

CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE TOMATE EN RESPUESTA A RADIACIÓN SOLAR TRANSMITIDA POR MALLAS SOMBRA

Growth and Yield of Tomato in Response to Sun Radiation Transmitted by Shade Nets

Felipe Ayala-Tafoya^{1‡}, Daniela María Zatarain-López¹, Marino Valenzuela-López¹, Leopoldo Partida-Ruvalcaba¹, Teresa de Jesús Velázquez-Alcaraz¹, Tomás Díaz-Valdés¹ y Jesús A. Osuna-Sánchez²

RESUMEN

Las mallas sombra negras y aluminadas son ampliamente utilizadas en el cultivo protegido de plantas hortícolas como técnica de control de la luz y la temperatura. Recientemente han salido al mercado mallas de colores con propiedades fotométricas especiales para mejorar el aprovechamiento de la radiación solar. En la presente investigación se evaluó la fotoselectividad de mallas negras, aluminadas, grises, azules, rojas y perladas, cada una con 50 y 30% de sombra, a través de la radiación total (350 a 1050 nm), radiación fotosintéticamente activa (400 a 700 nm), luz azul (400 a 500 nm), luz roja (600 a 700 nm) y luz roja lejana (700 a 800 nm) que transmitieron; así como el efecto que ocasionaron en el crecimiento y producción de frutos en plantas de tomate (*Solanum lycopersicon*) cultivadas en invernadero. Los resultados indican que las mallas de colores alteraron la cantidad y calidad de luz transmitida sobre las plantas de tomate. No obstante, ninguna de las propiedades fotométricas medidas en las mallas pareció particularmente destacable, sino que posiblemente fue la asociación de todas esas propiedades la que influyó para que las plantas de tomate que crecieron bajo la malla perla con 30% de sombra presentaran tallos más gruesos y menos largos, menor área foliar específica, uno de los mayores contenidos de clorofila foliar, el mayor rendimiento y la mejor calidad de tomate. De acuerdo con los resultados obtenidos, las mallas de color perla con 30 a 50% de sombra constituyen una alternativa para mejorar el cultivo

de tomate de invernadero, ya que incrementaron significativamente los rendimientos total (28.1%) y exportable (48.4%), comparados con los respectivos rendimientos promedio obtenidos con las mallas negras y aluminadas con los mismos porcentajes de sombra, habitualmente utilizadas por los productores de tomate de invernadero.

Palabras clave: *Solanum lycopersicon*, mallas de colores, cantidad de luz, calidad de luz, invernadero.

SUMMARY

Blacks and aluminated shade nets are widely used in the protected crop of vegetables as a technique of control of light and temperature. Recently appeared in the market colored shade nets with special optical properties to improve the use of the solar radiation. In the present investigation the photoselectivity of blacks, aluminated, gray, blue, red and pearly plastic nets was evaluated, each one with 50 and 30% of shadow, through the total radiation (350 to 1050 nm), photosynthetic active radiation (400 to 700 nm), blue light (400 to 500 nm), red light (600 to 700 nm) and far red light (700 to 800 nm) transmitted; as well as the effect that causes in the growth and production of fruits in plants of tomato cultivated in greenhouse. The results indicate that the colored shade nets altered the quantity and quality of the light transmitted. Nevertheless, none of the photometric properties measured in the plastic nets seemed particularly notable, but possibly was the association of all those properties the one that influenced so that the plants of tomato that grew under the pearly net with 30% of shadow presented thicker and shorter stems, smaller specific leaf area, one of the greater contents of chlorophyll, the larger yield and the best quality of tomato. According to the results obtained, the pearly color net with 30 to 50% of shadow constitute an alternative to improve the greenhouse tomato cultivation, since it increased significantly the total (28.1%) and

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-Eldorado km 17.5 Apartado Postal 726. 80000 Culiacán, Sinaloa, México.

[‡] Autor responsable (tafoya@uas.uasnet.mx)

² Instituto Tecnológico de Culiacán. Juan de Dios Batiz s/n, Col. Guadalupe. 80220 Culiacán, Sinaloa, México.

exportable (48.4%) yield, compared with the respective average yield obtained with the black and aluminated nets with the same percentages of shadow, habitually utilized by the producers of greenhouse tomato.

Index words: *Solanum lycopersicon, colored shade nets, light quantity, light quality, greenhouse.*

INTRODUCCIÓN

La utilización de mallas plásticas para sombrear o como pantallas termorreflectoras es una técnica de control de la temperatura cada vez más extendida en la horticultura protegida, con la cual se busca disminuir la intensidad de la radiación, para evitar altas de temperatura durante los períodos cálidos (Valera *et al.*, 2001), o para el ahorro de energía en invierno (Anglés, 2001). Las mallas utilizadas con dichos fines son negras y aluminadas, respectivamente. Las primeras se usan más que las segundas porque cuestan menos, pero son poco selectivas a la calidad de la luz; es decir, sombrean por igual en toda la banda del espectro electromagnético, causando disminución de la fotosíntesis y consecuentemente en el rendimiento agrícola (Valera *et al.*, 2001). De ahí que recientemente se haya iniciado el desarrollo de mallas plásticas de sombreo con propiedades ópticas especiales, como un nuevo enfoque para mejorar el uso de la radiación solar en los cultivos agrícolas (Ganelevin, 2008). Éstas son mallas sombra de colores, cada una de las cuales modifica específicamente el espectro de la luz filtrada en las regiones ultra-violeta, visible y rojo lejano, e intensifica su dispersión (luz difusa), y afecta sus componentes térmicos (región infrarroja), en función de los aditivos cromáticos del plástico y el diseño del tejido (Oren-Shamir *et al.*, 2001; Shahak *et al.*, 2004).

