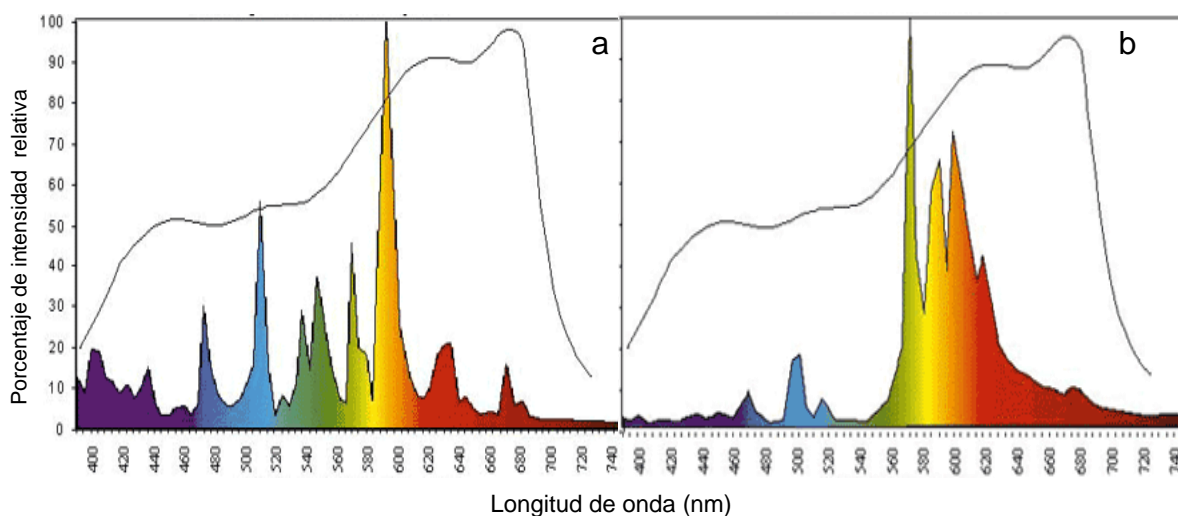


Figura 14. Espectros de energía relativa para las lámparas de alta intensidad HID, halogenuros metálicos (a) alta presión de sodio HPS (b).

7.2.3.2. Desarrollo de color y contenido de licopeno bajo el espectro de luz de lámparas HID.

Después de 8 y 12 días, los frutos tratados con luz roja (lámpara de HPS) mostraron mayor color en comparación con los frutos tratados con luz azul (MH) o en oscuridad (Cuadro 8); mientras que para el contenido de licopeno, también los frutos tratados con luz roja mostraron mayores valores a partir del día 4 (Cuadro 9). Estos datos coinciden con los resultados observados en frutos tratados con filtros de papel celofán y LEDs lo cual confirma que la luz roja tiene un mayor efecto en el desarrollo del color y en la acumulación de licopeno.

Cuadro 8. Valores de color superficial a^* de frutos de tomates cv. WV63 madurados en diferentes condiciones de luz: alta presión de sodio (HPS) para luz roja y halogenuros metálicos (MH) para luz azul, tratamiento de oscuridad como control. Los tratamientos de luz fueron por 60 minutos.

Tratamiento Luz	Días			
	0	4	8	12
Oscuridad	-16.78 _a	-12.53 _a	7.15 _b	7.36 _b
Azul	-14.72 _a	-12.86 _a	22.11 _b	21.74 _{ab}
Rojo	-17.35 _a	-13.40 _a	26.13 _a	25.60 _a
	NS	NS	*	**

*. **, diferencia significativa a $\alpha < 0.05$, 0.01 respectivamente NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey a $P < 0.05$).

Cuadro 9. Contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$ fruto liofilizado) en frutos de tomate cv. WV63 madurados en diferentes condiciones de luz: alta presión de sodio (HPS) para luz roja y halogenuros metálicos (MH) para luz azul, tratamiento de oscuridad como control. Los tratamientos de luz fueron por 60 minutos.

Tratamiento luz	Días			
	0	4	8	12
Oscuridad	35.90 _a	112.06 _b	288.19 _{ab}	335.05 _b
Azul	32.94 _a	187.35 _a	197.08 _b	395.37 _{ab}
Rojo	23.26 _a	197.24 _a	250.07 _a	443.49 _a
	NS	*	***	**

*. **, ***, diferencia significativa a $\alpha < 0.05$, 0.01, 0.001 respectivamente NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey a $P < 0.05$).

7.2.4. Efecto de la duración del tiempo de exposición a las fuentes de luz sobre la síntesis de licopeno

Diferentes estudios señalan que la duración de la exposición a las fuentes de luz, pueden afectar el proceso de acumulación de licopeno (Alba y col., 2000). Por ello se realizaron un conjunto de experimentos para evaluar el efecto del tiempo de exposición a las fuentes de luz en la acumulación de licopeno de los frutos.

7.2.4.1. Acondicionamiento de las cámaras para el desarrollo de los experimentos.

La densidad de Flujo de fotones (PPFD) de cada lámpara no era constante bajo toda el área iluminada por las mismas y esta varió de 60 hasta 180 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Debido a esta variación en PPFD, que podía afectar las respuestas de los frutos, hubo la necesidad de ubicar los frutos en las zonas más adecuadas para el tipo de iluminación que se quería estudiar. Las cajas con frutos no expuestos a tratamientos de luz (oscuridad) fueron colocados en las áreas donde hubo la menor cantidad de PPFD, mientras que las cajas con frutos expuestos a un

tratamiento de luz de 10, 60 o 240 minutos, fueron colocados en áreas con PPFd entre 100 y 120 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Adicionalmente, se colocaron repeticiones de los experimentos en diferentes zonas de iluminación (Figura 15) y los frutos bajo oscuridad fueron tapados para evitar la entrada de luz.

