

Evapotranspiración, coeficientes de cultivo, factor de abatimiento hídrico y eficiencia en el uso del agua de chile pimienta en malla-sombra

Evapotranspiration, crop coefficients, water depletion factor, and water use efficiency of bell pepper under shade net

Jesús Enrique López-Avendaño¹, José Ángel Martínez-Gallardo¹, Norma Delia Zazueta-Torres²,
Julio César Rodríguez³, Mitzi Dayanira Estrada-Acosta¹, Luis Alfonso Amarillas-Bueno¹, Fidencio Cruz-Bautista³,
Martín Abraham Tirado-Ramírez^{1*}

¹ Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. CP. 80395, Culiacán, Sinaloa, México; Tel. (667) 8461084.

ORCID: 0000-0003-2454-0805; ORCID: 0000-0002-3161-9223; ORCID: 0000-0002-8648-6915; ORCID: 0000-0002-3835-3886;
martin.tirado@uas.edu.mx, ORCID: 0000-0002-4842-4246

² ITS Eldorado/ Tecnológico Nacional de México. CP. 80450, Eldorado, Sinaloa, México. ORCID: 0000-0001-5185-8283

³ Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México. ORCID: 0000-0001-9143-9198;
ORCID: 0000-0002-0926-8199

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Agricultura
protegida; FAO56;
optimización del
riego.

La optimización del uso del agua en el riego agrícola es esencial para la sostenibilidad hídrica. Esta investigación tuvo como objetivo determinar la evapotranspiración, los coeficientes de cultivo (K_c), el factor de abatimiento hídrico (f) y la eficiencia en el uso del agua (EUA) del chile pimienta bajo malla-sombra. Se evaluaron cinco tratamientos con tres repeticiones para diferentes valores de f (0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5). La evapotranspiración de referencia (ET_0) se estimó mediante la metodología FAO Penman-Monteith y la evapotranspiración del cultivo (ET_c) con lisímetros volumétricos. Se registraron altura de planta, rendimiento, ET_c y EUA. El mejor tratamiento ($f = 0.1$) presentó una altura de 100.1 cm, rendimiento de 76.7 ton ha⁻¹, ET_c de 459 mm y EUA de 16.7 kg m⁻³. Los valores de K_c fueron 0.64, 1.02 y 1.09 para las etapas fenológicas inicial, media y final, respectivamente.

Abstract

Keywords:

Protected agriculture;
FAO56; irrigation
optimization.

Optimizing water use in agricultural irrigation is essential for water sustainability. This study aimed to determine evapotranspiration, crop coefficients (K_c), water depletion factor (f), and water use efficiency (WUE) for bell pepper grown under shade net conditions. Five treatments with three replications were evaluated for different f values (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5). Reference evapotranspiration (ET_0) was estimated using the FAO Penman-Monteith method, and crop evapotranspiration (ET_c) was measured with volumetric lysimeters. Plant height, yield, ET_c , and WUE were recorded. The best treatment ($f = 0.1$) achieved a plant height of 100.1 cm, yield of 76.7 ton ha⁻¹, ET_c of 459 mm, and WUE of 16.7 kg m⁻³. The K_c values were 0.64, 1.02, and 1.09 for the initial, mid, and late growth stages, respectively.

Recibido: 27 de octubre de 2025

Aceptado: 01 de mayo de 2026

Publicado: 23 de septiembre de 2026

Cómo citar: López-Avendaño, J. E.; Martínez-Gallardo, J. Á.; Zazueta-Torres, N. D.; Rodríguez, J. C.; Estrada-Acosta, M. D.; Amarillas-Bueno, L. A.; Cruz-Bautista, F.; & Tirado-Ramírez, M. A. (2026). Evapotranspiración, coeficientes de cultivo, factor de abatimiento hídrico y eficiencia en el uso del agua de chile pimienta en malla-sombra. *Acta Universitaria*, 36(NE-1), e4916. doi. <https://doi.org/10.15174/au.2026.4916>

Introducción

México es un país con baja disponibilidad de agua (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2023), por lo que resulta imprescindible no solo mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura, sino también promover su uso de manera sustentable (Campos & Martínez, 2024).

Durante el ciclo agrícola 2024-2025, se presentó una de las sequías más críticas en el estado de Sinaloa, que llegó a presentar valores muy altos de sequía severa (D2), sequía extrema (D3) y sequía excepcional (D4), de acuerdo con el Monitor de Sequía en México (Tabla 1) (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2025). Sin embargo, la escasez de agua en Sinaloa para la agricultura es un problema recurrente, por lo que es necesario optimizar el recurso hídrico buscando el equilibrio agronómico que garantice la sostenibilidad del agua sin comprometer el rendimiento (Sifuentes *et al.*, 2021).

Tabla 1. Superficie con afectación por sequía (%) en Sinaloa.

MES	SA	D0	D1	D2	D3	D4
OCT	0.0	26.4	22.0	19.1	19.1	13.4
NOV	0.0	26.5	19.7	21.3	20.2	12.3
DIC	0.0	0.0	0.0	60.8	28.1	11.1
ENE	0.0	7.6	4.9	43.6	31.6	12.3
FEB	0.0	0.0	1.4	39.4	41.0	18.2
MAR	0.0	0.0	0.5	26.3	50.9	22.3
ABR	0.0	0.0	0.5	7.8	59.3	32.4
MAY	0.0	4.4	5.2	14.2	49.6	26.6

Nota. SA = sin afectación, D0 = anormalmente seco, D1 = sequía moderada, D2 = sequía severa, D3 = sequía extrema, D4 = sequía excepcional.

