

Rendimiento y calidad de tomate injertado bajo déficit hídrico con tratamiento de nanopartículas

Yield and fruit quality of grafted tomato under water deficit with nanoparticle treatment

Rafael Delgado-Martínez¹ , Luis Eduardo Tamayo-Ruiz^{2*} , Efraín Neri-Ramírez¹ , Héctor Manuel Rodríguez-Morán¹ 

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias - Universidad Autónoma de Tamaulipas. Adolfo López Mateos, Centro Universitario Victoria, CP. 87120. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

²Universidad del Valle de México (UVM), Campus Victoria. Juan B. Tijerina 306, Zona Centro, CP. 87000. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

*Autor de correspondencia: luis_tamayor@my.uvm.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 13 de marzo 2026

Aceptado: 28 de julio 2026

RESUMEN. La producción de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una actividad hortícola de alta relevancia agroalimentaria; sin embargo, en regiones con escasez de agua su productividad puede verse limitada. El objetivo fue evaluar el crecimiento, rendimiento, eficiencia del uso del agua y calidad del fruto de tomate mediante el uso de injerto y la aplicación foliar de nanopartículas de cobre, bajo condiciones contrastantes de humedad del suelo en invernadero. Se compararon plantas injertadas y no injertadas establecidas en suelo a capacidad de campo y bajo déficit hídrico severo. Se empleó un diseño experimental completamente al azar y las variables de respuesta incluyeron altura de planta, diámetro de tallo, peso promedio de fruto, rendimiento, eficiencia del uso del agua, sólidos solubles totales, licopeno y betacaroteno. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La disponibilidad de agua en el suelo influyó significativamente sobre la altura de planta, el rendimiento, la eficiencia del uso del agua y el contenido de sólidos solubles totales, observándose mayores rendimientos y eficiencia bajo condiciones de capacidad de campo. La aplicación de nanopartículas de cobre promovió una mayor altura de planta respecto a los demás manejos agronómicos. El peso promedio de fruto y la concentración de carotenoides dependieron de la interacción entre la humedad del suelo y el manejo agronómico. En conjunto, los resultados indican que mantener la humedad cercana a capacidad de campo favorece el potencial productivo y la calidad del cultivo.

Palabras clave: Carotenoides, estrés abiótico, humedad del suelo, portainjerto, sólidos solubles

ABSTRACT. Tomato production (*Solanum lycopersicum* L.) is a horticultural activity of high agri-food relevance; however, in regions with water scarcity, productivity may be limited. The objective of this study was to evaluate tomato growth, yield, water use efficiency, and fruit quality through the use of grafting and foliar application of copper nanoparticles under contrasting soil moisture conditions in a greenhouse. Grafted and non-grafted plants were compared under soil at field capacity and under severe water deficit. A completely randomized experimental design was used, and response variables included plant height, stem diameter, average fruit weight, yield, water use efficiency, total soluble solids, lycopene, and β -carotene. Data were analyzed using analysis of variance and mean comparisons with Tukey's test ($p \leq 0.05$). Soil water availability significantly influenced plant height, yield, water use efficiency, and total soluble solids, with higher yield and water use efficiency observed under field capacity conditions. Copper nanoparticle application promoted greater plant height compared with the other agronomic management practices. Average fruit weight and carotenoid concentration were determined by the interaction between soil moisture and agronomic management. Overall, the results indicate that maintaining soil moisture near field capacity enhances the productive potential and fruit quality of tomato cultivation.

Keywords: Abiotic stress, carotenoids, rootstock, soil moisture, total soluble solids.

Como citar: Delgado-Martínez R, Tamayo-Ruiz LE, Neri-Ramírez E, Rodríguez-Morán HM (2026) Rendimiento y calidad de tomate injertado bajo déficit hídrico con tratamiento de nanopartículas. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. VI: e5267. DOI: 10.19136/era.a13nVI.5267.

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia a nivel mundial. En el contexto nacional, todos los estados de México producen tomate en mayor o menor medida (Becerra-Rodríguez *et al.* 2025). En particular, en Tamaulipas, hasta el 2024, la producción fue de 3.7 millones de toneladas en 50 mil hectáreas, que se tradujo en un valor cercano a los \$37.5 millones de pesos (SADER 2025). Su producción se desarrolla en amplias extensiones bajo sistemas de campo abierto, invernaderos con distintos niveles tecnológicos, así como esquemas hidropónicos, principalmente por adaptación a las condiciones climáticas, alta radiación solar y por predominantes climas áridos (Maureira *et al.* 2022, Becerra-Rodríguez *et al.* 2025).

Más allá de su relevancia productiva, el tomate es valorado por su aporte nutricional, particularmente por su contenido de vitaminas y compuestos antioxidantes. Entre estos, destacan los carotenoides, responsables de la pigmentación de frutas y verduras, los cuales constituyen las principales fuentes de este compuesto, razón por la que el tomate puede ser utilizado como alimento funcional o como ingrediente añadido en otro tipo de productos (Meléndez-Martínez *et al.* 2021, Chabi *et al.* 2024). Los carotenoides no solo participan en la determinación del color y la calidad nutricional, sino que cumplen funciones esenciales en la fotosíntesis y en la fotoprotección frente al estrés oxidativo (Simkin *et al.* 2022). De manera complementaria, las clorofilas han sido utilizadas como indicadores del estado fisiológico de la planta, mostrando variaciones asociadas a diferentes tipos de estrés abiótico (Agathokleous *et al.* 2021).

El suministro apropiado y suficiente de nutrientes es indispensable para el desarrollo del cultivo, sin embargo, el déficit hídrico es un factor relevante en la producción de tomate, ya que condiciona el desarrollo de la planta (Saffan *et al.* 2022), sin embargo, otras variables como el rendimiento y la productividad del agua son influenciadas significativamente por el marco de riego, en particular de la humedad del suelo (Mukherjee *et al.* 2023). Por ello la aplicación de déficit hídrico severo puede comprometer el rendimiento del cultivo, lo que limita su implementación como estrategia de manejo aislada con fines productivos. Por otro lado, se ha documentado que el riego deficitario puede inducir incrementos en la concentración de carotenoides y sólidos solubles totales en el fruto (Coyago-Cruz *et al.* 2022). El cual es el principal componente de calidad para fines nutricionales (Balbuena-Mascada *et al.* 2023), lo que representa una ventaja en función del objetivo de la producción.