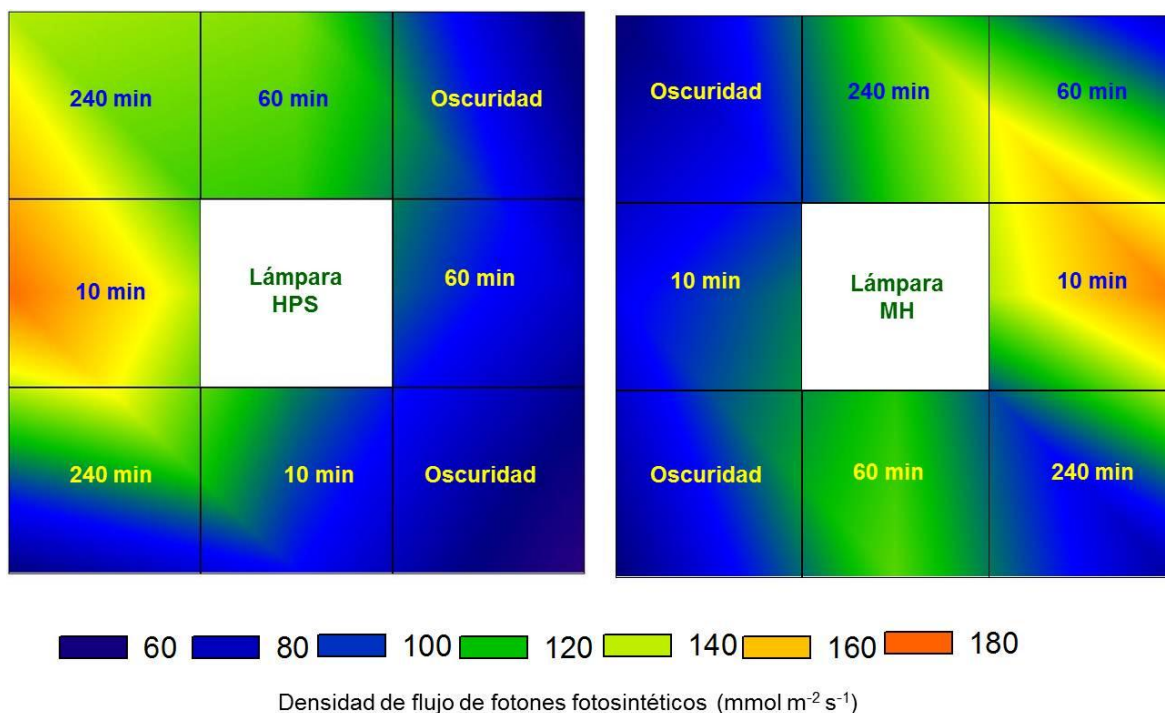


Figura 15. Densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) en 2 cámaras de maduración, cada una con una fuente de luz: alta presión de sodio (HPS) y halogenuros metálicos (MH). Se muestra la distribución de las cajas con frutos de tomate para diferentes tiempos de exposición. (Oscuridad, 10, 60 y 240 min).

En los cuadros 10 y 11 se aprecian los efectos significativos de la fuente de luz y tiempos de exposición sobre el índice de color ($*a/b*$) y contenido de licopeno respectivamente, el índice de color y contenido de licopeno fueron más altos en los frutos expuestos durante 60 minutos. No obstante, solo los frutos tratados con luz roja, tuvieron valores significativamente más altos en el contenido de licopeno, en comparación con los frutos tratados con MH. Esto nuevamente indicó que el espectro de luz roja induce un mayor acumulación de este compuesto y que además hubo un tiempo óptimo de exposición para lograr un mayor desarrollo de color y acumulación de licopeno dado que al exponer los frutos durante 240 min se

observó una disminución del índice de color y del contenido de licopeno disminuye hasta el grado de tener valores menores que los frutos que no fueron expuestos a ningún tratamiento de luz.

Cuadro 10. Índice de color de frutos de tomate expuestos a dos diferentes Fuentes de luz: azul (lámpara de halogenuros metálicos MH) y rojo (lámpara de alta presión de sodio HPS) por 0,10, 60 y 240 minutos por día almacenados 11 días a 20°C

Tiempo de exposición por día (min)	Índice de color a*/b*	Fuente de luz	
		Luz	Índice de color a*/b*
0	1.019 ^{bc}	Azul (MH)	1.030 ^a
10	1.036 ^{ab}	Rojo (HPS)	1.025 ^a
60	1.055 ^a		
240	1.000 ^c		
Significancia	***		NS

***, diferencia significativa a $\alpha < 0.001$ respectivamente NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey a $P < 0.05$).

Cuadro 11. Contenido de licopeno de frutos de tomate expuestos a dos diferentes Fuentes de luz: azul (lámpara de halogenuros metálicos MH) y rojo (lámpara de alta presión de sodio HPS) por 0,10, 60 y 240 minutos por día almacenados 11 días a 20°C

Tiempo de exposición por día (min)	Contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Fuente de luz	
		Luz	Contenido de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$)
0	513.39 ^{bc}	Azul (MH)	520.64 ^b
10	525.41 ^b	Rojo (HPS)	533.06 ^a
60	568.96 ^a		
240	499.63 ^c		
Significancia	***		**

***, diferencia significativa a $\alpha < 0.01$ y 0.001 respectivamente NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey a $P < 0.05$).

