

PRODUCCIÓN DE TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.) BASADO EN LÁMINAS DE RIEGO Y ACOLCHADO PLÁSTICO

R. López-López¹; R. Arteaga-Ramírez²;
M. A. Vázquez-Peña³; I. L. López-Cruz²;
I. Sánchez-Cohen¹

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias,
Km. 1 Carretera Huimanguillo-Cárdenas. Huimanguillo, Tabasco, MÉXICO.
Correo-e: lopez.rutilo@inifap.gob.mx (⁴Autor responsable).

²Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.
Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. MEXICO
Correo-e: arteagar@correo.chapingo.mx

³Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo.
Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. MEXICO.
Correo-e: mavazquez.coahuila@gmail.mx

RESUMEN

Entre los principales problemas que limitan el incremento de la producción y la productividad del cultivo de tomate de cáscara, están la disponibilidad y el alto costo del agua de riego, además del uso y manejo ineficiente de este recurso. Los sistemas actuales de producción de tomate de cáscara, tienen baja eficiencia productiva, entre otras causas, porque aplican altos volúmenes de agua por hectárea. En este contexto, se evaluó el efecto de diferentes láminas de riego y acolchado plástico en la producción del cultivo de tomate de cáscara en un sistema de fertirriego y optimizar el agua de riego para mejorar la productividad del cultivo. El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones con arreglo de tratamientos factorial 5 x 2, cinco niveles de lámina de riego: 40, 60, 80, 100 y 120 %, de la evapotranspiración de referencia (ET_0) calculada con el método de Penman-Monteith y dos niveles sin y con acolchado plástico. Los resultados indican que existen diferencias significativas entre los tratamientos con acolchado plástico y láminas de riego tanto para el rendimiento de frutos como en la productividad del agua. El acolchado plástico incrementó en promedio 56 % el rendimiento de frutos y 57 % la eficiencia del agua de riego al reducir un 60 % la lámina de riego calculada por el método de Penman-Monteith.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: productividad del cultivo, función de producción, programación de riego, uso eficiente del agua, ecuación de Penman-Monteith

HUSK TOMATO (*Physalis ixocarpa* Brot.) PRODUCTION BASED ON IRRIGATION VOLUME AND PLASTIC MULCHING

ABSTRACT

Among the main problems that limit production and productivity of husk tomato are the availability and high cost of irrigation water, as well as inefficient use of this resource. Current production systems are not efficient due to, among other reasons, the large volumes of water supplied. The objectives of this study were to assess the effect of different irrigation water treatments and plastic mulching on husk tomato crop production in a fertigation system and also to optimize the irrigation water in order to improve crop productivity. The experiment consisted of a complete randomized design with three replicates, with a 5 x 2 factorial treatment design consisting of five levels of irrigation: 40, 60, 80, 100 and 120 % of reference evapotranspiration calculated using the Penman-Monteith equation, and two levels of plastic mulching, with and without. The results indicate that there were significant differences between mulching and irrigation levels for fruit yield and water productivity. Using plastic mulching increased fruit yield by 56.6 %, and irrigation water efficiency by 57.3 %; water use was reduced 60 % by calculating the required water volume with the Penman-Monteith equation.

ADDITIONAL KEY WORDS: crop productivity, production function, irrigation scheduling, irrigation water efficiency, Penman-Monteith equation

INTRODUCCIÓN

El tomate de cáscara se produce en casi todo México, parte de Estados Unidos y Centro América. Durante el periodo 1990 a 2000, la producción de tomate verde de cáscara representó el 4.25 % de la superficie total de hortalizas en el país, donde se tiene un crecimiento promedio anual de 4.4 %. Alrededor del 81 % del tomate se produce en condiciones de riego, el resto es de temporal. El estado con mayor superficie cosechada y volumen de producción es Sinaloa, seguido por Michoacán, Jalisco, Estado de México, Sonora y Puebla (Valtierra y Ramos, 2003).

El rendimiento promedio nacional es de $12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, el cual se considera bajo con relación al potencial productivo del cultivo, que se estima en $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Peña, 2001). No obstante, mediante el uso eficiente del agua se ha desarrollado un paquete tecnológico para la producción con fertirriego, donde el tomate de cáscara puede rendir hasta $80 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (Castro *et al.*, 2000).