Fuente: Elaboración propia con datos del Monitor de Sequía en México (31 de diciembre de 2024).

La agricultura es el principal consumidor del recurso hídrico y en Sinaloa representa el 94% del uso estatal (CONAGUA, 2023); no obstante, la limitación de este recurso se ha convertido en uno de los principales problemas de la agricultura, en tanto que, los periodos de sequía son cada vez más recurrentes y prolongados, particularmente en el Valle de Elota, México (Hernández *et al.*, 2023), lo que conlleva a poner mayor énfasis a la estimación del consumo real de agua por las plantas en la agricultura.

Durante el periodo 2020-2023, la superficie agrícola promedio sembrada en Sinaloa fue de 714 338 ha, con un volumen bruto medio utilizado de 6 980 762 m³, lo que representa una lámina bruta de riego aplicada de 97.7 cm. Aun así, en la zona de riego del Valle de Elota, que corresponde al Distrito de Riego 108 Elota-Piaxtla, la superficie agrícola media sembrada en el mismo periodo fue de 21 244 ha, con un volumen bruto de agua aplicado de 217 635 m³, para una lámina bruta media aplicada de 102.4 cm por encima de la media estatal (CONAGUA, 2024).

El cultivo de chile pimiento representa una fuente de empleo importante en el campo agrícola sinaloense, además de que es el segundo producto hortícola que mayormente se exporta a Estados Unidos de Norteamérica (Angulo-Castro *et al.*, 2021). Durante el periodo 2020-2024, Sinaloa ocupó el primer lugar nacional, con una superficie total sembrada y producción de chile pimiento del 78.3% y 74.3%, respectivamente, mientras que en la superficie sembrada y producción de chile pimiento en condiciones de malla sombra a nivel nacional para Sinaloa representó el 76.6% y 76.1%, respectivamente (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2025).

Asimismo, es importante mencionar que, en el ámbito estatal, en el Valle de Elota la superficie total sembrada de chile pimiento y producción representó el 23.5% y 23.3%, respectivamente, mientras que la superficie sembrada y producción en condiciones de malla sombra representó el 29.3% y 26.5%, respectivamente (SIAP, 2025).

El riego es necesario para mantener la producción agrícola en zonas áridas y semiáridas, donde la evapotranspiración de los cultivos es un elemento clave para la optimización del manejo de agua. Hasta la fecha, se han implementado y validado numerosos métodos, tanto directos como indirectos, para medir o estimar las necesidades hídricas de los cultivos agrícolas (Baris & Tombul, 2024; Ghat et al., 2021; Su et al., 2023; Wanniarachchi & Sarukkalige, 2022; Xue et al., 2025).

La optimización del riego agrícola implica maximizar el uso eficiente del agua para lograr la producción agrícola sostenible y rentable; para ello, se requiere de varios elementos clave, por ejemplo: identificar el requerimiento hídrico específico de cada cultivo y etapa fenológica, y conocer la sensibilidad al estrés hídrico en las diferentes fases del desarrollo, lo que se manifiesta a través del factor de abatimiento o agotamiento hídrico (El-Shafei & Mattar, 2022).

El factor de abatimiento hídrico está asociado al intervalo de riego, y su adecuada aplicación permite desarrollar estrategias de manejo del riego en condiciones de déficit hídrico, minimizando los efectos negativos del estrés hídrico en el crecimiento y la productividad de los cultivos (Elzopy et al., 2025).

Por otro lado, el coeficiente de cultivo (K_c) es un elemento crucial que se usa para determinar la necesidad real de agua de los cultivos, aplicándose en conjunto con la evapotranspiración de referencia (ET_0). Es un valor numérico que representa el requerimiento de agua de cierto cultivo con respecto a la cantidad de agua requerido por un cultivo de referencia. Está relacionado con las características fisiológicas y morfológicas, así como con la etapa fenológica de la planta (Pereira et al., 2021; Zheng et al., 2024).

En este contexto, el conocimiento de factores clave —como los coeficientes de cultivo (K_c) y factor de abatimiento hídrico (f) determinados localmente— es indispensable para la aplicación de métodos eficaces, como la metodología propuesta: FAO Penman-Monteith (FAO56). Este método es reconocido universalmente como una herramienta confiable para calcular el consumo hídrico de los cultivos; depende de la determinación precisa de los valores de K_c y f .

El objetivo de la investigación consistió en determinar la evapotranspiración del cultivo (ET_c), los coeficientes de cultivo (K_c), el factor de abatimiento hídrico (f) y la eficiencia en el uso del agua (EUA) de chile pimiento bajo producción de malla-sombra en el Valle de Elota, México.

Materiales y métodos

El trabajo experimental se llevó a cabo en condiciones protegidas (malla-sombra) en la Empresa Agrícola Hortimega S. A. de C. V., que se localiza en la zona agrícola del Valle de Elota, Sinaloa, al noroeste de México, con coordenadas geográficas centrales de 23.9833 N y 106.8333 W. El clima es cálido subhúmedo, tiene una precipitación media anual de 790 mm, una temperatura media anual de 25 °C y temperaturas extremas de 37.1 °C y 10.3 °C.