Análisis estadísticos separados de los dos factores estudiados (tiempo de exposición y fuente de luz) indicaron que los frutos tratados con luz roja (HPS) por

60 minutos tuvieron el valor más alto de los índices de color a^* y a^*/b^* y el contenido de licopeno.

Estos resultados son consistentes con lo que la literatura reporta, acerca de que la luz roja estimula la acumulación de carotenoides en especial del licopeno (Alba y col. 2000; Thomas y Jen 1975), debido a que la luz roja (HPS) tiene una proporción relativamente alta de su espectro en la longitud de onda roja (660-730 nm) las cuales activan los fitocromos que regulan la síntesis de licopeno, a diferencia de los tratamientos con luz azul (MH) que su proporción en luz roja es mucho menor.

Cuando se utilizaron tiempos de 240 minutos el contenido de licopeno fue muy bajo en comparación con tratamientos de 10 ó 60 minutos, esto contrasta con los que menciona Welsh y col. (2000) que entre más proporción de luz tenga la planta mayor contenido de carotenoides presentará, este comportamiento se pudo observar si se hubieran considerado tiempos intermedios que no fueron evaluados en estos experimentos que pudieron incluir tiempos de 120 ó 180, sin embargo se puede suponer que el bajo contenido que presentaron los frutos expuestos por 240 minutos pudo ser debido al incremento del estrés oxidativo asociado con los altos niveles de radiación.

Frutos que reciben altos niveles de radiación muestran altos niveles de compuestos que indican la degradación de membranas lipídicas y compuestos antioxidantes tales como el licopeno (Rosales y col., 2006). También habría que tomar en cuenta que la temperatura del fruto expuesto por un periodo largo a irradiación pudo haber incrementado la temperatura del pericarpio y esto causó la degradación del licopeno, por lo tanto es importante tomar en cuenta que la síntesis de licopeno es dependiente de la longitud de onda de la luz, la intensidad acumulada de la misma y la temperatura, entre más tiempo se exponga a irradiación mayor contenido de licopeno acumulará, pero este comportamiento no

debe ser por periodos largos ya que por estrés oxidativo y degradación por altas temperaturas el contenido de licopeno disminuye. Para este experimento el tratamiento de frutos madurados por 60 minutos con luz roja fue el que se ocupó para el siguiente experimento.

7.2.4.2. Correlación índice color con contenido de licopeno

Para evaluar el comportamiento de los frutos madurados con luz contrastados con los frutos madurados en oscuridad, se correlacionó el índice de color (a^*/b^*) con el contenido de licopeno con la finalidad de estimar el contenido de licopeno mediante la medición del color a través de una técnica rápida y sencilla (colorimetría). La Figura 16 muestra la relación lineal de todos los datos para índice de color y contenido de licopeno obtenidos en ambos tratamientos. El coeficiente de correlación lineal obtenido fue de 0.84 el cual fue mayor que el reportado por D'Souza y col. (1992) pero más bajo que lo reportado por Arias y col. (2000b) 0.77 y 0.93 respectivamente. Los resultados indicaron que el índice de color a^*/b^* es un índice confiable para poder estimar el contenido de licopeno

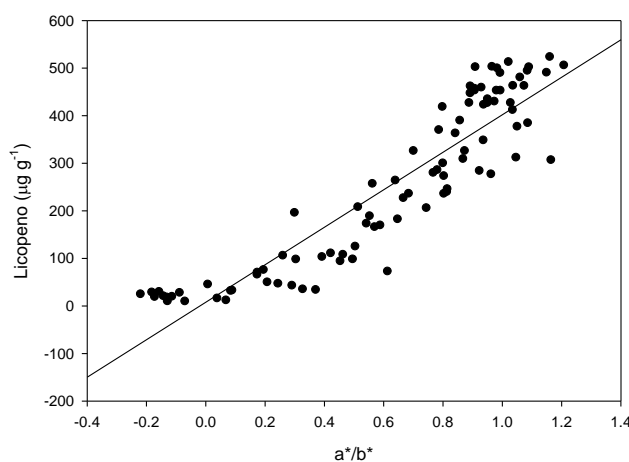


Figura 16. Regresión lineal del índice de color a^*/b^* y contenido de licopeno de frutos de tomate expuestos a tratamientos de luz o almacenados en oscuridad a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

7.2.5. Cambios de color y contenido de licopeno durante la maduración de frutos tratados con luz roja y en oscuridad.

Para evaluar las diferencias entre los frutos expuestos a luz roja (HPS) durante 60 minutos por día durante 11 días con frutos madurados en oscuridad (procesos convencional y comercial) se compararon los cambios en el índice de color, firmeza, sólidos solubles totales y contenido de licopeno durante el proceso de maduración a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$. En el cuadro 12 se muestran los valores de los diferentes factores y la comparación estadística entre ambos tratamientos.

Cuadro 12. Efecto de la maduración de frutos de tomate expuestos luz roja (HPS) por 60 minutos por día u oscuridad por 11 días a $20^{\circ}\text{C} \pm 2$, sobre la firmeza, contenido de sólidos solubles (SSC), índice de color y licopeno.

Tratamiento	Firmeza (kg/m ²)	SSC °Bx	Índice de color a*/b*	Licopeno μg g ⁻¹
Oscuridad	9.85 ^a	3.9 ^a	1.00 ^b	455.86 ^b
Luz roja (HPS)	11.5 ^a	3.5 ^a	1.12 ^a	498.56 ^a
Significancia	NS	NS	*	**

*, ** diferencia significativa a $\alpha < 0.05$ y 0.01 respectivamente NS no significativo. Letras diferentes en cada columna, indican diferencias significativas (Tukey a $P < 0.05$).