Entre los principales problemas que limitan el incremento de la producción y la productividad del cultivo de tomate de cáscara, están la poca disponibilidad y el alto costo del agua de riego, y el manejo ineficiente de este recurso, sobre todo cuando es riego rodado, el cual genera altos costos de producción debido a la cantidad de energía eléctrica y mecánica requerida para su aplicación, por otro lado, utiliza láminas de riego mayores que 500 mm, lo que trae consigo un desgaste constante del recurso.

El manejo del riego, y su monitoreo, constituye una de las técnicas más efectivas para obtener rendimientos óptimos, en cuanto a la cantidad y calidad de producto requeridas por el mercado (McCarthy, 1998; Van Leeuwen *et al.*, 2003). Los métodos utilizados en la programación del riego pueden basarse en el conocimiento de las condiciones atmosféricas (estimación de la evapotranspiración), en el control de la humedad del suelo y en el seguimiento del estado hídrico de la planta. En general, estos son de dos tipos: i) Aquellos que consideran como punto de partida para la dosificación del riego, el balance hídrico del suelo calculado a partir de la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y la aplicación de coeficientes de cultivo, al utilizar los estimadores de contenido de humedad del suelo y de estrés hídrico de la planta como ayuda para la toma de decisiones (Myburgh, 1996); y ii) las estrategias basadas en el seguimiento del contenido de agua del suelo, manteniendo la tensión matricial del suelo por encima de un determinado valor que varía según el estado fenológico del cultivo y los objetivos de producción y calidad deseados (McCarthy, 1998).

El conocimiento de la lámina de riego óptima es indispensable para que los sistemas de producción de tomate de cáscara sean rentables; los sistemas actuales tienen baja eficiencia, entre otras causas, porque aplican altos volúmenes de agua por hectárea. Las eficiencias de riego

en las parcelas son del orden del 40 %, debido a un deficiente diseño de los sistemas y a que la programación del riego se da sin ningún criterio de demanda de agua por el cultivo.

El propósito del manejo del agua de riego es obtener rendimientos máximos, particularmente cuando ésta es escasa (Mojarro, 2004). El concepto de función de producción se basa en la teoría de que el rendimiento de los cultivos es afectado por las variaciones del régimen de humedad en el suelo durante su desarrollo. Los cambios en el régimen de humedad del suelo durante el desarrollo de los cultivos, producen también cambios en el rendimiento, sobre todo si éste se mide como fruto y no como la materia verde de la planta (Flinn y Musgrave, 1967).

Los objetivos del presente trabajo fueron: i) evaluar el efecto de diferentes láminas de riego y acolchado plástico en la producción del cultivo de tomate de cáscara en un sistema de fertirriego e ii) identificar el tratamiento que optimice el uso del agua e incremente la productividad del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Campo Experimental de la estación meteorológica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, durante el periodo febrero a junio de 2007. El clima de la localidad es del tipo Cb(Wo)(W)(i)^g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica (5 y 7°C). La temperatura media anual es de 15.5°C ; mayo el mes más caliente y enero el más frío. La precipitación media anual es de 664 mm.

De acuerdo con el análisis de las propiedades físicas del suelo, la textura es franca arcillosa, la densidad aparente es de 1.25 y $1.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a la profundidad de 10 y 30 cm, respectivamente. La densidad real es de 2.35 a los 10 cm y $2.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a los 30 cm de profundidad, el porcentaje de humedad a capacidad de campo (CC) es 29.6 % y punto de marchitez permanente (PMP) de 16.5 %. El espacio poroso o contenido volumétrico de humedad a saturación varía de 0.47 a los 10 cm de profundidad y 0.43 a los 30 cm. Las propiedades químicas son: pH neutro, moderadamente pobre en materia orgánica, medio en nitrógeno inorgánico, medio en fósforo asimilable, alto en potasio aprovechable, moderadamente alto en calcio aprovechable, muy alto en magnesio aprovechable, medio en hierro asimilable, moderadamente bajo en cobre asimilable, medio en zinc asimilable, moderadamente alto en manganeso asimilable y muy alto en boro asimilable.