De acuerdo con Shahak (2008), la nueva tecnología fomenta la estimulación diferencial de algunas respuestas fisiológicas reguladas por la luz tales como la fotosíntesis, que transforma la energía solar en energía química utilizando luz de longitudes de onda entre 400 y 700 nm, conocida como radiación fotosintéticamente activa (RFA), absorbida principalmente por los pigmentos clorofílicos; y la fotomorfogénesis, que incluye efectos sobre la elongación del tallo, expansión foliar, desarrollo de cloroplastos, síntesis de clorofila, y muchos otros metabolitos secundarios, en respuesta a la incidencia de luz azul (400 a 500 nm), roja (600 a 700 nm) y roja lejana (700 a 800 nm), percibidas por fotorreceptores biológicos,

principalmente fotocromos y criptocromos, presentes en pequeñas cantidades en las plantas (Decoteau *et al.*, 1993).

El objetivo del presente trabajo de investigación fue valorar agrónomicamente la fotoselectividad de mallas sombra de colores, que empiezan a aparecer en la escena de los textiles agrícolas, así como de las mallas sombra negra y aluminada, tradicionalmente usadas en invernaderos por los productores de hortalizas, para determinar su influencia sobre la cantidad y calidad de la radiación solar y, el efecto de cada color de malla sobre el crecimiento y rendimiento de frutos en plantas de tomate cultivadas en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en un invernadero de producción comercial localizado en Culiacán, Sinaloa (24° 48' 30" N, 107° 24' 30" O y 38.54 m de altitud). El invernadero está orientado de norte a sur, es de estructura metálica, altura de 4.5 m al canal pluvial y 8.0 m a la cumbre. Está conformado por seis naves de 8.0 m de ancho en una superficie total de 5280 m². La cubierta es en forma de doble arco cerrada con película de plástico incolora (LDPE 180 µm, estabilización tipo Hals, transmisividad ≥ 87%, turbidez ≤ 35%). Sus ventanas son cenitales y perimetrales cerradas con malla anti-insectos (16 × 16 hilos cm⁻²). Contiene sistemas de producción hidropónica, sombreo, tutorado y monitoreo de temperatura y humedad relativa.

Se utilizaron plántulas de tomate cv. Alondra injertada (tomate cv. Beaufort) producida en charolas de poliestireno expandido de 128 cavidades, la cual se trasplantó a una densidad de 2.4 plantas m⁻², colocando dos plantas por cada bolsa de polietileno (blanca, 100 µm) con 15 L de tezontle negro. La fertirrigación se manejó conforme al programa de la empresa agrícola mediante un equipo Xilema NP 35.

Se emplearon mallas tejidas tipo Rashel con un tamaño de orificio de 3 × 2 mm para 50% de sombra y 6 × 8 mm para 30% de sombra, de color rojo (RO), azul (AZ), perla (PE) y gris (GR), y de 3 × 6 mm y 6 × 8 mm para los mismos porcentajes de sombreo, en las mallas aluminadas (AL) y negras (NE), de acuerdo con los datos del fabricante (Polysack Plastic Industries, Ltd.). Las mallas fueron colocadas antes del trasplante, por encima de los tutores a una altura de 3.5 m, como parte del dispositivo de sombreo móvil del invernadero. No obstante, en el área de influencia del presente estudio

y durante todo el ciclo de cultivo, las mallas sombra de colores se mantuvieron extendidas durante el día y solamente se plegaron durante la noche para evitar excesivo incremento de la humedad relativa.

El diseño experimental utilizado en esta investigación consideró los factores color y porcentaje de sombra de las mallas, con seis y dos niveles, respectivamente. De tal manera que las combinaciones posibles formaron 12 tratamientos: NE₅₀, NE₃₀, GR₅₀, GR₃₀, AL₅₀, AL₃₀, AZ₅₀, AZ₃₀, RO₅₀, RO₃₀, PE₅₀ y PE₃₀, los cuales se establecieron en el invernadero con cuatro repeticiones, utilizándose tres camas de 8 m de largo como parcela experimental (60 m²) y como parcela útil la cama central.

Se realizaron mediciones del espectro de transmisión de radiación solar, en la banda de 350 a 1050 nm a intervalos de 1 nm, por medio de un espectrorradiómetro portátil FieldSpec Pro[®]VNIR (Analytical Spectral Devices, Inc.) equipado con un receptor coseno, el cual se colocó a 1 m sobre el nivel del suelo. Todas las mediciones fueron realizadas durante condiciones de cielo despejado entre 12:00 y 13:30 h (hora local) a intervalos de 3 min, en el centro de cada una de las mallas sombra. A partir de los datos obtenidos en dichas mediciones, se analizaron también los intervalos de longitud de onda de 400 a 700 nm (radiación fotosintéticamente activa), 400 a 500 nm (luz azul), 600 a 700 nm (luz roja) y 700 a 800 nm (luz roja lejana).

También se evaluaron aspectos relacionados con el crecimiento de las plantas de tomate, específicamente diámetro y longitud de los tallos, área foliar específica

(área foliar por unidad de peso seco) y el contenido de clorofila en las hojas utilizando un estimador de clorofila SPAD-502 (Konica Minolta Sensing, Inc.). Cada una de estas variables fue obtenida a través del muestreo de 16 plantas por tratamiento.