La firmeza y los sólidos solubles no mostraron diferencia significativa entre los dos tratamientos mientras que el índice de color y contenido de licopeno fueron más altos en frutos tratados con luz roja (HPS) que los frutos madurados en oscuridad.

Estos datos son consistentes con los datos reportados por Alba y col. (2006) quienes indicaron que frutos de tomate expuestos a luz roja por 5 minutos por día incrementaron el contenido de licopeno 2.3 veces más que frutos mantenidos en

oscuridad o expuestos a luz roja lejana por 15 minutos. Los mismos autores también no encontraron diferencias en firmeza entre los frutos tratados con luz roja, roja lejana y oscuridad, lo cual sugiere que la actividad del fitocromo involucrado en la síntesis de licopeno no está involucrado en el ablandamiento del fruto.

Sin embargo, en otros trabajos se ha demostrado que bajo condiciones de oscuridad, los factores de interacción entre el fitocromo (PIFs) unido al promotor de la enzima Fitoeno sintasa (PSY), la cual es una enzima reguladora en la producción de licopeno, suprime su expresión. Esto lleva a una disminución de la síntesis de licopeno. Por otro lado la luz roja degrada los PIFs, en un proceso mitigado por fitocromos foto activados, permitiendo la expresión de PSY y por lo tanto la producción de licopeno (Nagatani, 2000; Schofield y Paliyath, 2005; Welsh y col., 2000 y Hannoufa y Hossain, 2012).

En la figura 17 se muestran los cambios del índice de color durante los 11 días de almacenamiento a $20^{\circ} \text{C} \pm 2$ de frutos expuestos a irradiación de luz roja (HPS) 60 minutos por día comparados con frutos madurados en oscuridad. Los frutos de tomate almacenados en oscuridad mostraron un índice de color ligeramente menor que los valores de los frutos tratados con luz roja (HPS) lo cual es importante destacar ya que la diferencia entre el índice de color entre tratamientos se mantuvo constante durante el periodo de evaluación y por lo tanto el tratamiento con luz roja contribuye a desarrollar el color del fruto, lo cual le da una apariencia visual más aceptable.

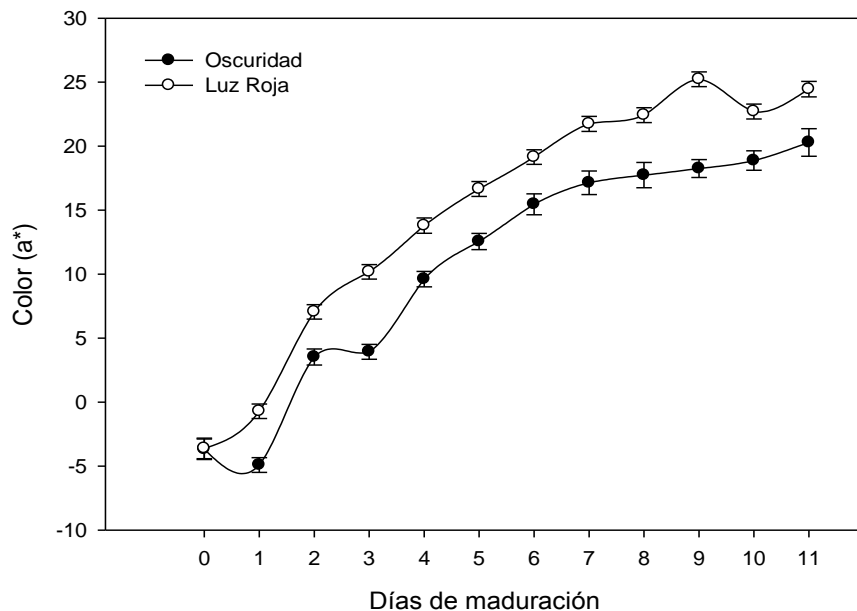


Figura 17. Cambios en el índice de color de frutos de tomate expuestos a luz roja (HPS) por 60 minutos por día u oscuridad durante 11 días a $20^{\circ}\text{C} \pm 2$

Durante el periodo de almacenamiento los frutos tratados con luz roja, mostraron el contenido de licopeno mayor que los frutos almacenados en oscuridad (Figura 18)

Estos resultados confirman que el tratamiento de luz roja durante 60 minutos por día, puede mejorar el color rojo del tomate y acumulación de licopeno durante el almacenamiento poscosecha, posiblemente por la activación de los fitocromos y la regulación de la síntesis de la enzimas fitoeno sintasa favoreciendo la síntesis de licopeno (Alba y col., 2000; Giliberto y col., 2005; Schofield y Paliyath, 2005 y Hannoufa y Hossain, 2012).

Sin embargo, la acumulación de licopeno en el presente estudio fue menor que lo observado por otros investigadores (Alba y col., 2000) quienes registraron valores de licopeno 2.3 veces mayor que los frutos tratados con luz roja (5 minutos por día) en comparación con los frutos almacenados en oscuridad.