Ante la problemática del déficit hídrico, se han propuesto tecnologías complementarias orientadas a modular la respuesta fisiológica al estrés hídrico sin penalizar la productividad. En este sentido, el uso de nanopartículas metálicas ha mostrado potencial para influir en procesos asociados al estrés oxidativo, bajo el supuesto de que el estrés provoca cambios diferenciales a nivel fisiológico según el tipo de estrés, promoviendo cambios en la acumulación de betacaroteno y otros parámetros de calidad del fruto (Landa 2021, Egea *et al.* 2023, Ullah *et al.* 2023). Así mismo, debido a su tamaño, las nanopartículas pueden promover otras respuestas como el aumento de la eficiencia fotosintética, lo que, a su vez, puede favorecer otras variables como el incremento del contenido de carbohidratos y con ello incrementar la tasa de crecimiento del cultivo (Wang *et al.* 2021). Paralelamente, el injerto herbáceo es una herramienta agronómica eficaz para mejorar la tolerancia al estrés abiótico, al favorecer un mejor funcionamiento del aparato fotosintético y una

mayor estabilidad del rendimiento bajo condiciones adversas (Reshma *et al.* 2024). Bajo este enfoque, el objetivo fue evaluar el rendimiento y la calidad del fruto de tomate en plantas injertadas sometidas a potenciales mátricos contrastantes, mediante la aplicación foliar de nanopartículas de cobre, con énfasis en su respuesta productiva y fisiológica bajo condiciones de restricción hídrica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo experimental se realizó en la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. El experimento inició después del trasplante y tuvo una duración de cuatro meses. El suelo utilizado fue de textura franca, determinada por el método de Bouyoucos (1962) y se registraron 59.3%, 12.1% y 28.6% de arena, arcilla y limo, respectivamente. Las características del suelo contribuyeron a condiciones de drenaje y aireación en las bolsas de polietileno empleadas en el periodo de evaluación. Se aplicaron riegos diarios por un sistema de goteo con estacas autocompensables y se cubrieron los requerimientos nutricionales de cultivo con la solución nutritiva Steiner (1961) estándar, la cual es utilizada en producción protegida de cultivos para mantener condiciones nutricionales homogéneas entre tratamientos y reducir la variabilidad.

Material vegetal e injerto

Se utilizaron híbridos de tomate Saladette variedad Río Grande y portainjertos. Las semillas se sembraron con cinco días de diferencia por el vigor que representan los portainjertos y que no superen el diámetro de tallo para un para evitar la incompatibilidad del injerto. El injerto se realizó a través del método de empalme, posteriormente, se aseguraron con clips para injertos. Las plántulas injertadas se colocaron en una cámara de crecimiento configurada con 16/8 horas de luz y oscuridad, respectivamente. Inicialmente se restringió la luz y se aumentó la humedad relativa con agua destilada. La cámara de crecimiento se configuró a 22 °C en el proceso de unión del injerto. Se realizó una selección de plántulas para trasplante 12 días posteriores al injerto.

Aplicación de nanopartículas de cobre (CUNP)

Se utilizaron nanopartículas de un tamaño medio de 25 nm, con un 99.8% de pureza y de forma esférica según las especificaciones del fabricante (SkySpring). Se realizó una aplicación durante el ensayo experimental con una concentración de 100 mg L⁻¹ con 10 mL de la solución de CUNP. La aplicación se realizó en la fase de floración (42 días posteriores al trasplante) para reducir sobrecarga de estrés por déficit hídrico y nanopartículas de cobre. La aplicación de CUNP se realizó aislando las plantas control. La concentración de 100 mg L⁻¹ de nanopartículas de cobre se seleccionó a partir de antecedentes que reportan efectos favorables sobre variables fisiológicas, bioquímicas y de tolerancia al estrés en rangos comprendidos entre 10 y 200 mg L⁻¹ (Kausar *et al.* 2022, Van Nguyen *et al.* 2022, Peralta-Manjarrez *et al.* 2023, Singh *et al.* 2023, Tamayo-Ruiz *et al.* 2025). La aplicación se realizó una sola vez para evaluar la respuesta del cultivo bajo una dosis representativa y restringir efectos acumulativos (Saritha *et al.* 2022).

Potencial mátrico del suelo

El riego del sustrato se realizó diariamente y el contenido de humedad de suelo se monitoreó mediante tensiómetros instalados en las unidades experimentales. Se definieron dos condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica: capacidad de campo (10-20 kPa) y déficit hídrico severo (65-80 kPa). De manera complementaria se estimó la evapotranspiración del cultivo mediante el método de Penman-Monteith (FAO) con el propósito de ajustar el volumen de agua aplicado y mantener los rangos de potencial mátrico durante el periodo experimental. Los tratamientos correspondieron al 100% de la demanda hídrica para capacidad de campo y al 40% para déficit hídrico severo.