El rendimiento experimental de tomate se determinó cosechando los frutos en estado de madurez comercial y se clasificaron en tomate con calidad de exportación, para mercado nacional y no comercial o de rezaga.

Los resultados se examinaron estadísticamente mediante análisis de varianza y prueba DMS ($\alpha \leq 0.05$) para la separación de medias, con el programa STATISTICA 5.1 (StatSoft, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que las mallas modificaron la cantidad y calidad de la radiación solar percibida por las plantas de tomate (Cuadro 1), a causa del color de la malla y su porcentaje de sombra. La radiación total (RT, 350 a 1050 nm) en el cielo abierto y dentro del invernadero era de 599.5 y 272.4 W m⁻², respectivamente, mientras que la RT transmitida por las mallas varió desde 105.1 y 123.4 W m⁻² bajo las mallas AL₅₀ y NE₅₀, hasta 204 y 211.1 W m⁻² en las mallas AZ₃₀ y RO₃₀, de manera respectiva. La malla RO₃₀ transmitió 3.1, 9.4, 18.2, 18.7 y 36.3% más radiación total que las mallas azul, perla, gris, aluminada y negra, con ese mismo porcentaje de sombreo, respectivamente. Mientras que entre las mallas con 50% de sombra,

Cuadro 1. Cantidad y calidad de la radiación (W m⁻²) transmitida por las mallas de colores.

Mallas	Radiación total (350-1050 nm)	RFA [†] (400-700 nm)	Luz azul (400-500 nm)	Luz roja (600-700 nm)	Luz roja lejana (700-800 nm)
NE ₅₀	123.4 ± 0.32 i [‡]	62.3 ± 0.24 h	17.8 ± 0.09 j	22.1 ± 0.08 h	21.4 ± 0.07 j
NE ₃₀	134.5 ± 1.56 h	67.9 ± 0.95 g	19.1 ± 0.30 h	24.3 ± 0.32 g	23.4 ± 0.22 i
GR ₅₀	152.8 ± 0.25 f	77.4 ± 0.14 e	21.9 ± 0.04 g	27.7 ± 0.05 e	26.5 ± 0.04 h
GR ₃₀	172.7 ± 1.82 d	89.0 ± 0.93 c	25.0 ± 0.25 c	31.8 ± 0.35 c	29.7 ± 0.30 e
AL ₅₀	105.1 ± 1.20 j	50.6 ± 0.71 j	15.2 ± 0.22 k	17.2 ± 0.24 j	17.9 ± 0.18 k
AL ₃₀	171.6 ± 0.39 d	87.4 ± 0.30 d	26.2 ± 0.11 b	29.8 ± 0.08 d	28.6 ± 0.05 g
AZ ₅₀	145.9 ± 0.85 g	63.7 ± 0.37 h	22.6 ± 0.12 f	18.2 ± 0.11 i	21.4 ± 0.12 j
AZ ₃₀	204.6 ± 1.67 b	97.3 ± 2.11 a	29.7 ± 0.17 a	32.0 ± 0.32 bc	33.1 ± 0.30 c
RO ₅₀	154.1 ± 1.01 ef	60.9 ± 0.34 i	15.1 ± 0.06 k	27.7 ± 0.18 e	31.7 ± 0.25 d
RO ₃₀	211.1 ± 1.87 a	94.5 ± 1.07 b	24.5 ± 0.29 d	38.8 ± 0.40 a	40.5 ± 0.31 a
PE ₅₀	156.0 ± 0.64 e	70.8 ± 0.28 f	18.5 ± 0.06 i	26.9 ± 0.12 f	29.0 ± 0.12 f
PE ₃₀	191.3 ± 0.83 c	87.0 ± 0.60 d	23.2 ± 0.17 e	32.4 ± 0.22 b	35.6 ± 0.11 b

[†] RFA = radiación fotosintéticamente activa; [‡] Medias de cuatro repeticiones ± desviación estándar con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $\alpha \leq 0.05$). NE = negra; GR = gris; AL = aluminada; AZ = azul; RO = roja; PE = perla.

la malla perla transmitió 1.2, 2.0, 6.5, 20.9 y 32.6% más radiación total que las mallas roja, gris, azul, negra y aluminada, respectivamente.

De manera semejante ocurrió con la radiación fotosintéticamente activa (RFA, 400 a 700 nm), que en el cielo abierto y dentro del invernadero era de 384.5 y 139.5 W m⁻², respectivamente, mientras que la malla AL₅₀ sólo permitió el paso de 50.6 W m⁻² comparados con 94.5 y 97.3 W m⁻² registrados debajo de las mallas RO₃₀ y AZ₃₀, respectivamente. La malla AZ₃₀ transmitió 2.9, 8.5, 10.2, 10.6 y 30.2% más RFA que las mallas roja, gris, aluminada, perla y negra, con ese mismo porcentaje de sombra, respectivamente. En las mallas con 50% de sombra, la de color gris transmitió 77.4 W m⁻², los cuales fueron 8.5, 17.7, 19.5, 21.3 y 34.6% mayores a los que transmitieron las mallas perla, azul, negra, roja y aluminada, respectivamente.

En estos resultados se denota que las mallas sombra de colores transmitieron diferentes cantidades de radiación total y fotosintética, lo cual se debe a que en la malla negra sólo la radiación que pasa a través de los orificios de la malla es transmitida, ya que los hilos de plástico negro son esencialmente opacos. En la aluminada, parte de la luz es reflejada y dispersada. Sin embargo, las mallas de colores, las cuales son tejidas más densamente para lograr el mismo efecto de sombreo, una mayor fracción de la radiación solar pasa a través de los hilos plásticos y es filtrada selectivamente (Oren-Shamir *et al.*, 2001; Shahak, 2008).