La parcela experimental fue de 1.2 hectáreas, equipada con sistema de riego por goteo con cintas que tienen las siguientes características nominales: diámetro interno de 16 mm, calibre 0.254 mm, flujo de $1 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$, espacio entre emisores de 0.3 m, y presión máxima de 1.2 bar. La determinación de la lámina de riego se realizó estimando la

evapotranspiración de referencia (ET_0) en tiempo real mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) con los valores promedios de variables climáticas de 6:00 a 19:00 horas cuya ecuación base está dada por la relación:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Donde: R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); G es la densidad de flujo de calor del suelo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); T es la temperatura media del aire diario ($^{\circ}\text{C}$); u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); e_s es la presión de vapor a saturación (kPa); e_a es la presión de vapor actual (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

El diseño experimental fue un factorial 5 x 2 (10 tratamientos), cinco niveles de lámina de riego, de acuerdo con el cálculo realizado con el método de Penman-Monteith (reposición del 40, 60, 80, 100 y 120 % de la ET_0), los cuales fueron codificados para el análisis estadístico como: 0, 1, 2, 3 y 4, respectivamente y dos niveles sin y con acolchado plástico, codificados como 0 y 1. Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño completamente al azar con tres repeticiones, donde el área experimental que cubre una válvula correspondió a una lámina de riego. La unidad experimental consta de 10 hileras de 35 m de longitud separadas a 1.5 y de 0.45 m entre plantas, en donde se asignó un tratamiento. La parcela útil fueron las tres hileras centrales de 5 m de longitud, en donde se midieron tanto las variables de respuesta agronómicas (rendimiento de frutos) como variables del estado hídrico del suelo (potencial mátrico).

Se instaló acolchado plástico de color plateado y negro a la mitad de la unidad experimental, correspondiente a una lámina de riego. Las características del plástico son: ancho de 1.2 m, para una cama de 60 cm, calibre de 2.28 mm, perforación parcial con diámetro de 6.35 y 45 cm entre espaciamiento. La instalación se hizo con una acolchadora mecánica que contiene dispositivos para la construcción de la cama, fertilización de fondo, colocación de cintas y fijación del plástico. Esta actividad se realizó una semana antes del trasplante correspondiente al día juliano (dj) 84 (25 de marzo de 2007).

La siembra de semillas de tomate de cáscara se realizó en charolas de poliestireno de 200 cavidades el 24 de febrero de 2007 (dj 55); el sustrato utilizado fue peat moss más vermiculita (1:1) en paquetes de 107 litros. Se produjeron un total de 130 charolas tomando en cuenta la densidad de siembra ($14,874 \text{ plantas}\cdot\text{ha}^{-1}$) así como las plántulas que fueron utilizadas para el replante. Inicialmente, las plántulas

se regaron con una solución nutritiva tipo *Steiner* diluida al 50 % para evitar daños por quemadura. El trasplante se hizo a los 30 días después de la siembra, es decir, 25 días después de la fecha de emergencia (dj 89). Las características de las plántulas al momento de establecer el experimento fueron las siguientes: 10 cm de altura, 2.7 mm de diámetro del tallo y seis hojas verdaderas totalmente expandidas. El material vegetal que se utilizó fue una familia de medios hermanos maternos (F3) obtenida a partir de la variedad "CHF1-Chapingo" de la Universidad Autónoma Chapingo.

La fertilización de fondo consistió en 200 kg de urea equivalente a 92 kg de nitrógeno y 200 kg de superfosfato de calcio triple equivalente a 92 kg de fósforo y 40 kg de calcio al momento de la construcción de las camas y colocación del acolchado plástico. La fórmula de fertilización aplicada en el fertirriego fue de 200-110-50, distribuida en función del crecimiento del cultivo. Las fuentes de fertilizantes solubles fueron: sulfato de amonio (21-00-00-24), fosfato monoamónico (12-60-00), nitrato de potasio (13-02-44) y ácido nítrico al 55 %. La frecuencia de aplicación se hizo cada semana, con dos tanques de 450 litros: en el primer tanque se añadió una cantidad de nitrato de potasio más el sulfato de amonio y en el segundo se mezcló el fosfato monoamónico más la otra mitad del sulfato de amonio. En cada tanque se agregaron 450 ml de ácido nítrico (12.6 % de N) y para evitar taponamiento de emisores.

Para que los tratamientos partieran de condiciones de humedad similares y el cultivo estabilizara su crecimiento en las diferentes unidades experimentales, se regó inicialmente con láminas iguales durante una semana. Los tratamientos de riego se aplicaron a partir del día 102 correspondiente al 12 de abril. El total de lámina de riego aplicada durante esa semana fue de 39.2 mm con un promedio de 5 mm diarios.