El análisis físico del suelo mostró una textura franco-arenosa, con una densidad aparente de 1.33 g cm^{-3} , un contenido volumétrico de humedad a capacidad de campo (θ_{cc}) de $0.252 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y a punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) de $0.132 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Por otro lado, el análisis químico del suelo arrojó un pH de 7.04, conductividad eléctrica de 1.74 dS m^{-1} , RAS de 0.59 y PSI de 0.39. El análisis químico del agua de riego mostró valores de pH de 7.12, conductividad eléctrica de 0.11 dS m^{-1} , RAS de 1.08 y PSI de 0.33.

Como material vegetal se utilizó planta de chile pimiento variedad Trupper. La duración del periodo de estudio fue de 152 días, abarcando desde el 30 de septiembre de 2024 al 28 de febrero de 2025. La fertilización y control fitosanitario fue homogénea para todos los tratamientos. Para la nutrición del cultivo se aplicó la solución Steiner, adecuándola de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo (50% etapa inicial y 100% etapa media y final), mientras que para el control fitosanitario se aplicó pirecris® (1.5 ml L^{-1}) para mosca blanca (*Bemisia tabaci*), trips (*Frankliniella occidentalis*), minador (*Liriomyza* spp.) y piojo arinoso (*Planococcus* spp.), y para el control de tizón temprano (*Alternaria solani*) se aplicó Fungisei® (producto a base de *Bacillus subtilis*, 5 ml L^{-1}).

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en la aplicación de diferentes factores de abatimiento hídrico (f): 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 (Tabla 2), donde el factor de abatimiento señala el nivel (porcentaje) de agotamiento de la humedad totalmente aprovechable (HTA). De esta forma, la nomenclatura T10, T20, T30, T40 y T50 se refiere a que en cada tratamiento (T) se consume el 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de HTA (ecuación 1), respectivamente.

Se utilizó un terreno de 150 m^2 con un área efectiva de mojado de 37.5 m^2 , donde se establecieron 15 camas (unidades experimentales) de 0.5 m de ancho y 5 m de longitud, con una separación de 1.5 m entre camas y 0.3 m entre plantas, para un total de 15 plantas por unidad experimental y 225 plantas en el experimento. Para el riego se utilizaron goteros de 1 L h^{-1} , con una separación de 30 cm entre ellos.

Tabla 2. Tratamientos aplicados en el trabajo experimental.

Tratamiento	f	Criterio del riego
T10	0.1	Se aplicó el riego cuando se consumió el 10% de la HTA
T20	0.2	Se aplicó el riego cuando se consumió el 20% de la HTA
T30	0.3	Se aplicó el riego cuando se consumió el 30% de la HTA
T40	0.4	Se aplicó el riego cuando se consumió el 40% de la HTA
T50	0.5	Se aplicó el riego cuando se consumió el 50% de la HTA

Nota. HTA = Humedad Totalmente Aprovechable, f = factor de abatimiento hídrico.

Fuente: Elaboración propia.

La humedad totalmente aprovechable (HTA) se calculó con la ecuación 1.

$$HTA = \frac{(\theta_{cc} - \theta_{pmp})}{100} P Pr \quad (1)$$

donde θ_{cc} es el contenido volumétrico de humedad a capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ_{pmp} es el contenido volumétrico de humedad a punto de marchitez permanente ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), P es el porcentaje de suelo mojado (fracción) y Pr es la profundidad radical (mm). Se consideró un valor de 300 mm para Pr y 0.25 mm para P .

La información meteorológica se midió con sensores instalados sobre una torre colocada al interior de la malla-sombra. La estación estaba equipada con sensores para medir las variables de radiación solar neta, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_0), según la metodología FAO56 (ecuación 2), con intervalos de tiempo diarios (Allen *et al.*, 2006):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

donde Δ es la pendiente de la curva de presión a saturación ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n es la radiación solar neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G es el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T es la temperatura media diaria ($^\circ\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento medida a 2 m de altura (m s^{-1}), y $(e^s - e^a)$ es el déficit de presión de vapor (kPa). Los valores de Δ , γ , e_s y e_a se calculan conforme se plantea en Allen *et al.* (2006). Del mismo modo, para el interior de la malla-sombra, la velocidad del viento fue nula, por lo que se manejó un valor de 0.5 m s^{-1} para evitar que la ecuación se invalidara, tal como lo recomiendan Allen *et al.* (2006) y Varga-Haszonits *et al.* (2022).

La evapotranspiración de referencia (ET_0), al depender exclusivamente de las condiciones meteorológicas del área de estudio, se mantuvo constante para todos los tratamientos del experimento. Esta uniformidad permitió que las diferencias observadas entre tratamientos reflejaran únicamente los efectos del consumo de agua (ET_c), sin la influencia de variaciones climáticas externas.

Para medir la evapotranspiración del cultivo (ET_c), se construyeron 15 lisímetros volumétricos en las camas experimentales de 1 m^2 de superficie y 0.6 m de profundidad, correspondientes a las repeticiones de los cinco tratamientos, siguiendo las instrucciones de diseño de Villafañe *et al.* (2016). Con base en la metodología de entradas y salidas de agua (Jaramillo *et al.*, 2025), se estimó el agua consumida por el cultivo (ET_c) utilizando la ecuación 3:

$$ET_c = \frac{P + R - D}{I} \quad (3)$$

donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo calculada para el periodo de tiempo entre el riego y el drenaje (mm d^{-1}), P es la precipitación diaria registrada en pluviómetro instalado en estación meteorológica (mm), R es el riego o lámina de agua aplicada al cultivo (mm), D es la lámina de agua drenada en los lisímetros (mm), I es el intervalo de tiempo entre cada riego (d).