Así, los resultados indican que las mallas NE₅₀ y AL₅₀ fueron las más eficaces para reducir RT y RFA, ya que sombrearon 54.8 a 61.2 y 55.3 a 63.7%, respectivamente, mientras que las mallas AZ₅₀, GR₅₀, RO₅₀ y PE₅₀ excedieron entre 3.5 y 7.2% la radiación total, y las mallas PE₅₀ y GR₅₀ transmitieron 0.8 y 4.5% por arriba de la RFA prevista (50%). Las mallas AZ₅₀ y RO₅₀ redujeron 54.3 y 56.3% la RFA. Tal variación entre el porcentaje de sombra de las mallas encontrada en este estudio con respecto a la especificación dada por el fabricante (50%), coincide con los resultados obtenidos en Israel por Oren-Shamir *et al.* (2001), quienes al evaluar mallas de colores (negra, gris, aluminada, verde, roja y azul) con 50% de sombra en el rango de la RFA, encontraron que el sombreo varió de 49.2 a 57.6% en abril y de 50.8 a 59.0% en octubre. Estos hallazgos también coinciden con los resultados de Retamates *et al.* (2008), quienes al comparar la RFA transmitida por mallas negras, blancas, grises y rojas con 35 y 50% de sombra, reportaron que las mallas sombra blanca 35

y 50%, gris 35 y 50% y roja 35% redujeron la RFA en 29%, mientras que las mallas sombra roja 50% y negra 35 y 50% disminuyeron la RFA en 41, 47 y 53%, respectivamente, con respecto a la RFA del tratamiento testigo, sin malla. Quizá por eso, y porque son más baratas, las mallas negras son de las más utilizadas para sombrear plantas y evitar excesos de temperatura durante los períodos con alta radiación solar (> 300 W m⁻²) y como consecuencia más cálidos (Valera *et al.*, 2001).

Respecto a la transmisión de luz azul (A, 400 a 500 nm), roja (R, 600 a 700 nm) y roja lejana (RL, 700 a 800 nm), de nueva cuenta la malla AL₅₀ fue la que transmitió menos luz, con valores respectivos de 15.2, 17.2 y 17.9 W m⁻², mientras que las mayores transmisiones de luz A se obtuvieron en la malla AZ₃₀, con 29.7 W m⁻², y de luz R y RL debajo de la malla RO₃₀, con 38.8 y 40.5 W m⁻², respectivamente (Cuadro 1), revelando también la capacidad fotoselectiva de las mallas de colores para sombrear cualitativamente.

En este sentido, Rajapakse y Kelly (1992) evaluaron la cantidad y calidad de la luz transmitida por filtros espectrales de CuSO₄ al 4, 8 y 16%, y encontraron que además de reducir la radiación total en 26, 36 y 47%, respectivamente, la cual promediaba 950 μmol m⁻² s⁻¹, también redujeron la luz R y RL e incrementaron las relaciones R:RL, A:RL y A:R de luz transmitida comparado con el testigo (filtros de agua). Por su parte, Oren-Shamir *et al.* (2001), al estudiar la luz transmitida por mallas cromáticas, indicaron que la malla azul presentó un amplio pico de transmitancia alrededor de los 470 nm, así como de RL más allá de los 750 nm. La malla verde tuvo una transmisión máxima alrededor de los 520 nm, así como un incremento gradual de la transmitancia en RL. La malla roja presentó mayor transmitancia a partir de los 590 nm y un pico menor alrededor de 400 nm. Mientras que las mallas negra, aluminada y gris no modificaron el espectro en el rango visible.

Las variables del crecimiento y cantidad de clorofila foliar evaluadas en las plantas de tomate, también fueron afectadas significativamente por la cantidad y calidad de radiación solar transmitida por las mallas (Cuadro 2). El diámetro de los tallos se incrementó a causa de mayores cantidades de RT (191.3 a 211.1 W m⁻²), RFA (87 a 97.3 W m⁻²) y luz A (23.2 a 29.7 W m⁻²) o R (32 a 38.8 W m⁻²) transmitidas por las mallas RO₃₀, AZ₃₀ y PE₃₀; mientras que menores transmisiones de RT (105.1 a 152.8 W m⁻²) y RFA (50.6 a 77.4 W m⁻²) encontradas bajo las mallas GR₅₀ y AL₅₀ provocaron

Cuadro 2. Efectos ocasionados por las mallas de colores en aspectos del crecimiento y lecturas SPAD en hojas de plantas de tomate.