El rendimiento de fruto de tomate de cáscara fue medido a través de la suma de los cuatro cortes realizados en la parcela útil de cada tratamiento durante las fechas siguientes: 29 de mayo, 13, 20 y 28 de junio de 2007, correspondiente a los días 149, 164, 171 y 179, respectivamente. La productividad del agua se determinó en función de la cantidad de fruto producido por unidad de área ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), por unidad de agua aplicada ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$), de acuerdo con los conceptos de eficiencia de uso de agua (UER) vertidos por Al-Jamal *et al.* (2001).

Se efectuó análisis de varianza de los datos con base en el diseño factorial utilizado y una prueba de medias (Tukey $P \leq 0.05$), en la comparación entre tratamientos. Para la optimización del agua de riego se efectuó un análisis de regresión múltiple, seleccionando las variables que obtuvieron efecto significativo ($P < 0.05$) y finalmente los modelos con mayores coeficientes de determinación (r^2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la lámina de riego aplicada y acolchado plástico en el rendimiento de frutos de tomate de cáscara

La cantidad total del agua de lluvia durante el ciclo experimental fue de 277 mm, distribuyéndose 84.1, 88.2 y 104.6 mm durante las etapas vegetativa, reproductiva y madurez respectivamente. Las láminas de riego fueron: 154, 208, 263, 317 y 371 mm correspondiente al 40, 60, 80, 100 y 120 % de la evapotranspiración de referencia calculada con el método de Penman-Monteith, respectivamente.

El análisis de varianza en el rendimiento de frutos demostró que existen diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P < 0.01$). La prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) indicó que los mejores tratamientos son los que tienen acolchado plástico y láminas de riego de 100, 120, 60 y 80 % de la ET_0 . En los tratamientos sin acolchado se obtuvieron los valores más bajos de rendimiento de fruto con el mismo orden decreciente de las láminas de riego obtenidas para los tratamientos con acolchado (Cuadro 1).

En la Figura 1 se comparan los tratamientos y se observan las diferencias debidas al acolchado plástico. El rendimiento de frutos de tomate de cáscara con cobertura plástica y láminas de riego al 40 % de la ET_0 fue en promedio de 42.7 t·ha⁻¹ y con el tratamiento del 100 % de la ET_0 fue de 66.8 t·ha⁻¹. Estos valores superan el rendimiento promedio nacional que es de 12 t·ha⁻¹, y el potencial productivo de variedades mejoradas que es de 40 t·ha⁻¹ (Peña y Santiaguillo, 1999). Este resultado, concuerda con Castro *et al.* (2000) y

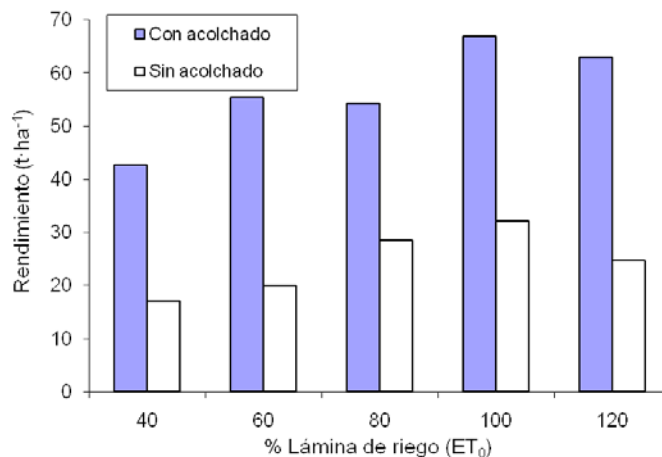


FIGURA 1. Efecto del acolchado plástico y la lámina de riego en el rendimiento de fruto de tomate de cáscara con base en la evapotranspiración de referencia (ET_0) de Penman-Monteith.

Peña (2001), al señalar que con sistema de acolchado plástico y riego por goteo, el rendimiento de frutos de tomate de cáscara puede alcanzar de 60 a 80 t·ha⁻¹.