Variables de crecimiento y rendimiento

La altura de planta se registró 145 días después del trasplante (ddt) con una cinta métrica, la variable se expresó en centímetros (cm). El diámetro de tallo fue registrado 10 cm por encima de la base al considerar cambios morfológicos del tallo. Para ello se utilizó un calibrador Vernier digital, la variable se reportó en cm. Para el peso promedio de fruto, se realizó la colecta de frutos 145 ddt en estado de madurez comercial uniforme, caracterizado por coloración roja predominante, lo que marcó el final del experimento, así también se sumó el peso de todos los frutos cosechados que correspondieron al rendimiento del cultivo. La eficiencia del uso del agua se estimó al utilizar el peso total de frutos y la cantidad de agua utilizada en el ciclo experimental, la variable se expresó en kilogramos por metro cúbico de agua (kg m^{-3}). Para el contenido de betacaroteno y licopeno se consideraron muestras compuestas, las cuales fueron procesadas en vasos de precipitado de 200 mL. Para evitar la degradación de los pigmentos se conservaron en un recipiente sobre hielo y se restringió la luz. La extracción y cuantificación de pigmentos se realizó por triplicado y se empleó la metodología de Nagata y Yamashita (1992), en la que se indica la utilización de 1 g de muestra procesada, posteriormente se añadieron 10 mL de una solución de acetona-hexano (4:6) y se tomó una alícuota de 1.5 mL para ser colocada en el contenedor de cuarzo del espectrofotómetro (BioMate 3) y se realizó la medición de la densidad óptica a 663, 645, 505 y 453 nm. El licopeno y betacaroteno se calcularon de acuerdo con la siguiente ecuación: Licopeno ($\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ de extracto) = $-0.0458 \times A_{663} + 0.204 \times A_{645} + 0.372 \times A_{505} - 0.0806 \times A_{453}$; Betacaroteno ($\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ de extracto) = $0.216 \times A_{663} - 1.22 \times A_{645} - 0.304 \times A_{505} + 0.452 \times A_{453}$, y se expresaron en $\mu\text{g } 100\text{g}^{-1}$ de peso fresco de fruto (PFF).

Análisis estadístico

Se estableció el experimento en un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2×4 , donde el primer factor corresponde a los niveles de humedad de suelo: capacidad de campo y déficit hídrico severo. El segundo factor correspondió a los manejos agronómicos; injertado, injertado + CUNP (100 mg L^{-1}) y CUNP (100 mg L^{-1}), además de un tratamiento testigo que consistió en plantas no injertadas y sin aplicación foliar de CUNP, establecidas bajo el mismo manejo agronómico base utilizado en el experimento. El tratamiento fue evaluado en dos condiciones de humedad de suelo: capacidad de campo (Testigo-CC) y déficit hídrico severo (Testigo-DH), donde el primer testigo se consideró como referencia experimental, sin restricciones hídricas. Las unidades experimentales correspondieron a una planta con seis repeticiones por tratamiento, las cuales se ubicaron en el invernadero bajo condiciones homogéneas por lo que la variación

correspondió a factores experimentales evaluados. Previo al análisis de varianza, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante el análisis de los residuos del modelo. Los datos fueron analizados por medio de un análisis de varianza de dos vías, se utilizó el software SAS 9.0 PROC ANOVA, y posteriormente se empleó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación de medias.

RESULTADOS

Altura de planta

La interacción entre humedad de suelo y manejo agronómico no presentó efecto significativo sobre la altura de planta ($p = 0.6936$), por lo que los resultados se interpretaron con base en los efectos principales (Tabla 1), donde la humedad de suelo influyó significativamente sobre la altura de planta. Por su parte, la aplicación foliar de 100 mg L^{-1} de nanopartículas de cobre promovió la mayor altura promedio (86.42 cm), superando en 14.3% al tratamiento testigo, es decir, sin manejos agronómicos. En contraste, el tratamiento combinado de nanopartículas de cobre e injerto presentó la menor altura promedio (72.10 cm), sin diferencias estadísticas respecto al testigo e injertado aislado. Lo anterior, indica que la respuesta de la altura estuvo influenciada mayormente por la disponibilidad hídrica que por la aplicación aislada de nanopartículas de cobre.

Tabla 1. Efectos principales de la humedad del suelo y del manejo agronómico sobre variables de crecimiento, rendimiento, eficiencia del uso del agua y calidad del fruto de tomate.

Factor	AP (cm)	DT (mm)	PT (t ha ⁻¹)	EUA (kg m ⁻³)	SST (°Brix)
CC	82.25 ^A	11.59 ^A	37.08 ^A	30.77 ^A	3.69 ^B
DH	73.38 ^B	7.9 ^A	19.29 ^B	24.01 ^B	5.38 ^A
HS F(p)	11.61(0.0015)	1.66 (0.59)	85.90 (<0.0001)	15.55 (0.0003)	58.89 (<0.001)
E.E.	1.84	0.10	1.35	0.15	0.15
Testigo	75.58 ^b	7.64 ^a	25.98 ^a	29.14 ^a	4.49 ^a
CUNP	86.42 ^a	12.1 ^a	29.33 ^a	27.28 ^a	4.44 ^a
Injerto	77.16 ^{ab}	9.12 ^a	27.69 ^a	28.07 ^a	4.75 ^a
CUNP+Injerto	72.10 ^b	9.24 ^a	29.73 ^a	25.05 ^a	4.46 ^a
MA F(p)	5.51 (0.0029)	0.64 (0.20)	0.79 (0.50)	1.02 (0.39)	0.44 (0.72)
EE	2.60	0.14	1.91	0.22	0.22
CV	11.59	5.12	23.59	21.67	16.79

HS: humedad del suelo; CC: capacidad de campo; DH: déficit hídrico severo; MA: manejo agronómico; AP: altura de planta; DT: diámetro de tallo; PT: producción total; EUA: eficiencia del uso del agua; SST: sólidos solubles totales. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas entre niveles de humedad del suelo (HS), mientras que letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre manejos agronómicos (MA), de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Valores F y probabilidad asociada (p) obtenidos del análisis de varianza. EE: error estándar de las medias ajustadas. CV: coeficiente de variación.

Diámetro de tallo

El diámetro de tallo no presentó influencia por la interacción entre la humedad del suelo y manejo agronómico, no presentó efecto significativo ($p = 0.59$), por lo que en términos de efectos principales (Tabla 1), la humedad del suelo no influyó significativamente sobre el diámetro de tallo, sin embargo, las plantas establecidas en capacidad de campo presentaron valores numéricamente superiores respecto a las sometidas a déficit hídrico severo. Por el contrario, el manejo agronómico sí afectó de forma significativa la variable en particular, los tratamientos con injerto, tanto de manera individual como combinada con nanopartículas de cobre, promovieron los mayores diámetros de tallo, con valores promedio de 9.12 y 9.24 mm, respectivamente, superiores al tratamiento testigo. En aspectos de manejo agronómico con nanopartículas de cobre, presentaron diámetros similares al testigo. Lo anterior permite explicar que el incremento de tallo estuvo asociado con el uso de injertos, independientemente de la condición hídrica en la que se establecen.

