

Uso de Digestato y Fertilización Mineral en Rendimiento, Concentración de Carotenos, Compuestos Fenólicos y Ácidos Orgánicos en dos Variedades de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

Use of Digestate and Mineral Fertilization on Yield, Carotenes, Phenolic Compounds and Organic Acids Concentration in Two Varieties of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.)

Angélica Romero-Rodríguez¹ , M. Myrna Solís-Oba^{1*} , Rubria Marlen Martínez-Casares² ,
María Elena Santos Cervantes³ , Aida Solis-Oba² y Rigoberto Castro-Rivera¹

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex Hacienda de San Juan Molino km 1.5, Col. Tepetitla. 90700 Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México; (A.R.R.), (M.M.S.O.), (R.C.R).

* Autora para correspondencia: myrnasolis_ipn@yahoo.com

² Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Calzada del Hueso No. 1100, Col. Villa Quietud. 04960, Coyoacán, CDMX, México; (R.M.M.C.), (A.S.O.).

³ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Sinaloa. Boulevard Juan de Dios Bátiz Paredes No. 250, Col. San Joaquín. 81101 Guasave, Sinaloa, México; (M.E.S.C.).

RESUMEN

El tomate es una de las hortalizas más consumidas a nivel mundial, conocida por su contenido de compuestos fenólicos, carotenoides y ácidos orgánicos con beneficios para la salud. Aunque es común el uso de fertilizantes minerales en su cultivo, los excesos ocasionan problemas ambientales. En este estudio se evaluó el efecto de la fertilización orgánico-mineral en el rendimiento y la concentración de compuestos fenólicos y ácidos orgánicos en los frutos de dos variedades de tomate tipo saladette cultivadas en invernadero. Se diseñó un experimento con fertilización mixta utilizando fertilizante mineral (M) y digestato (D) proveniente de la digestión anaeróbica de estiércoles. Se aplicaron las siguientes proporciones: 25% D + 75% M (D25M75), 50% D + 50% M (D50M50), 75% D + 25% M (D75M25), además de tratamientos con 100% digestato (D100), 100% mineral (M100) y un testigo sin fertilización (T). Los resultados mostraron que es posible reducir en un 25% los requerimientos de fertilizante mineral mediante fertilización mixta con digestato. La combinación D25M75 generó mayores rendimientos de fruto de tomate que el tratamiento con solo fertilizante mineral. La aplicación de digestato en las diferentes concentraciones incrementó la cantidad de sólidos solubles y el índice de sabor del fruto respecto a los tratamientos sin digestato; asimismo, todos los tratamientos con digestato incrementaron las concentraciones de ácido gálico y ácido cafeico en los frutos, entre un 51.7 a 86.4% y entre un 34 al 54.2% respectivamente, en comparación con la fertilización mineral. Además, el efecto de la fertilización fue diferente según la variedad, el mayor contenido de carotenos en los frutos de la variedad Strongton fue en los fertilizados con D100; mientras que para la variedad King fue en los del tratamiento D25M75. Finalmente, los resultados sugieren que los digestatos subproducto de la digestión anaeróbica constituyen una alternativa eficiente para reducir el uso de fertilizantes minerales en cultivos de tomate, incrementando el rendimiento y las concentraciones de compuestos fenólicos y ácidos orgánicos, contribuyendo a prácticas agrícolas más sostenibles.

Palabras clave: antioxidantes, calidad nutracéutica, órgano-mineral, pigmentos vegetales, producción hortícola.

SUMMARY

Tomato is one of the most widely consumed horticultural crops worldwide and is recognized for its content of phenolic compounds, carotenoids, and organic acids that provide health benefits. Although mineral fertilizers are commonly used in tomato cultivation, their excessive application can lead to environmental problems.



Cita recomendada:

Romero-Rodríguez, A., Solís-Oba, M. M., Martínez-Casares, R. M., Santos-Cervantes, M. E., Solís-Oba, A., & Castro-Rivera, R. (2026). Uso de Digestato y Fertilización Mineral en Rendimiento, Concentración de Carotenos, Compuestos Fenólicos y Ácidos Orgánicos en dos Variedades de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Terra Latinoamericana*, 44, 1-13. e2461. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2461>

Recibido: 20 de noviembre de 2025.

Aceptado: 27 de enero de 2025.

Artículo. Volumen 44.