Los valores de K_c para las etapas fenológicas inicial, media y final señaladas por Allen *et al.* (2006), se determinaron mediante la ecuación 4:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (4)$$

donde ET_c es la lámina de agua consumida o la ET del cultivo medida con los lisímetros volumétricos (mm), y ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm). La humedad en el suelo se midió con sensores de humedad Watermark® instalados a 300 mm de profundidad, y el volumen de agua aplicado se midió con un medidor volumétrico instalado en el sistema de riego por goteo utilizado. Se consideró el valor de K_c del Tratamiento con mayor eficiencia de uso de agua (EUA).

Para evaluar el crecimiento de la planta, se midió la altura final (cm) de las quince plantas y se obtuvo una media aritmética para cada repetición, mientras que el rendimiento del cultivo (ton ha^{-1}) se evaluó al final del periodo de estudio, mediante cuatro cortes realizados entre los días 126 y 150 después del trasplante (ddt). Además, se registró la lámina media de agua consumida (ETc) y los intervalos de riego para cada tratamiento.

Para evaluar la EUA —también conocida como productividad física del agua— se aplicó la ecuación 5:

$$\text{EUA} = \frac{Yd}{V} \quad (5)$$

donde EUA se midió en kg m^{-3} , el Yd = rendimiento (kg ha^{-1}) y V = volumen de agua medido aplicando la ETc total media estimada por hectárea (mm ha^{-1}).

El análisis estadístico se realizó aplicando el *software* estadístico Minitab 17. Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias entre tratamientos y la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% ($p \leq 0.05$). Se consideró la existencia de diferencias estadísticas significativas cuando $p > 0.05$. Los valores medios reportados para cada variable analizada corresponden a la media $\pm$ desviación estándar.

Resultados

La altura máxima de planta (100.1 cm) se alcanzó con el T10 ($f = 0.1$), mientras que la altura mínima (91.8 cm) se obtuvo con el T50 ($f = 0.5$) (Tabla 3). El análisis estadístico muestra un coeficiente de variación bajo $CV < 1\%$ (Tabla 4), lo que indica que existe buena uniformidad entre las repeticiones. El ANOVA indica que existe diferencia significativa entre la altura de planta producida por los diferentes tratamientos, y la prueba de Tukey al 5% señala que no existe diferencia significativa entre T10 y T30, que mostraron los mejores resultados.

Tabla 3. Resultados obtenidos con los diferentes tratamientos, desviación estándar y comparación de medias (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

TRATAMIENTO	h (cm)	Rend (t ha^{-1})	ETc (mm)	EUA (kg m^{-3})
T10	100.1 $\pm$ 0.15 a	76.7 $\pm$ 1.54 a	459 $\pm$ 4.36 a	16.73 $\pm$ 0.21 a
T20	98.6 $\pm$ 0.23 b	68.2 $\pm$ 1.72 a	445 $\pm$ 10.44 a	15.33 $\pm$ 0.23 a
T30	99.3 $\pm$ 0.316 ab	67.8 $\pm$ 1.71 a	448 $\pm$ 10.12 a	15.13 $\pm$ 0.25 a
T40	94.1 $\pm$ 0.316 c	38.0 $\pm$ 1.30 b	453 $\pm$ 5.51 a	8.37 $\pm$ 0.31 b
T50	91.8 $\pm$ 0.30 d	29.6 $\pm$ 0.79 b	447 $\pm$ 15.62 a	6.63 $\pm$ 0.21 b

Nota. h = altura media de planta al final del experimento, Rend = rendimiento medio del cultivo, ETc = evapotranspiración media del cultivo medida con lisímetro volumétrico, EUA = Eficiencia de uso del agua. Medias con letras distintas indican diferencia significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).
Fuente: Elaboración propia.

Respecto al rendimiento, el T10 ($f = 0.1$) presentó el mayor rendimiento promedio (76.7 t ha^{-1}) (Tabla 3) y una buena estabilidad en los datos con un CV de 2% (Tabla 4). Los datos del T20 también presentaron buena estabilidad, con un CV de 2.5%, mientras que los otros tres tratamientos mostraron un CV entre 3% y 4%. El tratamiento con menor rendimiento promedio fue el T50 (29.6 t ha^{-1}). El ANOVA indica que existe diferencia entre los tratamientos, y la prueba de Tukey al 5% señala que la diferencia entre el rendimiento obtenido para T10, T20 y T30 no es significativa, donde se obtuvo el rendimiento mayor.

Tabla 4. Coeficiente de variación (CV, %) para las diferentes variables y tratamientos.

TRATAMIENTO	h	Rend	ETc	EUA
T10	0.15	2.0	0.9	1.2
T20	0.23	2.5	2.3	1.5
T30	0.31	3.9	2.3	1.7
T40	0.32	3.4	1.2	3.7
T50	0.33	3.9	3.5	3.1

Fuente: Elaboración propia.