Mallas	Diámetro de tallo ----- cm -----	Longitud de tallo	Área foliar específica cm ² g ⁻¹ de PS [†]	Lecturas SPAD
NE ₅₀	1.33 ± 0.13 cd [‡]	257.8 ± 14.2 c-e	163.2 ± 2.7 de	35.0 ± 3.1 d
NE ₃₀	1.34 ± 0.12 b-d	258.6 ± 6.9 c-e	164.0 ± 4.1 de	38.4 ± 4.2 b-d
GR ₅₀	1.27 ± 0.14 d	270.4 ± 8.1 a	172.8 ± 6.1 c-e	35.7 ± 4.1 d
GR ₃₀	1.28 ± 0.14 d	265.4 ± 8.7 a-c	186.0 ± 45.5 a-c	40.2 ± 4.6 ab
AL ₅₀	1.25 ± 0.12 d	268.8 ± 14.8 ab	191.6 ± 39.7 ab	36.0 ± 3.7 cd
AL ₃₀	1.35 ± 0.12 b-d	255.2 ± 8.9 de	172.0 ± 10.1 c-e	42.8 ± 5.4 ab
AZ ₅₀	1.25 ± 0.16 d	259.5 ± 14.8 b-e	199.7 ± 9.3 a	39.7 ± 8.3 a-c
AZ ₃₀	1.42 ± 0.12 a-c	250.3 ± 11.4 de	166.1 ± 7.6 de	43.1 ± 5.0 a
RO ₅₀	1.35 ± 0.13 b-d	259.4 ± 15.0 b-e	180.7 ± 23.1 b-d	38.6 ± 3.9 b-d
RO ₃₀	1.44 ± 0.10 ab	253.8 ± 10.4 de	159.0 ± 1.9 ef	42.5 ± 4.7 a
PE ₅₀	1.43 ± 0.12 a-c	259.4 ± 14.1 b-e	165.6 ± 9.5 de	36.2 ± 3.8 cd
PE ₃₀	1.49 ± 0.12 a	249.4 ± 17.5 e	145.9 ± 1.9 f	41.5 ± 4.8 ab

[†] Peso seco; [‡] Medias de 16 repeticiones ± desviación estándar con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $\alpha \leq 0.05$). NE = negra; GR = gris; AL = aluminada; AZ = azul; RO = roja; PE = perla.

que la longitud de los tallos aumentara. El área foliar específica fue mayor en plantas que crecieron bajo la influencia de las mallas AZ₅₀ y AL₅₀, debido a que recibieron menores cantidades de RT (105.1 a 145.9 W m⁻²) y RFA (50.6 a 63.7 W m⁻²), y consecuentemente se aumentó el área foliar por gramo de peso seco, es decir, las plantas produjeron hojas más grandes pero también más delgadas (Páez *et al.*, 2000); mientras que bajo la influencia de las mallas PE₃₀ y RO₃₀ se observaron los valores más bajos, o sea, mayor peso por unidad de área foliar, traducidos en hojas de mayor espesor y fotosintéticamente más aptas (Oguchi *et al.*, 2003). El nivel más alto de lecturas SPAD (> 40) se correspondió con incrementos en la transmisión de RT, RFA y luz A o R, obtenidos por las plantas que crecieron bajo las mallas AZ₃₀, RO₃₀, AL₃₀, PE₃₀ y GR₃₀, lo que coincide con Murchie y Horton (1998), quienes observaron correlación entre las variables referidas.

Dichas características están relacionadas con el vigor (Degli *et al.*, 2003) y el estado nutricional de las plantas, especialmente afín a la concentración de nitrógeno en las hojas (Rodríguez *et al.*, 1998), e influidas por ambientes enriquecidos con luz R y A, de mayor eficiencia fotosintética (Zeinalov y Maslenkova, 2000); también se corresponden con efectos fotomorfogénicos regulados por fitocromos y criptocromos, ligados a la extensión del tallo o la expansión foliar (Decoteau *et al.*, 1993), el desarrollo de cloroplastos (Chun *et al.*, 2001) y la cantidad de clorofila en las hojas (Carter y Spiering, 2002).

El rendimiento de tomate también fue afectado por las diferentes cantidades y calidades de radiación solar encontradas en cada uno de los tratamientos estudiados (Cuadro 3). Con 191.3 W m⁻² de RT y 87.0 W m⁻² de RFA encontradas en la malla PE₃₀ se alcanzaron los valores más altos en rendimiento total comercial (RTC), con calidad de exportación (RE) y para rezaga (RR); mientras que con 145.9 W m⁻² de RT y 63.7 W m⁻² de RFA transmitidas por la malla AZ₅₀ se cosechó más tomate para mercado nacional (RN). Las mallas con 30% de sombreo influyeron para conseguir mayores RTC, RE y RR, aunque sin diferencia estadística con las mallas con 50% de sombreo en el RN. Así, con la malla PE₃₀ se obtuvo un RTC de 169.4 Mg ha⁻¹, estadísticamente igual al conseguido con las mallas AZ₃₀, PE₅₀, NE₃₀, GR₃₀ y AL₃₀; aunque en valores absolutos los superó desde 16 hasta 22%. Los menores RTC se obtuvieron con las mallas AL₅₀ y NE₅₀ (RT/RFA: 105.1/50.6 y 123.4/62.3, respectivamente), 40 y 36% menos con respecto a PE₃₀.

Los mayores rendimientos de frutos que se correspondieron con mayores transmisiones de RT y RFA, coinciden con lo informado por El-Aidy (1991), quien reportó que el rendimiento de pepino se incrementó conforme redujo el sombreo de 63 a 40% durante la etapa de verano. Estos resultados también son congruentes con Shahak *et al.* (2008), quienes utilizaron mallas roja, amarilla y perla con 30 a 40% de sombra y obtuvo rendimientos de pimienta morrón de 115 a 135% más altos comparados con el rendimiento que cosechó

Cuadro 3. Efecto causado por la radiación solar transmitida por las mallas de colores en la calidad del rendimiento (Mg ha⁻¹) de tomate en invernadero.