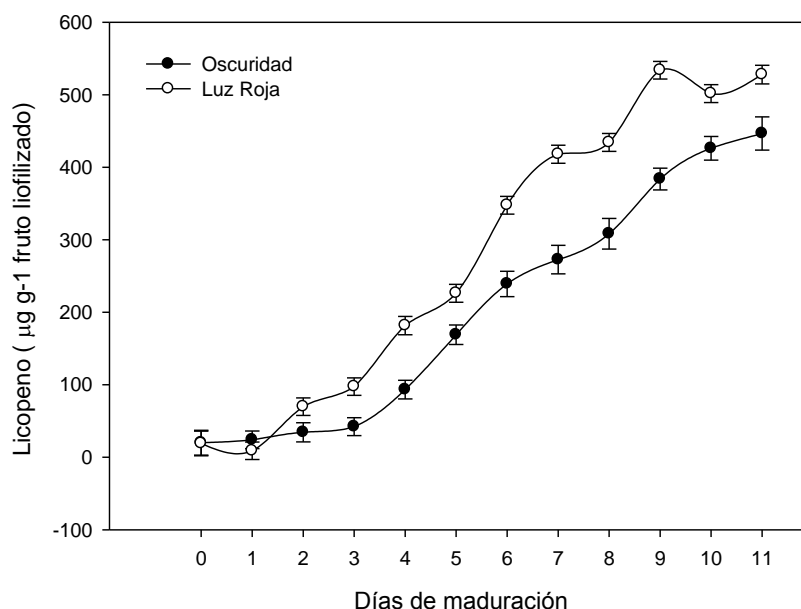


Figura 18. Cambios en el contenido de licopeno de frutos de tomate expuestos a luz roja (HPS) por 60 minutos por día u oscuridad por 11 días a $20^{\circ}\text{C} \pm 2$

Estas diferencias pueden deberse al cultivar usado en cada estudio pero podrían también influir las diferencias en la intensidad global de la fuente de luz utilizada y la temperatura del pericarpio de los frutos. Otros autores (Thomas y Jen, 1975) observaron un similar incremento en la acumulación de carotenoides a los reportados por Alba y col. (2000) utilizando lámparas de menor intensidad de luz roja 213 mW cm^{-2} en comparación con la intensidad de luz utilizada en este experimento que fueron de 400 mW cm^{-2} , lo cual como se discutió anteriormente la alta intensidad de radiación disminuye la cantidad de licopeno, ya que indirectamente las temperaturas del pericarpio incrementan y esto conlleva a una degradación del licopeno ya sintetizado.

Los incrementos de licopeno en frutos expuestos a tratamientos con luz cuando se utilizaron tiempos de 10 y 60 minutos suponían que entre mayor exposición de luz tengan los frutos mayor contenido de licopeno acumularían, sin embargo en este trabajo a 240 minutos de exposición este comportamiento fue de

manera contraria, por lo que habría que considerar utilizar tiempos intermedios entre 60 y 240 minutos para corroborar hasta que momento de exposición se logra mantener el incremento de licopeno.

El mecanismo por lo cual ocurre esta disminución, no está bien definido, es posible que el exceso de luz puede inactivar los fitocromos, o la degradación de los PIFs lo cuales bloquearían la expresión de la enzima fitoeno sintasa (Hannoufa y Hossain, 2012) con la correspondiente disminución del contenido de licopeno. También es importante considerar que el exceso de luz tanto en tiempo como en intensidad puede inducir la degradación de licopeno a β -caroteno como algunos autores han sugerido (Dumas y col., 2002), aunque también esto tenga que ver con el incremento de la temperatura del pericarpio del fruto.

VIII. CONCLUSIONES

El tipo de cubierta de los invernaderos y el periodo de muestreo tuvieron una influencia muy importante sobre el contenido de licopeno de los frutos; la doble capa de plástico K50 Clear + K50 IR/AC permitió una mayor acumulación de licopeno en la semana 32 ($414 \mu\text{g g}^{-1}$ tejido liofilizado) en comparación a la cubierta de vidrio recubierta con CaCO_3 ($241 \mu\text{g g}^{-1}$ tejido liofilizado).

Los resultados de este trabajo indicaron que la alta intensidad luminosa en el exterior de la cubierta de polietileno de doble capa K50 Clear + K50 IR/AC facilitaron el paso de la luz roja lo cual mejoró la biosíntesis de licopeno mientras que en el invernadero de vidrio cubierto con CaCO_3 controló la temperatura pero disminuyó la trasmisión de luz y no mejoró la trasmisión de luz roja ni la biosíntesis de licopeno.

Los resultados aquí obtenidos indicaron que los tratamientos con distintas longitudes de onda de luz influyen directamente sobre la acumulación de color y licopeno, siendo más notorio cuando se utilizaron fuentes de luz roja.

Después de 6 días de tratamiento, los frutos expuestos bajo diodos LEDs de luz roja aumentaron 30 % su contenido de licopeno respecto de los frutos mantenidos en la oscuridad, sin afectar la firmeza y contenido de sólidos solubles de los frutos.

Las lámparas de descarga de alta intensidad de luz roja (HPS) incrementaron un 32 % el contenido de licopeno y mostraron un mejor color respecto de los frutos mantenidos en la oscuridad.

La exposición prolongada de los frutos a las fuentes de luz (4 horas) no propició una mayor síntesis de licopeno, lo cual indica que no hay una asociación lineal entre el tiempo de exposición de la luz y la acumulación de licopeno.

La influencia de la luz sobre la mejora de color y acumulación de licopeno parece ser más dependiente de las longitudes de onda de luz que del tiempo de exposición de los frutos a dicha fuente de luz.