El análisis de varianza por factores mostró que existen diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) para el efecto del acolchado plástico y de la lámina de riego en el rendimiento de fruto, así como en la interacción. De acuerdo con el análisis de comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$) y un CME de 21.5, el efecto con cobertura plástica, presentó en promedio 56.38 t·ha⁻¹ y sin plástico 24.42 t·ha⁻¹, lo que representa un incremento del 56.6 % en el rendimiento de fruto con el uso de acolchado plástico.

Estas diferencias en rendimiento se deben a que la cobertura plástica produce una reducción significativa de la evaporación del agua en la superficie del suelo, especialmente bajo sistemas de riego por goteo. Asociada con la reducción de la evaporación existe un incremento general de la transpiración del cultivo, debido a la transferencia de calor sensible y radiativo desde la superficie de la cobertura de plástico hacia las adyacencias de la vegetación. Allen *et al.* (1998), mencionan que aunque la tasa de transpiración de cultivos bajo plástico se incrementa en un promedio de 10 a 30 % a lo largo de la temporada, comparado con la ausencia de la cobertura plástica, el valor de K_c disminuye en un promedio de 10 a 30 % debido a la reducción de la evaporación en el suelo, estimada en un 50 a 80 %.

Con respecto al efecto de lámina de riego con y sin acolchado plástico en el rendimiento promedio de frutos, se puede notar que con el 100 % de la ET_0 se obtuvo el mayor rendimiento con 49.42 t·ha⁻¹, es estadísticamente igual que el tratamiento de 120 %; el menor rendimiento corresponde al tratamiento de 40 % de la ET_0 con 29.9 t·ha⁻¹ (Cuadro 2).

El rendimiento de fruto de tomate de cáscara aumentó

CUADRO 1. Rendimiento de frutos obtenidos en el experimento de producción de tomate de cáscara basado en láminas de riego y acolchado plástico. Los valores son los promedios acumulados de cuatro cortes.

Lámina de riego (ET_0 en %)	Acolchado	Rendimiento promedio (t·ha ⁻¹)
100	CA	66.803 a ²
120	CA	62.850 a
60	CA	55.327 a
80	CA	54.227 ab
40	CA	42.733 bc
100	SA	32.037 cd
80	SA	28.460 de
120	SA	24.680 de
60	SA	19.850 de
40	SA	17.067 e
MEDIA		40.403
DMSH		12.57
Cuadrado Medio del Error		18.924
CV (%)		10.766

²Valores con la misma letra dentro de columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; CA: Con Acolchado; SA: Sin Acolchado.

CUADRO 2. Respuesta del rendimiento de frutos a la aplicación de láminas de riego de acuerdo con la evapotranspiración de referencia (ET_0) de Penman-Monteith, en el experimento de producción de tomate de cáscara. Los valores son promedios acumulados de cuatro cortes.

Lámina de riego (ET_0 en %)	Rendimiento promedio ($t \cdot ha^{-1}$)
100	49.420 a ^z
120	43.765 ab
80	41.343 b
60	37.588 bc
40	29.900 c
Media	40.40
DSH	7.918
Cuadrado Medio del Error	21.525
Coefficiente de Variación (%)	11.480

^aValores con la misma letra dentro de columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey con $P \leq 0.05$. DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta.

mientras se incrementó la lámina de riego, el efecto es cuadrático como se observa en la Figura 2, después de una lámina de riego mayor que el 100 % de la ET_0 , el rendimiento de fruto tiende a estabilizarse o a decrecer, principalmente en el cultivo sin acolchado plástico, lo que indica que la ET_0 diariamente puede ajustarse en cantidades menores mediante el coeficiente de cultivo para optimizar las necesidades hídricas, debido al incremento de la evapotranspiración.

Las funciones cuadráticas tienen una r^2 de 0.7 y 0.62 con y sin acolchado plástico respectivamente. Estos valores indican que ambas variables tienen una relación estrecha, aunado a coeficientes de variación relativamente bajos (10.1 y 17.6 %). Erdem *et al.* (2005) encontraron resultados similares para el cultivo de sandía ya que obtuvieron funciones cuadráticas al relacionar la lámina de riego y el uso eficiente del agua de riego con el rendimiento de frutos. También Irmak *et al.* (2000) obtuvieron una función lineal positiva entre láminas de riego y el rendimiento de grano de maíz de 0.1 a 0.6 $kg \cdot m^{-2}$, en un rango de 60 a 450 mm.