Rendimiento de fruto

Para el caso del rendimiento, no se presentó interacción entre la humedad del suelo y el manejo agronómico ($p = 0.4264$), por lo que se explica a través de efectos principales (Tabla 1). Para la variable en particular, la influencia del suelo fue el factor determinante, con efecto significativo, descartando el efecto por el manejo agronómico. Las plantas establecidas a capacidad de campo alcanzaron un rendimiento promedio de 37.08 t ha⁻¹, 47.98% superior a las plantas sometidas a déficit hídrico severo, las cuales presentaron un promedio de rendimiento de 19.29 t ha⁻¹. Por tanto, los resultados reflejan que la disponibilidad de agua en el suelo es el principal factor asociado al rendimiento.

Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua no presentó interacción entre humedad del suelo y manejo agronómico ($p = 0.2720$), por lo que en contexto de los efectos principales (Tabla 1), la humedad de suelo fue el factor que determinó la significancia sobre la eficiencia del uso del agua, por lo tanto, el manejo agronómico no presentó efecto estadístico significativo. Bajo el contexto anterior, las plantas establecidas a capacidad de campo presentaron una eficiencia promedio del uso del agua de 30.76 kg m⁻³, superior en 29.7% respecto de las plantas sometidas a déficit hídrico severo.

Sólidos solubles totales

En términos de la variable asociada a la calidad de fruto, no se presentó interacción entre los niveles de humedad de suelo y manejo agronómico ($p = 0.9300$), por lo que los efectos principales (Tabla 1), permitieron observar que la humedad de suelo fue el factor predominante sobre el contenido de sólidos solubles totales, mientras que el manejo agronómico no presentó diferencias significativas. En ese sentido, las plantas sometidas a estrés hídrico bajo un marco de riego de déficit hídrico severo presentaron un contenido promedio de sólidos solubles totales de 5.38 °Brix, 40.5% superior al registrado en las plantas establecidas a capacidad de campo.

Peso promedio de fruto

La interacción entre humedad del suelo y manejo agronómico presentó efectos significativos sobre el peso promedio de fruto ($p = 0.0240$), lo que indica que la respuesta de la variable depende de la

combinación de ambos factores (Tabla 2). La combinación de nanopartículas de cobre e injerto bajo condiciones de capacidad de campo presentó el mayor peso promedio de fruto (68.20 g), superando así en 18.18% al mismo tratamiento establecido bajo déficit hídrico severo.

Tabla 2. Interacción entre humedad del suelo y manejo agronómico sobre el peso promedio de fruto y el contenido de carotenoides en fruto de tomate.

Factor	PPF (g)	LI ($\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PPF}$)	BE ($\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PPF}$)
Testigo-CC	58.51 ^{ab}	80.46 ^{bcd}	73.88 ^{ab}
CUNP-CC	61.76 ^{ab}	127.77 ^a	85.28 ^a
Injerto-CC	48.48 ^{bc}	115.03 ^{ab}	85.9 ^a
CUNP+Injerto-CC	68.2 ^a	91.51 ^{abc}	73.12 ^{ab}
Testigo-DH	51.32 ^{abc}	108.06 ^{ab}	86.19 ^a
CUNP-DH	38.38 ^c	65.71 ^{cd}	58.18 ^{bc}
Injerto-DH	51.77 ^{abc}	60.9 ^{cd}	58.47 ^{bc}
CUNP+Injerto-DH	55.8 ^{abc}	51.52 ^d	50.97 ^c
Interacción HS×MA F(p)	3.50 (0.0240)	11.26 (<0.0001)	12.83 (<0.0001)
EE	4.19	8.60	3.76
CV%	18.93	24.07	12.91

HS: humedad del suelo; MA: manejo agronómico; CC: capacidad de campo; DH: déficit hídrico severo; PPF: peso promedio de fruto (g); LI: contenido de licopeno; BE: contenido de betacaroteno ($\mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PPF}$); : peso fresco de fruto. Letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas entre combinaciones de tratamientos, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Valores F y probabilidad asociada (p) correspondientes a la interacción HS×MA obtenidos del análisis de varianza. EE: error estándar de las medias ajustadas. CV: coeficiente de variación.

Adicionalmente, la aplicación individual de nanopartículas de cobre bajo capacidad de campo promovió un incremento del 37.86% en el peso promedio de fruto respecto al tratamiento con nanopartículas establecido bajo déficit hídrico severo. En contraste, el tratamiento con nanopartículas de cobre bajo déficit hídrico presentó el menor peso promedio de fruto (38.38 g). En conjunto, los resultados evidencian que la respuesta del peso promedio de fruto dependió de la interacción entre disponibilidad hídrica y el manejo agronómico aplicado en el cultivo de tomate.

Contenido de licopeno y betacaroteno

El contenido de licopeno presentó interacción significativa entre la humedad del suelo y manejo agronómico, lo que destaca como respuesta diferencias del pigmento en función de la combinación de factores evaluados (Tabla 2). En estos términos, la aplicación foliar de nanopartículas de cobre en plantas establecidas en condiciones de capacidad de campo promovió una concentración de licopeno mayor ($127 \mu\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ PPF}$), superando en un 94.44% al tratamiento con aplicación de nanopartículas de cobre bajo déficit hídrico severo. Por el contrario, la combinación de nanopartículas de cobre e injerto bajo déficit hídrico severo presentó la menor concentración del pigmento.