Mallas	Total comerciable	Exportación	Nacional	Rezaga
NE ₅₀	107.8 ± 25.6 bc [†]	073.0 ± 17.3 c-e	34.9 ± 8.3 b-e	07.2 ± 1.7 c-e
NE ₃₀	136.1 ± 32.3 a-c	103.4 ± 24.5 b	32.7 ± 7.8 c-e	09.7 ± 2.3 bc
GR ₅₀	126.0 ± 29.9 bc	080.2 ± 19.0 b-e	45.9 ± 10.9 ab	05.6 ± 1.3 ef
GR ₃₀	135.5 ± 32.1 a-c	092.9 ± 22.0 b-d	42.5 ± 10.1 a-c	06.8 ± 1.6 de
AL ₅₀	100.3 ± 23.8 c	061.4 ± 14.6 e	38.9 ± 9.2 a-d	03.7 ± 0.9 f
AL ₃₀	132.6 ± 31.5 a-c	088.7 ± 21.0 b-e	44.0 ± 10.4 a-c	08.9 ± 2.1 cd
AZ ₅₀	114.9 ± 27.3 bc	066.5 ± 15.8 de	48.4 ± 11.5 a	03.7 ± 0.9 f
AZ ₃₀	142.1 ± 33.7 ab	98.1 ± 23.3 bc	43.9 ± 10.4 a-c	07.5 ± 1.8 c-e
RO ₅₀	112.5 ± 26.7 bc	082.7 ± 19.6 b-e	29.8 ± 7.1 de	05.6 ± 1.3 ef
RO ₃₀	121.4 ± 28.8 bc	094.5 ± 22.4 bc	27.0 ± 6.4 e	09.5 ± 2.3 bc
PE ₅₀	135.9 ± 32.2 a-c	105.4 ± 25.0 b	30.6 ± 7.3 de	11.6 ± 2.7 ab
PE ₃₀	169.4 ± 40.2 a	136.8 ± 32.4 a	32.6 ± 7.7 c-e	13.5 ± 3.2 a

[†] Medias de cuatro repeticiones ± desviación estándar con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $\alpha \leq 0.05$). NE = negra; GR = gris; AL = aluminada; AZ = azul; RO = roja; PE = perla.

con la malla negra del mismo nivel de sombra. Adicionalmente, de acuerdo con Shahak *et al.* (2004) la malla perla (PE) tiene una mayor difusión de luz (62%) que las mallas roja (35.6%), amarilla (44.1%), azul (26.0%), gris (20.1%) y negra (11.4%). Esta última malla, incluso con un valor de luz difusa menor al 13.3% encontrado en el tratamiento sin malla (cielo abierto), demuestra que esencialmente no difunde la luz. También refieren que debido a que la luz difusa penetra mejor los doseles densos, la exposición de las plantas a la luz total bajo las mallas de colores (difusoras) es mayor que en las mallas negras. Por lo que las plantas bajo una malla de color con 30% de sombra realmente capta más luz que aquellas bajo una malla sombra negra 30%.

Las mallas también influyeron significativamente en el rendimiento de tomate con calidad para exportación. Con las cantidades de RT (191.3 W m⁻²) y RFA (87.0 W m⁻²) cuantificadas bajo la malla PE₃₀ se cosechó el máximo RE, 136.8 Mg ha⁻¹. Después se ubicaron los RE logrados con las mallas PE₅₀ y NE₃₀ (RT/RFA: 156.0/70.8 y 134.5/67.9, respectivamente), en las cuales se cosechó 23 y 25% menos que en PE₃₀ (Cuadro 3). De igual manera que en el RTC, el menor RE se obtuvo con la malla AL₅₀, seguida de las mallas AZ₅₀ y NE₅₀, donde se cosecharon 55, 51 y 46% menos que en la malla PE₃₀. Estos resultados coinciden con los de Fallik *et al.* (2009), quienes encontraron que el pimiento morrón cultivado en una región árida bajo mallas sombra de color rojo y amarillo, tuvo un rendimiento de fruta con calidad de exportación significativamente mayor en comparación con la malla sombra negra del mismo nivel de sombreado;

asimismo, concuerdan con los obtenidos por El-Aidy (1991), quien informó que la calidad de los frutos de pepino se incrementó conforme redujo el sombreado de 63 a 40% en verano, obteniendo con 40% de sombra los mejores resultados.

Con respecto al efecto ocasionado por mallas sombra de colores sobre la RFA transmitida y el rendimiento de frutos por las plantas, también hay coincidencia con los resultados de Retamates *et al.* (2008), quienes al comparar el rendimiento de arándano azul (*Vaccinium corymbosum* L.) obtenido bajo mallas de colores con respecto a un testigo sin malla, encontraron que con la malla blanca de 35% de sombra, se incrementaron los rendimientos en 90.5 y 44.6%, 59.6 y 24.9% con la malla gris 35% y, 84.2 y 31.9% con la malla roja 50% en dos años consecutivos, respectivamente. Estos autores también indicaron que la malla negra, comúnmente utilizada por los agricultores, tuvo efectos negativos sobre el rendimiento. Los rendimientos con la malla sombra negra 35% fueron 37.2 y -8%, mientras que con la malla sombra negra 50% fueron -3.2 y -28% con respecto al testigo sin malla, durante los dos años, respectivamente.

El RN tuvo su mejor expresión con la radiación solar transmitida por la malla AZ₅₀ (48.4 Mg ha⁻¹). Sin embargo, su valor fue estadísticamente igual al RN obtenido con la cantidad y calidad de la radiación solar presente bajo las mallas GR₅₀, AZ₃₀, AL₃₀, GR₃₀ y AL₅₀, con las cuales se superó el rendimiento logrado en el testigo comercial (NE₅₀), en porcentajes que fluctuaron desde 10 hasta 28%.