Efecto de la lámina de riego y el acolchado plástico en la productividad del agua en el cultivo de tomate de cáscara

La productividad del agua o eficiencia del agua de riego en los cultivos depende principalmente de la transpiración. Dado que es difícil separar la transpiración de la evaporación de la superficie del suelo entre las plantas (que no contribuye directamente a la producción del cultivo), la definición de la productividad del agua en términos de evapotranspiración en lugar de la transpiración tiene sentido a nivel de campo y de sistema.

Los análisis de varianza para la productividad del agua, muestran que existen diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P < 0.01$). La prueba de comparación de

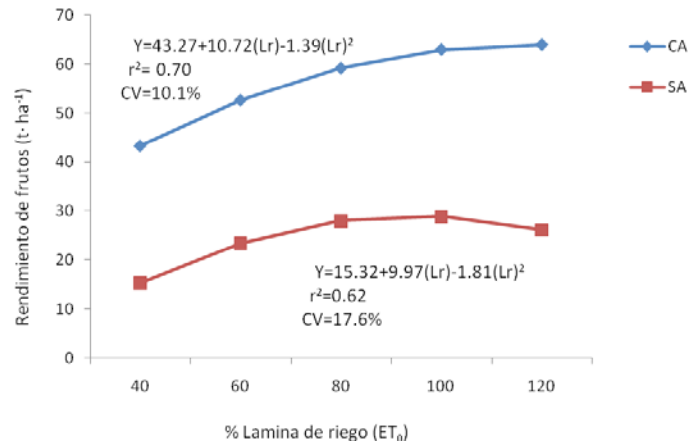


FIGURA 2. Relaciones entre el rendimiento de frutos (Y) en el cultivo de tomate de cáscara con (CA) y sin (SA) acolchado plástico y la lámina de riego (Lr) calculada con el método de Penman-Monteith.

medias por Tukey ($P \leq 0.05$) indica que los mejores tratamientos respecto de la productividad del agua son: el 40, 60 y 100 % de la ET_0 con acolchado plástico obteniendo una productividad total de 27.74, 26.55 y 21.08 $kg \cdot m^{-3}$, respectivamente (Cuadro 3). Las productividades más bajas corresponden generalmente a los tratamientos sin acolchado plástico, siendo el 100, 60 y 120 % los de menor productividad con 10.1, 9.53 y 6.65 $kg \cdot m^{-3}$, respectivamente.

En la Figura 3 se comparan los valores de productividad del agua obtenidos debido al efecto del acolchado plástico y las láminas de riego. Se aprecia que la mejor productividad

CUADRO 3. Productividad del agua con base en el rendimiento de fruto en el experimento de producción de tomate de cáscara basado en láminas de riego y acolchado plástico. Los valores son los promedios acumulados de cuatro cortes.

Lámina de riego (ET_0 en %)	Acolchado	Productividad del agua ($kg \cdot m^{-3}$)
40	CA	27.74 a ^z
60	CA	26.55 ab
100	CA	21.08 abc
80	CA	20.65 bc
120	CA	16.93 cd
40	SA	11.07 de
80	SA	10.84 de
100	SA	10.11 e
60	SA	9.53 e
120	SA	6.65 e
Media		16.11
DMSH		6.76
Cuadrado Medio del Error		5.46
CV (%)		14.50

^aValores con la misma letra dentro de columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$. DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta; CA: Con Acolchado; SA: Sin Acolchado.

del agua se obtienen si se usa el acolchado y láminas de riego al 40 y 60 % de la ET_0 .

El análisis de varianza por factores, incluyendo la interacción, indicó que existen diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) para el factor acolchado y la interacción lámina aplicada con acolchado, no así para láminas de riego. La prueba de medias por Tukey ($P \leq 0.05$) indica que las mejores productividades del agua se obtuvieron con láminas de 40 y 60 % con 19.41 y 18.04 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente, siendo las láminas de 120 % con 11.79 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y 100 % con 15.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ las de menor eficiencia (Cuadro 4). Respecto del factor acolchado plástico, el análisis de comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$), para la cobertura plástica, se obtuvo un promedio de 22.6 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ mientras que sin plástico fue de 9.64 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, lo que representa un incremento del 57.3 % en la productividad del agua por el uso de acolchado plástico.