En paralelo, el contenido de betacaroteno presentó influencia de la interacción entre la humedad del suelo y el manejo agronómico ($p < 0.0001$). Las plantas injertadas, así como aquellas con aplicación foliar de nanopartículas de cobre establecidas a capacidad de campo presentaron incremento de 31.93 y 31.78%, respectivamente, comparadas con los tratamientos equivalentes bajo déficit hídrico severo. En contraste la combinación de injerto y nanopartículas de cobre en condiciones de déficit hídrico severo presentó las menores concentraciones de betacaroteno, por lo que la acumulación se relaciona estrechamente con la disponibilidad hídrica y con la interacción de los manejos agronómicos abordados en el experimento.

DISCUSIÓN

Altura de planta

El déficit hídrico severo está asociado con una menor altura de planta, al tratarse de una variable morfológica altamente sensible a la disponibilidad de agua. De acuerdo con Bakhsh *et al.* (2025), niveles de riego equivalentes al 100 y 80% presentan respuestas similares en el crecimiento del cultivo; sin embargo, restricciones más severas, cercanas al 40% del requerimiento hídrico, afectan significativamente el desarrollo vegetativo. Lo anterior coincide con los resultados obtenidos, donde el déficit hídrico severo redujo la altura de planta respecto a las condiciones de capacidad de campo. Asimismo, El-Tanbouly *et al.* (2025) reportaron que la aplicación de nanopartículas de óxido de cobre permitió incrementar en 11% la longitud del tallo en comparación con plantas sometidas a estrés hídrico. En particular, Ghannem *et al.* (2020) señalan que las fases I y II del desarrollo del cultivo constituyen periodos críticos de sensibilidad al déficit hídrico, comprendidos aproximadamente entre los 5 y 106 días después del establecimiento. En el presente estudio, la aplicación de nanopartículas de cobre contribuyó a estabilizar la variable, reflejado en la mayor altura observada entre los manejos agronómicos evaluados.

Diámetro de tallo

El diámetro de tallo es una variable frecuentemente utilizada como indicador del estado hídrico del cultivo debido a su relación con la turgencia y el crecimiento vegetativo. Ghannem *et al.* (2020) reportaron reducciones en el diámetro de tallo cuando el riego fue restringido al 50% del requerimiento hídrico durante las etapas vegetativa y de floración del tomate. Sin embargo, en el presente estudio no se detectaron diferencias significativas entre los niveles de humedad del suelo ni entre los manejos agronómicos evaluados, lo que sugiere una estabilidad de la variable bajo las condiciones experimentales. Resultados similares han sido observados en sistemas donde el diámetro de tallo mostró una menor sensibilidad que otras variables de crecimiento ante restricciones hídricas moderadas. Asimismo, Alshami *et al.* (2023) reportaron que la calidad del agua de riego influye sobre el desarrollo del tallo, alcanzando diámetros cercanos a 9.28 mm bajo condiciones óptimas. Los valores registrados en el presente estudio fueron comparables e incluso superiores en algunos tratamientos, particularmente bajo capacidad de campo, lo que indica que el crecimiento radial del tallo no fue limitado de manera importante por los factores evaluados.

Peso promedio de fruto

El peso promedio de fruto fue influenciado por la interacción entre la humedad del suelo y el manejo agronómico, donde la mayor respuesta se observó en plantas injertadas con aplicación de nanopartículas de cobre establecidas a capacidad de campo, mientras que la aplicación aislada de nanopartículas bajo déficit hídrico severo presentó los valores más bajos de la variable. Estos resultados sugieren que una adecuada disponibilidad de agua favorece la expresión de los beneficios asociados al injerto y al uso de nanopartículas sobre el desarrollo del fruto. Hernández-Echave *et al.* (2025) señalan que la efectividad del riego deficitario depende de su integración con prácticas complementarias, entre ellas el uso de injertos. Bajo este enfoque, Ma *et al.* (2026) reportan que la reducción del peso de fruto ocasionada por el estrés hídrico fue menos pronunciada en plantas injertadas, mientras que El-Mogy *et al.* (2022) documentaron incrementos en el peso promedio de fruto al emplear portainjertos tolerantes, particularmente bajo condiciones hídricas favorables. Adicionalmente, la aplicación de nanopartículas de cobre puede favorecer el desarrollo del fruto mediante mejoras en el desempeño fisiológico y nutricional de las plantas (Hernández-Echave *et al.* 2025). En conjunto, los resultados indican que la respuesta del peso promedio de fruto estuvo condicionada por la interacción entre la disponibilidad de agua y el manejo agronómico aplicado.

Rendimiento de fruto

En términos contextuales, la producción de tomate en Tamaulipas durante el ciclo otoño-invierno de 2022 fue de 2 847 t en una superficie cosechada de 95 ha, equivalente a un rendimiento promedio estatal de 29.96 t ha⁻¹ y un valor de producción superior a 28 millones de pesos (SADER 2025). Si bien estas estadísticas integran distintos sistemas de producción y condiciones de manejo, constituyen una referencia regional para contextualizar el desempeño productivo observado. En este sentido, las plantas establecidas a capacidad de campo alcanzaron un rendimiento promedio de 37.08 t ha⁻¹, superior al promedio estatal reportado para el mismo ciclo. Aunque la comparación no implica equivalencia directa entre sistemas productivos, los resultados sugieren que el manejo experimental permitió obtener rendimientos competitivos bajo condiciones controladas de disponibilidad hídrica. Sin embargo, un aspecto a considerar es la densidad de plantación de un sistema de producción. En el presente estudio la densidad fue de 25 000 plantas ha⁻¹, mientras que Bakhsh *et al.* (2025), emplearon 41 667 plantas ha⁻¹ bajo condiciones de campo y riego basado en evapotranspiración de cultivo. Bajo esa premisa, las diferencias en el rendimiento por hectárea no pueden atribuirse exclusivamente al riego, sino también a la densidad de plantación y condiciones específicas de producción, factores que influyen sobre la productividad por unidad de superficie.

Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua obtenida bajo capacidad de campo registró 30.76 kg m⁻³ la cual fue superior a la registrada bajo déficit hídrico severo, lo que confirma la importancia de una adecuada disponibilidad hídrica para maximizar la producción de fruto por unidad de agua aplicada. En términos comparativos, los valores obtenidos fueron superiores a los reportados para sistemas productivos de la Comarca Lagunera, donde la productividad del agua oscila entre 14.49 y 23.70 kg m⁻³ dependiendo de la escala de producción y las condiciones de manejo (Orona-Castillo *et al.* 2022). De manera similar, Mukherjee *et al.* (2023) reportaron valores cercanos a 14.09 kg m⁻³,

atribuyendo parte de la variabilidad observada al sistema de riego empleado y a las condiciones ambientales predominantes. En ambientes mediterráneos también se han documentado valores comprendidos entre 18.25 y 22.31 kg m⁻³ (Méndez *et al.* 2023), inferiores a los observados bajo capacidad de campo en el presente estudio. Estas diferencias probablemente están asociadas a factores como el sistema de riego, las características físicas del medio de cultivo y la capacidad de retención de agua. Mientras que Méndez *et al.* (2023) desarrollaron su estudio utilizando tezontle como sustrato, el presente experimento fue establecido en un suelo de textura franca, condición que pudo favorecer una mayor disponibilidad de agua para las plantas y contribuir a los valores de eficiencia observados.

Sólidos solubles totales

El incremento en el contenido de sólidos solubles totales estuvo asociado al déficit hídrico, atributo que se relaciona con la acumulación de azúcares solubles, principalmente fructosa y glucosa, así como con modificaciones en el metabolismo de ácidos orgánicos del fruto (Lipan *et al.* 2021). No obstante, la respuesta puede variar en función del cultivar, la intensidad del estrés y las condiciones de cultivo; por ejemplo, Medyouni *et al.* (2021) no observaron cambios significativos en la concentración de sólidos solubles como consecuencia del manejo hídrico. A pesar de ello, diversos estudios coinciden en que el riego deficitario puede favorecer la acumulación de sólidos solubles en tomate. En este sentido, Xu *et al.* (2024) reportaron incrementos significativos en el contenido de sólidos solubles totales bajo esquemas de riego deficitario controlado. Esta respuesta ha sido asociada con cambios en la expresión de genes relacionados con el metabolismo de galactosa, almidón y sacarosa, procesos que pueden ser modulados por la disponibilidad de agua durante el desarrollo del fruto (Bai *et al.* 2023). Desde una perspectiva agronómica, mayores concentraciones de sólidos solubles pueden representar una ventaja para la industria procesadora, debido a que reducen los requerimientos energéticos necesarios para alcanzar concentraciones adecuadas de pulpa y derivados de tomate (Balbuena-Mascada *et al.* 2023). Por ello, la implementación de estrategias de riego deficitario podría resultar de interés cuando la producción se destina a procesos de transformación industrial.

Contenido de licopeno y betacaroteno

Los carotenoides, entre ellos el licopeno y el betacaroteno, son compuestos sintetizados principalmente durante la maduración del fruto y su acumulación puede ser modulada por factores ambientales y de manejo, particularmente por la disponibilidad hídrica. En el presente estudio, la concentración de ambos pigmentos estuvo influenciada por la interacción entre humedad del suelo y manejo agronómico, lo que indica que su respuesta dependió de la combinación específica de factores evaluados. Aunque Mukherjee *et al.* (2023) reportan una reducción en la biodisponibilidad de carotenoides conforme aumenta la disponibilidad de agua, los resultados obtenidos mostraron una mayor estabilidad en la acumulación de licopeno bajo condiciones de capacidad de campo, especialmente cuando se combinaron con determinados manejos agronómicos.

Esta respuesta coincide parcialmente con lo descrito por Xu *et al.* (2024), quienes señalan que esquemas de riego deficitario ligero o moderado pueden favorecer la acumulación de licopeno, mientras que restricciones hídricas más severas tienden a reducir su concentración. Bajo este

contexto, el déficit hídrico severo empleado en el presente estudio podría haber limitado la biosíntesis de carotenoides debido a una mayor asignación de recursos metabólicos hacia mecanismos de adaptación al estrés. Asimismo, Jenkins *et al.* (2022) indican que la acumulación de licopeno puede variar de acuerdo con la combinación injerto-portainjerto utilizada, lo que evidencia la importancia de considerar la interacción entre genética y manejo agronómico.

Adicionalmente, la concentración de carotenoides depende en gran medida del material genético empleado. Al respecto, Da-Silva-Martins *et al.* (2024) y Xu *et al.* (2024) reportan concentraciones superiores en híbridos desarrollados específicamente para procesamiento industrial, particularmente materiales tipo Heinz, cuya selección genética favorece la acumulación de pigmentos. En consecuencia, las diferencias observadas entre estudios deben interpretarse considerando tanto las condiciones de cultivo como las características intrínsecas del híbrido evaluado.

De manera similar, el contenido de betacaroteno respondió a la interacción entre humedad del suelo y manejo agronómico. Sobre lo mismo, Coyago-Cruz *et al.* (2022) reportan que la disponibilidad hídrica constituye uno de los principales factores reguladores de este pigmento; sin embargo, los resultados obtenidos sugieren que su concentración también está condicionada por el genotipo y por la interacción con prácticas agronómicas específicas. Esta respuesta coincide con lo descrito por Coyago-Cruz *et al.* (2022), Da-Silva-Martins *et al.* (2024) y Xu *et al.* (2024), quienes destacan que la acumulación de betacaroteno depende simultáneamente del material vegetal, la estrategia de riego y las condiciones de producción.