IX. LITERATURA CITADA

- Alba, R., Codonnier-Pratt, M.M., y Pratt, L.H., 2000. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato. *Plant Physiol.* 123, 363-370.
- Anza, M., Riga, P., y Garbisu, C., 2006. Effects of variety y growth season on the organoleptic y nutritional quality of hydroponically grown tomato. *J. Food Qual.* 29,16-37.
- Aphalo, P. 2006. Light signals and the growth and development of plants a gentle introduction. University of Helsinki, Finland. 7-36.
- Arab, L., y Steck, S. 2000. Lycopene y cardiovascular disease. *The Am. J. Clin. Nutr.* 71 (suppl), 1691S–1695S.
- Arias, R. Lee, T.C. Specca, D y Janes H. 2000. Quality comparision of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) ripened on off vine. *Journal of food science.* 65(3):545-548.
- Arias, R., Lee, T., Logendra, L., y Janes, H., 2000b. Correlation of lycopene measured by HPLC with the L*, a*, b* color readings of a hydroponic tomato y the relationship of maturity with color y lycopene content. *J. Agri. Food Chem.* 48, 1697-1702.
- Atherton, J.G. y Rudich, J. 1996. The tomato crop: A scientific basis for improvement. Chapman and Hall.
- Baeza, E. y López , J.C. 2012. Light transmission through greenhouse covers. *Acta Hort.* 956:425-440.

- Barber, N. J., y Barber, J., 2002. Lycopene y prostate cancer. *Prostate Cancer y Prostatic Diseases*. 5, 6–12.
- Bartley, G.E. y Scolnick, P.A. 1995. Plant carotenoids: pigments for photoprotection, visual attraction y human health. *The Plant Cell*. 7:1027-1038.
- Bonhne F., y H. Linden. 2005. Regulation of carotenoid biosynthesis genes in response to light in *Chlamidomonas reinhartii*. *Biochimica et Biophysica Acta – Gene Structure and Expression*. 1579(1) : 26-34.
- Bramley, P.2002. Regulation of carotenoid formation during tomato fruit ripening and development. *Journal of Experimental Botany*. 53(377):2107-2113.
- Brandt, S., Pék, Z., Barna, E., Lugasi A., y Lajos, H., 2006. Lycopene content and color of ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 86:568-572.
- Bringas, G.L.2004 Producción de tomates en climas extremos. En: *Cultivo de Tomate. Productores de hortalizas*. 8:10-13.
- Bryt, S., Pék, Z., Barna, E., Lugasi A., y Lajos, H., 2006. Lycopene content y color of ripening tomatoes as affected by environmental conditions. *J. Sci. Food y Agric*. 86:568-572.
- Cabibel, M., y Ferry, P., 1980. Evolution de la teneur en caroténoïdes de la tomate en fonction de la maturation et des conditions culturales. *Annal. Technol. Agric*. 29 (1) : 27-46.
- California Tomato Commission, 2002. <http://www.tomato.org/retail/color.html>.

- Collins J. K., P. Perkins-Veazie, y W. Roberts. 1999. Lycopene: from Plants to Humans. HortScience 41 (5): 1135 – 1144.
- Conn, P.F. Schalch, W, Truscott, T.G. 1991. The singlet oxygen and carotenoid interaction, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology.11(1) : 41-47.
- D'Souza M. S., Singha S., y Ingle M. 1992. Lycopene concentration of tomato fruit can be estimated from chromaticity values. HortSci. 27(5), 465-466.
- Davies, J.N., y Hobson, G.E., 1981. The constituents of tomato fruit. The influence of environment, nutrition y genotype. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 15 (3), 205-280.
- De Rijk, P. 2008. Evolución del sector de agricultura protegida en México [http://www.amhpac.org/contenido/plan consulta](http://www.amhpac.org/contenido/plan_consulta) (enero de 2010).
- De Visser, P.H.B., Buck-Sorlin, G.H., van der Heijden, G.W.A.M. y Marcelis, L.F.M. 2012. A 3d model of illumination, light distribution and crop photosynthesis to simulate lighting strategies in greenhouses. Acta Horticulturae. 956:195-200.
- Dorais M. 2007. Effect of cultural management on tomato fruit health qualities. Acta Horticulturae. 744. 279 – 294.
- Dorais, M., Badrane, M., Gosellin, A., Hao, X., y Papadopoulos, A., 2002. Greenhouse covering materials y supplemental lighting affect growth, yield, photosynthesis, y leaf carbohydrate synthesis of tomato plants. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 127 (5), 819-824.
- Dorais, M., Ehret D.L., y Papadopoulos, A.P. 2008. Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer. Phytochem. Rev. 7: 231 – 250.

- Dueck, T., Janse, J., Li, T., Kempkes, F. y Eveleens, B. 2012. Influence of diffuse glass on the growth and production of tomato. *Acta Horticulturae*. 956:75-82
- Dumas, Y., Dadomo, M., Di Lucca G., y Grolier P., 2003. Effects of environmental factors y agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *J. Sci. of Food y Agric.* 83, 369-382.
- Dumas, Y., Dadomo, M., Di Lucca, G. y Grolier, P. 2002. Review of the influence of major environmental y agronomic factors on the lycopene content of tomato fruit. *Acta Horticulturae*. 579:595-601.
- FAOSTAT Data Base. 2011. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> Consulta 15 de Junio de 2013.
- Farkas, J. 1994: Tomato, (Paradicsom). In Balázs S (ed.). *Hybook of vegetable growers. (Zöldségtermesztők kézikönyve)* Mezőgazda Kiadó, Budapest. p. 195-226.
- Fernández, J., González, A., Bañón, S., y Gallego, J. 1992. Cultivo de tomate en la región de murcia. *Hortofruticultura*. Junio:29-34.
- Fraser, P., Romer, S., Shipton, C., Mills, P., Kiano, J., Misawa, N., Drake, R., Schuch, W., y Bramley, P., 2002. Evaluation of transgenic tomato plants expressing an additional phytoene synthase in a fruit-specific manner. *Proc. Nat. Am. Sci.* 99(2):1092-1097.
- Fraser, P.D. Truedale, M.R. Bird C.R. Schuch, W. y Bramley, P.M. 1994. Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development. *Plant Physiology*, 5:405-413.