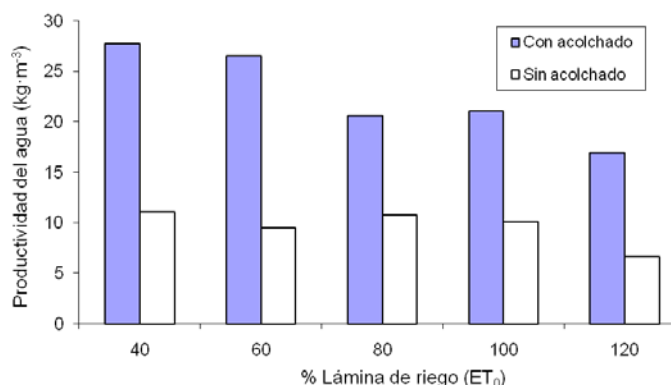


FIGURA 3. Efecto del acolchado plástico y la lámina de riego a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0) de Penman-Monteith en la productividad del agua ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) en el cultivo de tomate de cáscara.

CUADRO 4. Respuesta de la productividad del agua a la aplicación de láminas de riego de acuerdo con la evapotranspiración de referencia (ET_0) de Penman-Monteith, en el experimento de producción de tomate de cáscara. Los valores son promedios acumulados de cuatro cortes.

Lámina de riego (ET_0 en %)	Productividad del agua ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
40	19.41 a ²
60	18.04 a
80	15.74 ab
100	15.60 ab
120	11.79 b
Media	16.11
DMSH	5.78
Cuadrado Medio del Error	4.10
CV (%)	14.92

²Valores con la misma letra dentro de columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

DMSH: Diferencia Mínima Significativa Honesta.

Producción de tomate...

Función de producción para la optimización del agua de riego

Los rendimientos de frutos del cultivo del tomate de cáscara, fueron analizados de acuerdo con la metodología propuesta por Palacios y García (1989), con la cual, es posible determinar los parámetros que maximizan la productividad del agua de riego. Los rendimientos fueron relacionados con la lámina de riego aplicadas diariamente y el efecto de cobertura plástica.

La ecuación que representa la función de producción del sistema para el cultivo de tomate de cáscara, con r^2 de 0.935, cuadrado medio del error de 24.48, coeficiente de variación de 12.24 % y 30 observaciones es:

$$Y = 15.74 + 27.11(a) + 9.13(b) - 1.60(b^2) + 2.43(ab) \quad (2)$$

donde: Y es el rendimiento en $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$; a es el efecto del acolchado plástico; b representa la lámina de riego de Penman-Monteith; y ab es el efecto de interacción del plástico con la lámina de riego.

En la ecuación 2, se determinaron las primeras derivadas parciales, con respecto de cada una de las variables independientes, posteriormente se igualaron a cero, para encontrar los valores de lámina de riego (b) óptimos con y sin acolchado como criterio para el riego del cultivo del tomate de cáscara con sistema de goteo. Para obtener los valores óptimos de lámina de riego se realizó el siguiente procedimiento:

$$\frac{\partial Y}{\partial b} = 9.13 - 3.2 - 2(b) + 2.43(a) \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial b^2} = -3.2 \quad (4)$$

En este caso, la segunda derivada es negativa, por lo tanto, existe condición suficiente para esperar un valor máximo de la lámina de riego. Para encontrar los valores óptimos se iguala la ecuación 3 a cero y de esta manera se obtienen los valores de b sin (b_0) y con (b_1) acolchado plástico:

$b_0 = 2.85 = 95.16$ % de la lámina de riego y $b_1 = 3.61 = 108.3$ % de la lámina de riego.

Sustituyendo los valores en la ecuación 2, se tiene que el rendimiento máximo de frutos estimado sin acolchado plástico es de $Y_0^* = 28.76 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, y con acolchado plástico es de $Y_1^* = 63.73 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Respecto de la productividad del agua, como la relación del producto medio y el producto marginal, se logra dividiendo la ecuación 2 entre el efecto de la lámina de riego aplicada e igualando a la primera derivada parcial de cada una de las

variables de la misma ecuación, como sigue:

$$Y = \frac{15.74}{b} + 9.13 - 1.6(b) + 2.43(a) = 9.13 - 3.2(b) + 2.43(a) \quad (5)$$

$$\frac{15.74}{b} + 1.6b = 0 \quad (6)$$

Resolviendo para b^{**} se tiene que el valor que maximizó la productividad del agua es: $b^{**} = 3.13 = 104 \%$ de la ET_0 que se consume durante el ciclo del cultivo. Sustituyendo este valor en la ecuación 2, se tiene un rendimiento de $Y_0^{**} = 28.64 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de frutos sin acolchado plástico y con acolchado se tiene un rendimiento de $63.36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