CONCLUSIONES

La disponibilidad de agua en el suelo fue el principal factor que determinó el desempeño agronómico del cultivo de tomate, al influir sobre el crecimiento, el rendimiento, la eficiencia del uso del agua y el contenido de sólidos solubles totales. La aplicación de nanopartículas de cobre promovió una mayor altura de planta; sin embargo, el peso promedio de fruto y la concentración de carotenoides dependieron de la interacción entre la humedad del suelo y el manejo agronómico. El mantenimiento de la humedad del suelo cercana a la capacidad de campo favorece la expresión del potencial productivo y de calidad del cultivo, mientras que el uso de nanopartículas de cobre e injertos debe ajustarse al estado hídrico para maximizar sus beneficios.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca otorgada al autor de correspondencia en el programa del Doctorado en Ciencias en Sistemas Agropecuarios y Medio Ambiente de la Universidad Autónoma de Tamaulipas en la Facultad de Ingeniería y Ciencias.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Agathokleous E, Feng ZZ, Peñuelas J (2021) Chlorophyll hormesis: Are chlorophylls major components of stress biology in higher plants? *Science of the Total Environment* 726: 138637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138637>
- Alshami AK, El-Shafei A, Al-Omran AM, Alghamdi AG, Louki I, Alkhasha A (2023) Responses of tomato crop and water productivity to deficit irrigation strategies and salinity stress in greenhouse. *Agronomy* 13: 3016. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123016>
- Bai C, Zuo J, Watkins CB, Wang Q, Liang H, Zheng Y, Liu M, Ji Y (2023) Postharvest Biology and Technology Sugar accumulation and fruit quality of tomatoes under water deficit irrigation. *Postharvest Biology and Technology* 195: 112112. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112112>
- Bakhsh MS, Sarfraz M, Ilahi N, Rehman MU, Shamshad H, Usman M, Mobin I, Bibi M (2025) Effects of deficit irrigation on growth, yield, and quality of tomato under semi-arid conditions. *Biology and Life Sciences Forum* 51: 1-7. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010101>
- Balbuena-Mascada S, Lobato-Ortiz R, García-Zavala JJ, Cruz-Izquierdo S, Rodríguez-Guzmán E (2023) Comportamiento de líneas de tomate Saladette con hábito de crecimiento determinado en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 46(4): 367-374. <https://doi.org/10.35196/RFM.2023.4.367>
- Becerra-Rodríguez J, Mar VM, Acosta-Zamarripa AM (2025) Productivity of six varieties of Saladette tomato under greenhouse conditions in Ojocaliente, Zacatecas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 16: e4051. <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i30.4051>
- Bouyoucos GJ (1962) Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* 54(5): 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Chabi IB, Zannou O, Dedehou ESCA, Ayegnon BP, Odouaro OBO, Maqsood S, Galanakis CM, Kayodé APP (2024) Tomato pomace as a source of valuable functional ingredients for improving physicochemical and sensory properties and extending the shelf life of foods: A review. *Heliyon* 10: e25261. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25261>
- Coyago-Cruz E, Corell M, Moriana A, Hernanz D, Stinco CM, Mapelli-Brahm P, Meléndez-Martínez AJ (2022) Effect of regulated deficit irrigation on commercial quality parameters, carotenoids, phenolics and sugars of the black cherry tomato (*Solanum lycopersicum* L.) 'Sunchocola'. *Journal of Food Composition and Analysis* 105: 104220. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104220>
- Da-Silva-Martins JV, Pereira ED, de-Araújo NO, de Araújo FF, da-Silva TI, da-Silva DJH, de-Melo Silva S, Ribeiro WS, Dias TJ (2024) A combined soil and water management strategy to improve the nutrition and marketability of tomato variety 'Heinz 9553.' *Journal of Plant Growth Regulation* 43(2): 500-515. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11105-w>
- Egea I, Estrada Y, Faura C, Egea-Fernández JM, Bolarin MC, Flores FB (2023) Salt-tolerant alternative crops as sources of quality food to mitigate the negative impact of salinity on agricultural production. *Frontiers in Plant Science* 14: 1092885. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1092885>
- El-Mogy MM, Atia MAM, Dhawi F, Fouad AS, Bendary ESA, Khojah E, Samra BN, Abdelgawad KF, Ibrahim MFM, Abdeldaym EA (2022) Towards better Grafting: SCoT and CDDP analyses for prediction of the tomato rootstocks performance under drought stress. *Agronomy* 12(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy12010153>