La evapotranspiración del cultivo (ETc) medida con el lisímetro volumétrico muestra uniformidad entre los tratamientos y entre las repeticiones, con CV menores al 5% (Tabla 4). El ANOVA indica que las medias de los tratamientos son estadísticamente iguales, lo que significa que los tratamientos ejercen efectos equivalentes sobre la ETc medida ($p = 0.465 > 0.05$). La ETc mayor fue para T10, con un valor medio de 459 mm, mientras que el valor menor de la ETc media fue para T20 (445 mm) (Tabla 3).

Al analizar los valores de la productividad física del agua o EUA, en la Tabla 3 se observa que los tratamientos T10, T20 y T30 presentan mayor EUA, con medias entre 15 kg m^{-3} y 17 kg m^{-3} . T40 y T50 muestran una reducción notable en la EUA (medias de 8.4 kg m^{-3} y 6.6 kg m^{-3} , respectivamente). En la Tabla 4 se muestra que el coeficiente de variación (CV) es bajo para los diferentes tratamientos ($CV < 5\%$), lo que indica una buena precisión experimental. El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un valor de $p = 0.0000126 < 0.05$, lo cual señala que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de productividad del agua. La prueba de Tukey al 5% indica que entre los tratamientos T10, T20 y T30 no existen diferencias significativas entre sí, formando un grupo homogéneo de alta productividad física del agua, mientras que los tratamientos T40 y T50 no difieren estadísticamente entre sí, formando un grupo de baja productividad física del agua. La diferencia entre los grupos de alta productividad y baja productividad sí son altamente significativas.

Considerando que, respecto al rendimiento productivo (Rend) y eficiencia en el uso del agua (EUA) no hubo diferencia estadísticamente significativa entre T10, T20 y T30 (Tabla 3), los coeficientes de cultivo (Kc) calculados para las etapas fenológicas inicial, media y final del chile pimienta en el Valle de Elota fueron: T10: 0.64, 1.02 y 1.10; T20: 0.68, 0.97 y 1.10; y T30: 0.60, 0.98 y 1.14 (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de Kc obtenidos con los diferentes tratamientos y la desviación estándar.

TRATAMIENTO	Coeficiente de cultivo (Kc) por etapa fenológica		
	INI	MED	FIN
T10	0.64±0.015	1.02±0.032	1.10±0.038
T20	0.68±0.035	0.97±0.032	1.10±0.045
T30	0.60±0.030	0.98±0.053	1.14±0.040
T40	0.63±0.021	0.99±0.015	1.16±0.049
T50	0.56±0.040	1.01±0.062	1.11±0.055

Nota. INI = etapa inicial, MED = etapa media, FIN = etapa final.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El incrementar el factor de abatimiento hídrico (f) se afecta en el intervalo de riego, ampliándolo, esto causa un estrés hídrico en la planta que afectó su crecimiento y rendimiento y, en función de eso, también la productividad física del agua o eficiencia en el uso del agua. Autores como Ntanasi *et al.* (2025) señalan que las hortalizas suelen mostrar sensibilidad al estrés hídrico, lo que dificulta directamente la fotosíntesis al limitar la difusión de CO_2 hacia las hojas estresadas, debido a la reducción de la conductancia, principalmente en los tejidos estomáticos y del mesófilo. Asimismo, afecta la absorción de nutrientes por las raíces a causa de la disminución del contenido de agua en el suelo, lo que ralentiza la difusión de nutrientes desde el suelo hasta la superficie de la raíz. Lo anterior afecta la producción de biomasa y, por consiguiente, la altura de planta.

El chile pimienta presenta rasgos fisiológicos que le permite reducir la conductancia estomática con rapidez cuando se presenta un estrés hídrico en la planta. Esto se debe a que se induce rápidamente a la acumulación de ácido abscísico (ABA) en hojas y raíces, lo cual envía una señal rápida a células oclusivas para el cierre estomático temprano, reduciendo la conductancia estomática antes de que ocurra la deshidratación severa (Ismail *et al.*, 2002). Asimismo, el chile pimienta tiende a mantener el potencial hídrico foliar relativamente estable, cerrando sus estomas rápidamente cuando se reduce la humedad disponible, limitando la transpiración de forma preventiva (Goto *et al.*, 2021).

Dere (2025), al evaluar el efecto del estrés hídrico en chile pimienta, reportó que al reducir el volumen de agua de riego al 50% se redujo la altura de planta en un 24.5%, mientras que, al aplicar el 25% del riego óptimo, la reducción de altura de planta fue de 28.2% (pasando de 73.5 cm con riego, hasta 55.5 cm y 52.8 cm, para el 50% y 25% del riego, respectivamente).

En la presente investigación no se redujo el riego, sino que se amplió la frecuencia de riego; sin embargo, eso provocó una reducción de altura de planta del 8.3%. Mohammed & Hussien (2023), aplicando un déficit de humedad diferente en el cultivo de chile, encontraron que la mayor altura de la planta fue para el tratamiento sin déficit de riego, lo que coincide con nuestro trabajo, donde la altura mayor se alcanzó con el déficit menor utilizado ($f = 0.1$).