La mayor cantidad de tomate de rezaga (RR) ocurrió con la radiación solar transmitida por la malla PE₃₀, donde se obtuvieron 13.5 Mg ha⁻¹. El menor RR (3.7 Mg ha⁻¹) se obtuvo en las mallas AL₅₀ y AZ₅₀. Dichos volúmenes de frutos, comparados con el RTC bajo las mismas condiciones, representaron 8, 4 y 3%, respectivamente.

La radiación solar transmitida por la malla PE₃₀ promovió mayores rendimientos de tomate en cuatro de los cinco calibres más grandes analizados (22, 32, 35 y 39), aunque en dos de ellos fue estadísticamente igual a los rendimientos obtenidos con las mallas GR₃₀ y NE₃₀ (32) o la malla AZ₃₀ (35). Los mayores rendimientos de tomate calibre 28 se lograron con las mallas GR₃₀ y NE₃₀. Bajo las mallas rojas, perladas, grises, negras y AZ₃₀ se presentaron los mayores rendimientos de tomate calibre 45, mientras que la radiación solar transmitida por la malla GR₅₀ influyó para que el rendimiento de tomate del calibre más pequeño (52) fuera mayor (Cuadro 4).

CONCLUSIONES

- El porcentaje de sombra o diseño del tejido de las mallas y la pigmentación del plástico influyeron en la capacidad de transmisión de radiación solar. Las mallas negras y aluminadas con 50% de sombra transmitieron las menores cantidades de radiación total (105.1 a 123.4 W m⁻²) y fotosintética (50.6 a 62.3 W m⁻²), es decir, fueron las mallas más eficaces para sombrear.

Las mallas de colores con 30% de sombra, excepto la negra, transmitieron mayores cantidades de radiación total (171.6 a 211.1 W m⁻²) y fotosintética (87 a 97.3 W m⁻²).

- Tales propiedades fotométricas de las mallas influyeron en el crecimiento de las plantas de tomate. El diámetro de los tallos se incrementó a causa de una mayor cantidad de radiación total (191.3 a 211.1 W m⁻²), fotosintética (87 a 97.3 W m⁻²) y de luz azul (23.2 a 29.7 W m⁻²) o roja (32 a 38.8 W m⁻²) transmitidas por las mallas roja, azul y perla con 30% de sombra; mientras que las mallas gris y aluminada con 50% de sombra, con las menores transmisiones de radiación total (105 a 152.8 W m⁻²) y fotosintética (50.6 a 77.4 W m⁻²), promovieron alargamiento de plantas. El área foliar específica fue mayor bajo la influencia de la radiación solar transmitida por las mallas azul y aluminada con 50% de sombra; mientras que la radiación filtrada por las mallas perla y roja con 30% de sombra promovió los valores más bajos. Un mayor contenido de clorofila en hojas se correspondió con más radiación total y fotosintética encontrada en cada una de las mallas azul, roja, aluminada, perla y gris con 30% de sombra.

- Consecuentemente, también se obtuvieron diferentes respuestas de rendimiento y calidad de tomate. Con la radiación solar transmitida por la malla perla con 30% de sombra se cosecharon los mayores rendimientos, total y con calidad para exportación, incluyendo cuatro de cinco calibres comerciales (22, 28, 32, 35 y 39) clasificados también como frutos extragrandes, grandes

Cuadro 4. Distribución de calibres en el rendimiento (Mg ha⁻¹) de tomate con calidad de exportación obtenido con las mallas de colores.

Mallas	Calibre de los frutos						
	22 [†]	28	32	35	39	45	52
NE ₅₀	0.37 e [‡]	1.46 d-f	07.24 f	27.40 c-e	23.35 cd	09.51 a-d	3.65 b-d
NE ₃₀	0.73 d	4.67 a	16.82 ab	37.85 bc	29.55 bc	10.73 ab	3.04 cde
GR ₅₀	0.73 d	1.17 ef	10.28 d-f	29.57 c-e	21.41 cd	10.58 ab	6.45 a
GR ₃₀	0.73 d	4.08 ab	18.69 a	33.32 b-e	21.58 cd	10.27 a-c	4.26 b
AL ₅₀	0.37 e	2.04 cd	07.24 f	24.84 de	17.69 d	06.75 d	2.43 e
AL ₃₀	1.46 c	3.50 b	11.91 c-e	35.29 b-d	24.24 cd	08.13 b-d	4.14 bc
AZ ₅₀	0.73 d	1.75 c-e	08.18 ef	24.05 e	20.00 d	07.51 cd	4.26 b
AZ ₃₀	1.83 b	2.33 c	12.61 cd	42.78 ab	25.30 cd	09.97 a-c	3.28 b-e
RO ₅₀	1.46 c	0.88 f	08.18 ef	31.94 c-e	25.48 cd	11.35 a	3.41 b-e
RO ₃₀	0.37 e	1.75 c-e	13.55 b-d	36.08 bc	29.02 bc	09.35 a-d	4.38 b
PE ₅₀	1.46 c	1.75 c-e	14.48 bc	37.46 bc	35.56 b	10.89 ab	3.77 bc
PE ₃₀	2.96 a	3.50 b	19.39 a	51.26 a	49.01 a	08.89 a-d	2.55 de