CONCLUSIONES

Los niveles de láminas de riego a partir de la ET_0 , estimada con el método de Penman-Monteith y el uso de acolchado plástico afectaron significativamente el rendimiento de frutos de tomate de cáscara. El uso del acolchado plástico incrementó en promedio 56 % el rendimiento de frutos de tomate de cáscara e incrementó la productividad del agua en 57 %.

Las láminas de riego se pueden reducir hasta el 60 % usando acolchado plástico en la programación del riego por goteo en la producción del cultivo de tomate de cáscara.

De acuerdo con la función de optimización del agua, el uso del acolchado plástico incrementó la productividad del cultivo en 54.8 % mediante la obtención de una lámina óptima de riego de 104 % de la ET_0 durante el ciclo del cultivo.

LITERATURACITADA

- AL-JAMAL, M.; BEL, S. S.; SAMMIS, T. W. 2001. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production. *Agric. Water Manage.* 46: 253-266.
- ALLEN, G., R.; PEREIRA, S. L.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. *Crop Evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper Núm. 56. FAO, Rome, Italy. 300 p.
- CASTRO-BRINDIS, R.; SÁNCHEZ-GARCÍA, P.; PEÑA-LOMELÍ, A.; ALCANTAR-GONZÁLEZ, G.; BACA-CASTILLO, G.; LÓPEZ-ROMERO, R. M. 2000. Niveles críticos, de suficiencia y toxicidad de N-NO₃ en el extracto celular de pecíolos de tomate de cáscara. *Revista Terra* 18(2): 141-146.
- ERDEM, Y.; ERDEM, A. T.; ORTA, H.; OKURSOY, H. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (CWSI). *Journal of Central European Agriculture*. 6 (4): 449-460.
- FLINN, J. C.; MUSGRAVE, W. F. 1967. Development and Analysis of input-output Relation for Irrigation Water. *The Australian Journal of Agricultural Economics* 11(1): 1-20.
- IRMAK, S.; HAMMAN, D. Z.; BASTUG, R. 2000. Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Timing and Yield Estimation of Corn. *Agronomy Journal* 92: 1221-1227.
- MCCARTHY, M. G. 1998. Irrigation management to improve winegrape quality – nearly 10 years on. *The Australian grapegrower and Winemaker, Annual Technical Issue*: p. 65-71.
- MOJARRO D., F. 2004. Optimización del uso del agua de riego para incrementar la productividad de chile seco en Zacatecas. *Memorias de la Primera Convención Mundial del Chile*. León Guanajuato, México. p. 203-210.
- MYBURGH, P. A. 1996. Response of *Vitis vinifera* L. cv. Barlinka/Ramsey to soil water depletion levels with particular reference to trunk growth parameters. *South African Journal for Enology and Viticulture* 17(1): 3-14.
- PALACIOS V., E.; GARCÍA A., E. 1989. Introducción a la Teoría de la Operación de Distritos y Sistemas de Riego. Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias. Montecillo, Estado de México. México. 482 p.
- PEÑA L., A.; SANTIAGUILLO H., J. F. 1999. Variabilidad genética de tomate de cáscara en México. *Boletín Técnico Núm. 2*. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 26 p.
- PEÑA L., A. 2001. Situación Actual y Perspectivas de la Producción y Mejoramiento Genético de Tomate de Cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en México. Primer Simposio Nacional. Técnicas modernas de producción de tomate, papa y otras solanáceas. Universidad Agraria Antonio Narro. Saltillo Coahuila. 10 p.
- VALTIERRA P., E.; RAMOS S., A. 2003. Programa estratégico de necesidades de investigación y transferencia de tecnología de la cadena productiva de tomate verde en el estado de Puebla. *Fundación Produce Puebla, Gobierno del estado de Puebla*. 237 p.
- VAN LEEUWEN, C.; TRÉGOAT, O.; CHONÉ, X.; JAECK, M. E.; RABUSSEAU, S.; AUDILLERE, J. P. 2003. Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bulletin de l'O.I. V.* p. 369-379.