- El-Tanbouly R, Gaber MA, Omran S, Ahmed NY, Ali AN, Saleh AH, Elgamal AMR, Khafaji N, EL-Messeiry S (2025) *Moringa oleifera* green-synthesized copper oxide nanoparticles for the drought tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum*). BMC Plant Biology 25: 685. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06708-2>
- Ghannem A, Ben Aissa I, Majdoub R (2020) Effects of regulated deficit irrigation applied at different growth stages of greenhouse grown tomato on substrate moisture, yield, fruit quality, and physiological traits. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10407-w>
- Hernández-Echave DG, Casillas-Moreno G, Romo-Galindo AI, Gutiérrez-Gómez TA, Velázquez-Juárez G, Rodríguez-Ortega MA, Muñoz-García RO, Lomeli-Rosales DA (2025) Advances in the application of nanocomposite hydrogels in crops. Gels 11(12): 957. <https://doi.org/10.3390/gels11120957>
- Jenkins T, Cowan J, Rivard CL, Pliakoni ED (2022) Effect of rootstock on 'Tasti-Lee' tomato yield and fruit quality in a high tunnel production system. HortScience 57(10): 1235-1241. <https://doi.org/10.21273/hortsci16634-22>
- Kausar H, Mehmood A, Khan RT, Ahmad KS, Hussain S, Nawaz F, Iqbal MS, Nasir M, Ullah TS (2022) Green synthesis and characterization of copper nanoparticles for investigating their effect on germination and growth of wheat. PLoS One 17(6): e0269987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269987>
- Landa P (2021) Positive effects of metallic nanoparticles on plants: Overview of involved mechanisms. Plant Physiology and Biochemistry 161: 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.039>
- Lipan L, Issa-Issa H, Moriana A, Zurita M, Galindo A, Corell M (2021) Scheduling regulated deficit irrigation with leaf water potential of cherry tomato in greenhouse and its effect on fruit quality. Agriculture 11(669): 1-22. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070669>
- Ma L, Wang H, Bin Z, Guo Y, Ou S, Tian Y, Guo M (2026) Integrated strategies for enhanced drought tolerance in tomato: from molecular mechanisms to field applications. Horticulture Research 13(6): 1-71. <https://doi.org/10.1093/hr/uhag227>
- Maureira F, Rajagopalan K, Stöckle CO (2022) Evaluating tomato production in open-field and high-tech greenhouse systems. Journal of Cleaner Production 337: 130459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130459>
- Medyouni I, Zouaoui R, Rubio E, Serino S, Ben H, Nadia A (2021) Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. Food Science & Nutrition 9(5): 1-12. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2160>
- Meléndez-Martínez AJ, Böhm V, Andersen Borge GI, Cano MP, Fikselová M, Gruskiene R, Lavelli V, Loizzo MR, Mandić AI, Mapelli-Brahm P, Mišan AC, Pinteá AM, Sereikaitė J, Vargas-Murga L, Vlaisavljević SS, Vulić JJ, O'Brien NM (2021) Carotenoids: Considerations for their use in functional foods, nutraceuticals, nutricosmetics, supplements, botanicals, and novel foods in the context of sustainability, circular economy, and climate change. Annual Review of Food Science and Technology 12: 433–460. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-062220-013218>
- Méndez HA, Pertierra Lazo RE, Balmaseda Espinosa C (2023) Eficiencia del agua en tomate cultivado en sustrato inerte. Revista Científica y Tecnológica UPSE 10(2): 23-34. <https://doi.org/10.26423/rctu.v10i2.753>
- Mukherjee S, Dash PK, Das D, Das S (2023) Growth, yield and water productivity of tomato as influenced by deficit irrigation water management. Environmental Processes 10(1). <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00624-z>
- Nagata M, Yamashita I (1992) Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology 39(10): 925-928. <https://doi.org/10.3136/nskkk1962.39.925>
- Orona-Castillo IOC, Del-Toro-Sánchez CL, Fortis-Hernández M, Preciado-Rangel P, Espinoza-Arellano J de J, Rueda-Puente EO, Flores-Vázquez FV, Cano-Ríos P (2022) Indicadores técnico-económicos de la

- producción del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México. *Biotechnia* 24(3): 70-76. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v24i3.1721>
- Peralta-Manjarrez RM, Fuente MCD La, Benavides-Mendoza A, Campos-Montiel RG, Ortega-Ortíz H, Hernández-Fuentes AD (2023) Effects of copper nanoparticles on the organoleptic, physicochemical and nutraceutical properties of grafted tomato fruit. *Pakistan Journal of Botany* 55(5): 1707-1713. [https://doi.org/10.30848/PJB2023-5\(27\)](https://doi.org/10.30848/PJB2023-5(27))
- Reshma A, Sadarunnisa S, Syamsundar RP, Tanuja PB, Naga MKV, Padmaja VV (2024) Effect of grafting on growth, yield, quality and nutrient uptake in tomato. *International Journal of Advanced Biochemistry Research* 8(10): 361-367. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i10e.2519>
- SADER (2025) Panorama del Sector Agrícola. <https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/tableros/SIAS/EstadisticaTransversal/PA/index.html>. Fecha de consulta: 10 de mayo de 2026.
- Saffan MM, Koriem MA, El-Henawy A, El-Mahdy S, El-Ramady H, Elbehiry F, Omara A E-D, Bayouni Y, Badgar K, Prokisch J (2022) Sustainable production of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) under low-quality irrigation water as affected by bio-nanofertilizers of Selenium and Copper. *Sustainability* 14(6): 3236. <https://doi.org/10.3390/su14063236>
- Saritha GNG, Anju T, Kumar A (2022) Nanotechnology - Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture? *Journal of Agriculture and Food Research* 10: 100457. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100457>
- Simkin AJ, Kapoor L, Doss CGP, Hofmann TA, Lawson T, Ramamoorthy S (2022) The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynthesis Research* 152(1): 23-42. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00892-6>
- Singh D, Jain D, Rajpurohit D, Jat G, Kushwaha HS, Singh A, Mohanty SR, Al-Sadoon MK, Zaman W, Upadhyay SK (2023) Bacteria assisted green synthesis of copper oxide nanoparticles and their potential applications as antimicrobial agents and plant growth stimulants. *Frontiers in Chemistry* 11: 1-10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1154128>
- Steiner AA (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of certain desired composition. *Plant and Soil* 15(2): 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Tamayo-Ruiz LE, Neri-Ramírez E, Cabrera-de La Fuente M, Rocandio-Rodríguez M, Moreno-Ramírez YR, Delgado-Martínez R (2025) Synergistic potential of grafting and copper nanoparticles in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) hybrids with deficit irrigation. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 28(32): 1-20. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5882>
- Ullah F, Ullah H, Ishfaq M, Gul SL, Kumar T, Li Z (2023) Improvement of nutritional quality of tomato fruit with *Funneliformis mosseae* inoculation under greenhouse conditions. *Horticulturae* 9(4): 1-12. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040448>
- Van Nguyen D, Nguyen HM, Le NT, Nguyen KH, Nguyen HT, Le HM, Nguyen AT, Dinh NTT, Hoang SA, Ha CV (2022) Copper nanoparticle application enhances plant growth and grain yield in maize under drought stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation* 41(1): 364-375. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10301-w>
- Wang C, Liu X, Li J, Yue L, Yang H, Zou H, Wang Z, Xing B (2021) Copper nanoclusters promote tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield and quality through improving photosynthesis and roots growth. *Environmental Pollution* 289: 117912. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117912>
- Xu J, Li X, Wan W, Zhu X, Li C, Zhao X, Zhao Y, Pang S, Diao M (2024) Impact of regulated deficit irrigation on the dynamics of quality changes in processing tomato fruits during ripening. *Agricultural Water Management* 304: 109068. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109068>