[†] Número de frutos por caja (tipo charola con una sola tanda de frutos); [‡] Medias con letras distintas en la misma columna son estadísticamente diferentes (DMS, $\alpha \leq 0.05$). NE = negra; GR = gris; AL = aluminada; AZ = azul; RO = roja; PE = perla.

y medianos. Los menores niveles de radiación solar transmitidos por las mallas negra y aluminada con 50% sombra causaron los rendimientos totales y exportables más bajos. Con la radiación solar transmitida por la malla azul con 50% de sombra se consiguió el mayor rendimiento para mercado nacional, mientras que la radiación encontrada en las mallas rojas y perladas ocasionó los menores rendimientos de esta calidad de tomate. La radiación solar filtrada por las mallas perladas, con 30 y 50% de sombreado, originó también las mayores cantidades de tomate no comercial o de rezaga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud al Lic. Diego Ley López (Del Campo y Asociados, S.A. de C.V.) por permitir la realización de esta investigación en sus invernaderos, a los Ings. Raz Ganelevin (Polysack Plastic Industries Ltd.) y Vicente Álvarez Mares (Polysack México S.A. de C.V.) por proporcionar las mallas sombra de colores y, a las estudiantes de Horticultura Laura Elena Soto Parra, Esperanza Vargas Vargas y María Petra Ruiz Corrales por su valiosa colaboración.

LITERATURA CITADA

- Anglés, M. 2001. Control climático y ciclo de cultivo. *Horticultura* 19: 28-34.
- Carter, G. A. and B. A. Spiering. 2002. Optical properties of intact leaves for estimating chlorophyll concentration. *J. Environ. Qual.* 31: 1424-1432.
- Chun, L., A. Kawakami, and D. A. Christopher. 2001. Phytochrome a mediates blue light and UV-A-dependent chloroplast gene transcription in green leaves. *Plant Physiol.* 125: 1957-1966.
- Decoteau, D. R., H. A. Hatt, J. W. Kelly, M. J. McMahon, N. Rajapakse, R. E. Joung, and R. K. Pollock. 1993. Applications of photomorphogenesis research to horticultural systems. *Hortscience* 28: 974-1063.
- Degli, E. M. D., S. D. Lopes, P. P. R. Gomes, V. V. H. Alvarez, S. L. C. Chamhum, and F. J. A. Machado. 2003. Assessment of nitrogenized nutrition of citrus rootstocks using chlorophyll concentrations in the leaf. *J. Plant Nutr.* 26: 1287-1299.
- El-Aidy, F. 1991. The effect of planting date, density, variety and shade on production of cucumber under tunnels. *Acta Hortic.* 287: 281-288.
- Fallik, E., S. Alkalai-Tuvia, Y. Parselan, Z. Aharon, A. Elmann, Y. Offir, E. Matan, H. Yehezkel, K. Ratner, N. Zur, and Y. Shahak. 2009. Can colored shade nets maintain sweet pepper quality during storage and marketing? *Acta Hortic.* 830: 37-44.
- Ganelevin, R. 2008. World-wide commercial applications of colored shade nets technology (Chromatinet®). *Acta Hortic.* 770: 199-203.
- Murchie, E. H. and P. Horton. 1998. Contrasting patterns of photosynthetic acclimation to the light environment are dependent on the differential expression of the responses to altered irradiance and spectral quality. *Plant Cell Environ.* 21: 139-148.
- Oguchi, R., K. Hikosaka, and T. Hirose. 2003. Does the change in light acclimation need leaf anatomy? *Plant Cell Environ.* 26: 505-512.
- Oren-Shamir, M., E. E. Gussakovsky, E. Spiegel, A. Nissim-Levi, K. Ratner, R. Ovadia, Y. E. Giller, and Y. Shahak. 2001. Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of *Pittosporum variegatum*. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 76: 353-361.
- Páez, A., V. Paz y J. C. López. 2000. Crecimiento y respuestas fisiológicas de plantas de tomate cv. Río Grande en la época mayo-junio. Efecto del sombreado. *Rev. Fac. Agronomía (LUZ)* 17: 173-184.
- Rajapakse, N. C. and J. W. Kelly. 1992. Regulation of chrysanthemum growth by spectral filters. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 117: 481-485.
- Retamates, J. B., J. M. Montecino, G. A. Lobos, and L. A. Rojas. 2008. Colored shading nets increase yields and profitability of highbush blueberries. *Acta Hortic.* 770: 193-197.
- Rodríguez M., N., G. Alcántar G., A. Aguilar S., J. D. Etchevers B. y J. A. Santizó R. 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra* 16: 135-141.
- Shahak, Y., E. E. Gussakovsky, E. Gal, and R. Ganelevin. 2004. Colornets: crop protection and light-quality manipulation in one technology. *Acta Hortic.* 659:143-151.
- Shahak, Y., E. Gal, Y. Offir, and D. Ben-Yakir. 2008. Photosensitive shade netting integrated with greenhouse technologies for improved performance of vegetable and ornamental crops. *Acta Hortic.* 797: 75-80.
- Statsoft. 1998. STATISTICA for Windows. Kernel release 5.1. Statsoft. Tulsa, OK, USA.
- Valera, D., F. Molina y J. Gil. 2001. Las mallas como técnica de control climático en invernaderos. *Vida Rural* 8: 50-52.
- Zeinalov, Y. and L. Maslenkova. 2000. On the action spectra of photosynthesis and spectral dependence of the quantum efficiency. *Bulgarian J. Plant Physiol.* 26: 58-69.