El uso de diferentes factores de abatimiento hídrico (f) para determinar el momento de riego, afectó la frecuencia de riego. El valor f de 0.1, que corresponde a T10, obtuvo los mejores resultados, aunque estadísticamente no hubo diferencia con T20 y T30, en los que se aplicaron valores f de 0.2 y 0.3, respectivamente, incrementando la frecuencia de riego. El rendimiento del chile pimienta se vio afectado por los factores de abatimiento hídrico de 0.4 y 0.5, donde la diferencia entre el rendimiento mayor y el menor se ve reflejado por una reducción del 61.4%.

Abdalla *et al.* (2019) trabajaron con diferentes frecuencias de riego en chile y concluyeron que, al incrementar la frecuencia de riego de 7 d a 21 d, la reducción en el rendimiento de chile fue de 61.1%. Mohammed & Hussien (2023) y Darko *et al.* (2025), al trabajar con diferente déficit de riego en chile, reportaron que el estrés hídrico causado por un déficit de agua sí afecta significativamente el rendimiento del cultivo de chile.

Respecto a la evapotranspiración medida con el lisímetro volumétrico, el valor máximo obtenido fue para el tratamiento T10 (459 mm). Darko *et al.* (2025) reportaron una lámina de agua consumida de 430.8 mm para chile, mientras que Mohammed & Hussien (2023) determinaron una lámina neta consumida de 485 mm. Esto contrasta con lo señalado por Jaramillo *et al.* (2025), quienes reportaron una evapotranspiración de 1124.4 mm para chile, un valor considerablemente superior a lo encontrado en este trabajo y a los reportados por otros autores.

Asimismo, Ávila-Dávila *et al.* (2021), al evaluar la ETc estimada con lisímetro de pesada removible, obtuvieron una ETc de 865 mm en promedio. López-Avendaño *et al.* (2015) estimaron la ETc de chile pimienta bajo condiciones de campo abierto en el Valle de Culiacán, México, y reportaron un valor estimado con FAO56 de 363.6 mm y medida con el sistema de covarianza de vórtices de 267.6 mm; sin embargo, el periodo evaluado fue de 83 d. La diferencia en los valores de ETc estimado por los diferentes autores se debe a la región geográfica, las condiciones meteorológicas locales, el ciclo vegetativo considerado, el sistema de producción utilizado y el método de estimación aplicado.

Diversos estudios señalan que son múltiples los factores que afectan el rendimiento los y el consumo de agua de los cultivos; por consiguiente, afectan al indicador hídrico de eficiencia en el uso del agua (EAU). Algunos de estos factores son: genotipo, variedad, nutrición, manejo del riego, sistema de producción, entre otros (Akkamis & Caliskan, 2023; Meier *et al.*, 2024; Mutanda *et al.*, 2025; Ncisana *et al.*, 2024; Valdez *et al.*, 2023).

La optimización del riego incrementa la producción del cultivo y reduce el consumo de agua; por tanto, mejora la eficiencia del uso del agua (EUA). Por el contrario, el uso ineficiente del agua, las pérdidas por percolación profunda y el aumento del lixiviado de nutrientes fuera del alcance de raíces reducen el valor de EUA (Eid *et al.*, 2025). Eid *et al.* (2025) señalan una EUA de 23.8 kg m^{-3} y 23.26 kg m^{-3} en el cultivo de chile pimienta, valores superiores a los encontrados en este trabajo, que variaron desde 16.73 kg m^{-3} hasta 15.13 kg m^{-3} .

El valor de EUA es influenciado por la intensidad y frecuencia de riego. Lo anterior es señalado por Mackic *et al.* (2023), quienes evaluaron una eficiencia en el uso del agua para chile pimienta de 9.57 kg m^{-3} a 10 kg m^{-3} .

La reducción de la evapotranspiración de referencia (ET_0), debido al aumento en la humedad relativa dentro de las instalaciones de agricultura protegida, como invernaderos y malla-sombra, provoca un aumento en los valores de Kc. Lo anterior es señalado por Lorenzoni *et al.* (2019), quienes obtuvieron valores de Kc de 0.86, 1.55 y 1.4 para las etapas inicial, media y final, respectivamente, los cuales fueron superiores a los recomendados por la FAO (Allen *et al.*, 2006).

Esto explica los valores altos de Kc obtenidos en este trabajo, mismos que difieren de los reportados por López-Avendaño *et al.* (2015), en el Valle de Culiacán (0.60, 0.86 y 0.66), y de los obtenidos por Jaramillo *et al.* (2025), en el Valle de Loja, Ecuador (0.51, 1.01, 0.85). Estas diferencias podrían deberse a la metodología empleada para medir la evapotranspiración del cultivo, al ciclo vegetativo aplicado, al sistema de producción utilizado, así como al manejo agronómico del cultivo de chile en ambas regiones.

Conclusiones

Los resultados integrados muestran que la reducción del factor de abatimiento hídrico f dentro del rango 0.1–0.3 optimiza simultáneamente el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua, sin generar cambios significativos en la evapotranspiración del cultivo.

Lo anterior indica que las diferencias productivas observadas no responden a variaciones en la demanda hídrica total, sino a la reducción en la humedad fácilmente aprovechable en el suelo, debido —generalmente— a que no se aplica el riego oportunamente. Con esto se evidencia un umbral de manejo donde el recurso hídrico se utiliza con máxima eficiencia fisiológica y agronómica. En consecuencia, el estudio demuestra que existen niveles de manejo del factor de abatimiento hídrico f que permiten optimizar la productividad y la eficiencia hídrica.

Conflicto de interés

Los autores no presentan conflictos de interés.