- Gautier H., Diakou-Verdin V., Bernard C., Reich M., Buret M., Bourgad F., Poessel J.L., Caris-Veyrat C., y Genard M. 2008. How does tomato quality (sugar, acid, y nutritional quality) vary with ripening stage, temperature, y irradiance? *J. Agric. Food Chem.* 56, 1241 – 1250.
- Giliberto, L. Perrotta, G. Pallara, P. Weller, J.L. Fraser, P.D. Bramley, P.M. Fiore, A. Tavazza, M. y Giuliano, G. 2005. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiology.* 137:199-208.
- Giovanelli, G., Lavelli, V., Peri, C. y Nobili, S. 1999. Variation in antioxidant components of tomato during vine and post-harvest ripening. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 79: 1583–1588.
- Giovanucci, E. Ascherio A. Rimm, E.B. Stampfer, M.J. Colditz, G.A. y Willet W.C. 1995. Intake of carotenoids y retinol in relation to risk of prostate cancer. *Journal Nature Cancer Institute.* 87:1767-1776.
- Giuliano, G., Bartley, G. y Scolnik, P. 1993. Regulation of carotenoid biosynthesis during tomato development. *The plant cell.* 5:379-387.
- Goto, E. 2012. Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. *Acta Horticulturae.* 956:37-49.
- Gould, W.A. 1992. *Tomato production, processing y technology.* Baltimore. CTI publisher. 607-614.
- Hannoufa A., y Z. Hossain (2012) Regulation of carotenoid accumulation in plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology.* 1: 198 – 202.

- Helyes L., y Lugasi A. 2006. Formation of certain compounds having technological y nutritional importance in tomato fruits during maturation. *Acta Alim.* 35 (2), 183 – 193.
- Hemming, S. van der Braak, N. Dueck, T. Jongschaap, R. y Marissen, N. 2006. Filtering natural light by the greenhouse covering using model simulations - more production and better plant quality by diffuse light?. *Acta Horticulturae.* 711:105-110.
- Hernández R. y C. Kubota. 2012. Tomato seedling growth and morphological responses to supplemental LED lighting red:blue ratios under varied daily solar light integrals. *Acta Horticulturae* 956. 187 - 194
- Heuvelink, E., Bakker, M.J., Hogendonk, L., Janse, J., Kaarsemaker, R. y Maaswinkel, R. 2006. Horticultural lighting in the netherlands: new developments. *Acta Horticulturae.* 711:25-34.
- Hyman, J., Gaus J., y Foolad M.R. 2004. A Rapid y Accurate Method for Estimating Tomato Lycopene Content by Measuring Chromaticity Values of Fruit Purée. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 129 (5), 717-723.
- Ishida, B.K. Jason, M y Chan B. 2001. A simple, rapid method for HPLC analysis of lycopene isomers. *Pytochemical Analysis.* 12:194-198.
- Johjima, T. y Matzuso, N. 1995. Relationship between color value (a/b) y colored carotene content in fruit of various cultivar y breeding lines. *Acta horticulturae.* 412:152-159.
- Jokinen, K., Särkkä , L.E. y Näkkilä, J. 2012. Improving sweet pepper productivity by led interlighting. *Acta Horticulturae.* 956:59-66.

- Kader, A.A. Stevens, M.A., Albright-Holton, M. Morris, L.L. y Algazi, M. 1977. Effect of fruit ripeness when picked on flavor and composition in fresh market tomatoes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 102(6):724-731.
- Kim, H.H., Wheeler, R.M., Sager, J.C., Gains, G.D. y Naikane, J.H. 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 Center. *Acta Horticulturae.* 711:111-120.
- Koskitalo, L.H., y Omrod, D.P., 1972. Effects of suboptimal ripening temperatures on the colour quality and pigment composition of tomato fruit. *J. Food Sci.* 37, 56-59.
- Liu, Y., S. Roof, Z. Ye, C. Barry, A. van Tuinen, J. Vrebalov, Ch. Bowler, y J. Giovannoni. 2004. Manipulation of light signal transduction as a means of modifying fruit nutritional quality in tomato. *Proceedings of National Academy of Sciences (PNAS).* 101 (26). 9897 – 9902.
- López, H.J.C. 1998. Materiales de cubierta para invernaderos: desarrollo de nuevas formulaciones. Memoria del Encuentro medioambiental almeriense: en busca de soluciones.
- López-Camelo, A.F., y Gómez, P.A. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Hort. Brasil.*, 22, (3), 534-537.
- López-Yréu, F.J., Lamela, A., Esteban, R.M., y Collado, J.G., 1986. Evolution of quality parameters in the maturation stage of tomato fruit. *Acta Hort.* 191, 387-394.
- Matallana, G.A. y Montero C., 1995. Invernaderos: Diseño, construcción y climatización. Ediciones Mundiprensa. 209 p.