Referencias

- Abdalla, M. M. A., Mettwally, A. K., Abbas, H. S., & Ahmed, M. A. (2019). Effect of irrigation intervals on growth and yield of pepper (*Capsicum annuum* L.). *International Journal of Biosciences*, 14(2), 40-56. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/14.2.40-56>
- Akkamis, M., & Caliskan, S. (2023). Response of yield, quality and water use efficiency of potato grown under different drip irrigation and nitrogen levels. *Scientific Reports* 13, 9911. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36934-3>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Angulo-Castro, A., Ferrara-Cerrato, R., Alarcón, A., Almaraz-Suárez, J. J., Delgadillo-Martínez, J., Jiménez-Fernández, M., & García-Barredas, O. (2021). Improved growth of bell pepper (*Capsicum annuum*) plants by inoculating arbuscular mycorrhizal fungi and beneficial rhizobacteria. *Sicentia Fungorum*, 51, e1299. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1299>
- Ávila-Dávila, L., Molina-Martínez, J. M., Bautista-Capetillo, C., Soler-Méndez, M., Robles, C. O., Júnez-Ferreira, H. E., & González-Trinidad, J. (2021). Estimation of the evapotranspiration and crop coefficients of bell pepper using a removable weighting lysimeter: a case study in the southeast of Spain. *Sustainability*, 13(2), 747. <https://doi.org/10.3390/su13020747>
- Baris, M., & Tombul, M. (2024). A review on models, products and techniques for evapotranspiration measurement, estimation, and validation. *Environmental Quality Management*, 34(1), e22250. <https://doi.org/10.1002/tqem.22250>
- Campos, K. M., & Martínez, G. (2024). Future scenarios for water management in Mexico: integrated and sustainable approaches. *RevisTAP*, 3(1), 437-444. <https://revistap.ejeutap.edu.co/index.php/utap/article/view/139>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Estadísticas del Agua en México 2023*. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/port_publicaciones.html
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego>
- Darko, R. O., Wadie, P. C., Afutu, E., Kissi, N. A., Ackah, F. K., & Hanyabui, E. (2025). Impact of deficit irrigation on sweet pepper (*Capsicum annuum* var. Simbard) performance: assessing growth, yield, and water use efficiency under a four-day Interval irrigation. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 103(2), 227-243. <https://doi.org/10.21608/EJAR.2025.360782.1642>

- Dere, S. (2025). Effect of manganese applications on growth and physiological responses of pepper (*Capsicum annuum* L. "Mazamort") under different drought stress levels. *Harran Journal of Agricultural & Food Science*, 29(3), 405-422. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.1701662>
- Eid, A. S. M., Okasha, A. M., Abdallah, Y. I., & El-kassas, M. S. A. (2025). Optimizing water and energy productivity in greenhouse bell pepper cultivation using smart irrigation systems in North Sinai. *Egyptian Journal of Soil Science*, 65(2), 1061-1075. <https://doi.org/10.21608/ejss.2025.371160.2080>
- El-Shafei, A. A., & Mattar, M. A. (2022). Irrigation scheduling and production of wheat with different water quantities in surface and drip irrigation: field experiments and modelling using CROPWAT and SALTMed. *Agronomy*, 12(7), 1488. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071488>
- Elzopy, K. A., Surendran, U. P., Chaturvedi, A. K., Gopinath, G., Raja, P., Chandran, K. M., Khan, N., Yassin, M. A., Mattar, M. A., & Salem, A. (2025). Cowpea evapotranspiration modeling using the FAO-56 dual crop coefficient approach for climate-resilient agriculture under deficit irrigation conditions. *Applied Water Science*, 15, 163. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02502-5>
- Ghiat, I., Mackey, H. R., & Al-Ansari, T. (2021). A review of evapotranspiration measurement models, techniques and methods for open and closed agricultural field applications. *Water*, 13, 2523. <https://doi.org/10.3390/w13182523>
- Goto, K., Yabuta, S., Ssenyonga, P., Tamaru, S., & Sakagami, J. (2021). Response of leaf water potential, stomatal conductance and chlorophyll content under different levels of soil water, air vapor pressure deficit and solar radiation in chili pepper (*Capsicum chinense*). *Scientia Horticulturae*, 281, 109943. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2021.109943>
- Hernández, L., Medina, C. M., & Gómez, E. (2023). Las sequías en la región de Sinaloa y su vínculo con el fenómeno de El Niño. En F. S. Sosa & R. M. Constantino (coords.), *Sequía en México* (pp. 149-166). Universidad Autónoma Metropolitana. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2023/12/Red-AgUAM-Sequia.pdf>
- Ismail, M. R., Davies, W. J., & Awad, M. H. (2002). Leaf growth and stomatal sensitivity to ABA in droughted pepper plants. *Scientia Horticulturae*, 96(1-4), 313-327. [https://doi.org/10.1016/s0304-4238\(02\)00117-6](https://doi.org/10.1016/s0304-4238(02)00117-6)
- Jaramillo, J., Cordero, J., González, A., & Reinoso, M. (2025). Estimación del coeficiente de cultivo (Kc) para el cultivo de pimiento mediante lisímetro volumétrico en la zona productiva del sistema de riego Campana-Malacatos. *Bosques Latitud Cero*, 15(1), 68-80. <https://doi.org/10.54753/blc.v15i1.2366>
- López-Avendaño, J. E., Díaz-Valdés, T., Watts-Thorp, C., Rodríguez, J. C., Castellanos-Villegas, A. E., Partida-Ruvalcaba, L., & Velázquez-Alcaraz, T. J. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de Chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 209-219. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/60/68>
- Lorenzoni, M. Z., Rezende, R., Santos, F. A. S., De Souza, A. H. C., Seron, C. C., & Do Nascimento, J. M. R. (2019). Estimation of the crop coefficient (kc) for bell pepper under greenhouse conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(10), 741-746. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p741-746>
- Mackic, K., Bajic, I., Pejic, B., Vlajic, S., Adamovic, B., Popov, O., & Simic, D. (2023). Yield and water use efficiency of drip irrigation of pepper. *Water*, 15(16), 2891. <https://doi.org/10.3390/w15162891>
- Meier, S., Campos, P., Morales, A., Jobet, C., López-Olivari, R., Palma-Millanao, R., Matus, I., Aponte, H., Cartes, P., Khan, N., Lavanderos, L., & Seguel, A. (2024). Genotypic responses to phosphorus and water management in winter wheat: strategies to increase resource use efficiency and productivity. *Agricultural Water Management*, 295, 108762. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108762>
- Mohammed, S., & Hussien, A. (2023). Influence of deficit irrigation levels on agronomic performance of pepper (*Capsicum annuum* L.) under drip at alage, central rift valley of Ethiopia. *PLOS ONE*, 18(11), e0280639. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280639>
- Mutanda, M., Shimelis, H., Chaplot, V., Shamuyarira, K. W., & Figlan, S. (2025). Agronomic performance and water use efficiency of newly developed wheat populations under drought-stressed and non-stressed conditions. *Discovery Applied Sciences*, 7, 176. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06605-1>
- Ncisana, L., Nyathi, M. K., Mkhize, N. R., Mabhaudhi, T., Tjelele, T. J., Mbambalala, L., & Modi, A. T. (2024). Water use efficiency (WUE) and nutrient concentration of selected fodder radish (*Raphanus sativus* L.) genotypes for sustainable diets. *Scientific Reports*, 14, 31315. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82727-7>

- Ntanasi, T., Karavidas, I., Savvas, D., Spyrou, G. P., Giannothanas, E., Consentino, B. B., Papasotiropoulos, V., Sabatino, L., & Ntatsi, G. (2025). Physiological and yield responses of pepper (*Capsicum annuum*) genotypes to drought stress. *Plants*, 14(13), 1934. <https://doi.org/10.3390/plants14131934>
- Pereira, L. S., Paredes, P., López-Urrea, R., Hunsaker, D. J., Mota, M., & Mohammadi-Shad, Z. (2021). Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crops water requirements approach. *Agricultural Water Management*, 243, 106196. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106196>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2025). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2025). *Monitor de Sequía en México (MSM)*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Sifuentes, E., Ojeda, W., Macías, J., Mendoza, C., & Preciado, P. (2021). Déficit hídrico en maíz al considerar fenología, efecto en rendimiento y eficiencia en el uso del agua. *Agrociencia*, 55(3), 209-226. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2414>
- Su, Y., Wang, J., Li, J., Wang, L., Wang, K., Li, A., Gao, L., & Wang, Z. (2023). Spatiotemporal changes and driving factors of reference evapotranspiration and crop evapotranspiration for cotton production in China from 1960 to 2019. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1251789. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1251789>
- Valdez, V., Pilloni, R., Grondin, A., Hajjarpoor, A., Belhouchette, H., Brouziyne, Y., Chehbouni, G., Kharrou, M. H., Zitouna-Chebbi, R., Mekki, I., Molénat, J., Jacob, F., & Bossuet, J. (2023). Water use efficiency across scales: from genes to landscapes. *Journal of Experimental Botany*, 74(16), 4770-4788. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad052>
- Varga-Haszonits, Z., Szalka, E., & Szakál, T. (2022). Determination of reference evapotranspiration using Penman-Monteith method in case of missing wind speed data under subhumid climatic conditions in Hungary. *Atmospheric and Climate Sciences*, 12(2), 235-245. <https://doi.org/10.4236/acs.2022.122014>
- Villafañe, G., Basso, C., & Villafañe, R. (2016). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo (Kc) de Stevia [*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni] bajo condiciones parcialmente protegidas. *Bioagro*, 28(2), 131-136. [http://www.ucla.edu.ve/Bioagro/Rev28\(2\)/8.%20ms%201536.pdf](http://www.ucla.edu.ve/Bioagro/Rev28(2)/8.%20ms%201536.pdf)
- Xue, Y., Zhang, Z., Li, X., Liang, H., & Yin, L. (2025). A review of evapotranspiration estimation models: advances and future development. *Water Resources Management*, 39, 3641-3657. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04191-w>
- Wanniarachchi, S., & Sarukkalgige, R. (2022). A review on evapotranspiration estimation in agricultural water management: past, present, and future. *Hydrology*, 9(7), 123. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>
- Zheng, H., Hou, H., Wu, J., Tian, D., & Miao, P. (2024). Irrigation schedule optimization for wheat and sunflower intercropping under water supply restrictions in inner Mongolia, China. *Atmosphere*, 15(5), 566. <https://doi.org/10.3390/atmos15050566>