- McCaskill, D., y Croteau R. 1998 Some caveats for bioengineering terpenoid metabolism in plants; *Trends Biotechnol.* 16: 349–355.
- Moe, R., Grimstad, S.O. y Gislerod, H.R. 2006. The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in norway. *Acta Hort. (ISHS)* 711:35-42.
- Molyneux, S.L. Lister, C.E. y Savage, G.P. 2004. An investigation of the antioxidant properties and colour of glasshouse grown tomatoes. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 55(7): 537-545.
- Nagatani A. 2000. Lighting up the nucleus. *Science* 288 (5467): 821-822
- Nanya K., Y. Ishigami, S. Hikosaka, y E. Goto. 2012. Effects of Blue and Red Light on Stem Elongation and Flowering of Tomato Seedlings. *Acta Horticulturae.* 956. 261 - 266
- Noble, R., y Holder., 1989. Pot plant production under various greenhouse cladding materials. *J. of Hort. Sci.* 64, 485-493.
- Ocaña, R.C. 2004. Ventajas competitivas y comparativas. El tomate en México y Estados Unidos. En: *Cultivo de Tomate. Productores de hortalizas.* 8:45-48.
- Papadopoulos, A.P., y Hao X., 1997. Effects of the greenhouse covers on seedless cucumber growth, productivity y energy use. *Scientia Hort.* 68, 113-123.
- Pearce, B.D., Grange, R.I., y Hardwick, K., 1993. The growth of young tomato fruit. I. Effects of temperature y irradiance on fruit grown in controlled environments. *J. Hort. Sci.* 68 (1), 1-11.

- Pék Z., y Helyes L. 2010. Color changes y antioxidant content of vine y postharvest ripened tomato fruits. HortSci. 45 (3), 466-468.
- Pék, Z., Szuvyzsiev, P., Nemenyi, A., y Helyes, L.. 2011. The effect of natural Light on changes in antioxidant content y color Parameters of vine-ripened tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Fruits. HortSci. 46 (4), 583–585.
- Pérez, M., Lao, M.T. y Scherer, G. 2006. Influence of different lamps on the growth and development on the short day plant *kalanchoe blossfeldiana*. Acta Hort. 711:261-266.
- Rick, C.M. 1978. The tomato. Scientific American. 239(2):76-87.
- Robertson, G.H., Mahoney, N.E., Goodman, N., y Pavlath A.E., 1995. Regulation of lycopene formation in cell suspension culture of VFNT (*Lycopersicon esculentum*) by CPTA, growth regulators, sucrose y temperature. J. Exp. Bo. 46 (287), 667-673.
- Rosales, M. A., Cervilla L.M., Sánchez-Rodríguez E., Rubio-Wilhelmi M. M., Blasco B., Ríos J. J., Soriano T., Castilla N., Romero L., y Ruiz J.M. 2010. The effect of environmental conditions on nutritional quality of cherry tomato fruits: evaluation of two experimental Mediterranean greenhouses. J. Sci. Food Agric. 91, 152-162.
- Rosello S., Adalid A.M., Cebolla-Cornejo J., y Nuez F.. 2011. Evaluation of the genotype, environment y their interaction on carotenoid y ascorbic acid accumulation in tomato germplasm. J. Sci Food y Agric. 91, 1014-1021.
- SAGARPA (2012), Agricultura Protegida 2012. Recuperado el día 28 de Febrero 2012 en <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx>.

Shi J., Le Maguer M., y Bryan M.. 2002. Lycopene from tomatoes. In Shi J., Ghazza, y Le Maguer M. (Eds). Funtional foods. Biochemical y processing aspects. Vol 2. CRC Press. Ottawa. Canada. p 135- 166.

Shi, J., Le Maguer, M., Kakuda, Y., Liptay, A., y Niekamp, F., 1999. Lycopene degradation y isomerization in tomato dehydration. Food Res. Int.. 32:15-21.

Schofield, A. Paliyath, G. 2005. Modulation of carotenoid biosynthesis during tomato fruit ripening through phytochrome regulation of phytoene synthase activity. Plant Physiology and Biochemistry. 43(12):1052-1060.

SIAP. 2011. Sistema de Información Agropecuaria. http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350. Consulta 15 de Junio de 2013.

Silviero, P. Syei, L. y Zanotti, G. 2000. Valutazione del contenuto di licopene in ibridi di pomodoro da industria 'HP' (high pigment). Inf Agrario. 12:83-87.

Simkin A.J., Ch. Zhu, M. Kuntz, y G. Sandmann. 2003. Light – dark regulation of carotenoid biosynthesis in pepper (*Capsicum annuum*) leaves. J. of Plant Physiol. 160 (5): 439 – 443.

Stevens, M.A., y Rick, C.M., 1986. Genetics y Breeding: fruit quality. In: Atherton, J.G., y Rudich, J. (Eds.), The tomato crop: A scientific basis for improvement. Chapman y Hall. London. pp. 84-96.

- Thai, C.N., Shewfelt, R.L., y Garner, J.C., 1990. Tomato color changes under constant y variable storage temperatures: empirical models. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 33 (2), 607-614.
- Thomas R.L., y Jen J.J. 1975. Red light intensity y carotenoids biosynthesis in ripening tomatoes. *J. Food Sci.* 40, 566-568.
- Thompson, K.A. Marshall, M.R. Sims, C.A. Wei, C.I. Sargent, S.A. y Scott, J.W. 2000, Cultivar, Maturity, and Heat Treatment on Lycopene Content in Tomatoes. *Journal of Food Science*, 65: 791–795.
- Ting IP. 1982. *Plant Physiology*. Addison-Wesley, Reading, MA. 635 pp.
- Toor R.K., Savage G.P., y Lister C.E.. 2006. Seasonal variations in the antioxidant composition of greenhouse grown tomatoes. *J. Food Comp. Anal.* 19, 1-10.
- Van Leperen, W. 2012. Plant Morphological and Developmental Responses to Light Quality in a Horticultural Context. *Acta Horticulturae*. Acta Horticulturae. 956: 131 -
- Welsh, R. Beyer, P. Hugueney, P. Kleinig, H., y Von Lintig, J. 2000. Regulation and activation of phytoene synthase, a key enzyme in carotenoid biosynthesis, during photomorphogenesis. *Planta*. 211(6):846-854.