Mayo de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Esteban Sánchez-Chávez

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez

Dr. José Gregorio Joya Dávila



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

In this study, the effect of organic-mineral fertilization on yield and on the concentration of phenolic compounds and organic acids in the fruits of two saladette-type tomato varieties grown under greenhouse conditions was evaluated. An experiment was established using mixed fertilization with mineral fertilizer (M) and digestate (D) derived from the anaerobic digestion of manure. The following proportions were applied: 25% D + 75% M (D25M75), 50% D + 50% M (D50M50), and 75% D + 25% M (D75M25), in addition to treatments with 100% digestate (D100), 100% mineral fertilizer (M100), and an unfertilized control (T). The results showed that mineral fertilizer requirements can be reduced by 25% through mixed fertilization with digestate, since the D25M75 combination produced higher tomato yields than the treatment with mineral fertilizer alone. The application of digestate at different proportions increased total soluble solids and the fruit flavor index compared with treatments without digestate. Likewise, all digestate-based treatments increased the concentrations of gallic acid and caffeic acid in the fruits by 51.7–86.4% and 34.0–54.2%, respectively, compared with mineral fertilization. Furthermore, the effect of fertilization differed between varieties: in the Strongton variety, the highest fruit carotene content was obtained with D100, whereas in the King variety, the highest carotene content was observed with treatment D25M75. Finally, the results suggest that digestates a byproduct of the anaerobic digestion represent an efficient alternative for reducing the use of mineral fertilizers in tomato cultivation while increasing yield and the nutritional content of antioxidants and organic acids, thereby contributing to more sustainable agricultural practices.

Index words: *antioxidants, nutraceutical quality, organo-mineral, plant pigments, horticultural production.*

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas más cultivadas y consumidas a nivel mundial, se consume en diversas presentaciones, como puré, pasta, ketchup, jugo, en preparaciones frescas y deshidratadas (Saha, Kabir, Mondal y Mannan, 2019). Es valorado por sus cualidades sensoriales y contenido de compuestos que contribuyen a la promoción de la salud; contiene carotenoides, vitaminas A, C y E, luteína, rutina, naringina y una variedad de ácidos orgánicos y compuestos fenólicos como ascórbico, cítrico, málico, cafeico, ferúlico y clorogénico (Uchenna y Abiodun, 2024). Los ácidos málico, cítrico y oxálico, así como los azúcares solubles, aminoácidos, pigmentos y más de 400 compuestos adicionales, contribuyen al sabor, aroma y características organolépticas del tomate (Anton *et al.*, 2014).

El tomate es reconocido por su alto contenido de antioxidantes, el consumo de estos compuestos desempeñan un papel fundamental en la neutralización de radicales libres y ejercen efectos farmacológicos, incluyendo actividades antiinflamatorias, antidiabéticas, antitrombóticas, antimicrobianas, neuroprotectoras y cardioprotectoras; además, contribuyen a la protección contra diversos tipos de cáncer, como los de boca, faringe, esófago, estómago e intestino grueso (Imran *et al.*, 2020; Na *et al.*, 2025).

El licopeno es un caroteno considerado el antioxidante más abundante e importante en el fruto del tomate; puede eliminar el radical oxígeno en una capacidad dos y hasta diez veces mayor que el β -caroteno y el α -tocoferol, respectivamente. Además de proteger contra diversas enfermedades, es un agente neuroprotector natural y responsable del color rojo característico del tomate (Bilalis *et al.*, 2018; Imran *et al.*, 2020). Los carotenos son pigmentos naturales de tonalidades amarillas, anaranjadas y rojas, esenciales para la fotosíntesis y la fotoprotección, y constituyen precursores de la síntesis de ácido abscísico y estrigolactonas. En seres humanos, cumplen funciones fisiológicas relacionadas con la visión, el crecimiento, la diferenciación celular y la respuesta inmunitaria (Imran *et al.*, 2020). Dado que los humanos no pueden sintetizar licopeno ni otros carotenos, su obtención depende de fuentes dietéticas como las hortalizas.

El tomate también es rico en compuestos fenólicos, los cuales desempeñan funciones en la interacción de la planta con su entorno biológico y son importantes para la salud humana debido a su actividad antioxidante con potencial anticancerígeno. Los compuestos fenólicos incluyen dos grupos: flavonoides y no flavonoides (Khadem y Marles, 2010). El grupo de los flavonoides comprende flavanonas, flavonas, dihidroflavonoles, flavonoles, flavan-3-oles, isoflavonas, antocianidinas, proantocianidinas y chalconas (Cartaya y Reynaldo, 2001).

Esta composición del tomate depende de múltiples factores, como la fertilización, la variedad, el clima, las prácticas agrícolas y el estado de madurez. En el caso de la fertilización, se ha reportado que en el desarrollo temprano del fruto (que inicia cuando se agregan los macro y micronutrientes al suelo), hay una acumulación importante de azúcares y ácidos orgánicos (Quinet *et al.*, 2019). Posteriormente, durante el proceso de maduración en el fruto ocurren diversos cambios bioquímicos: se degrada la clorofila y aumentan los carotenos como el licopeno; además, se modifica la concentración y el tipo de azúcares, predominando la glucosa en frutos inmaduros y la fructosa en frutos maduros (Anton *et al.*, 2014). En frutos inmaduros y maduros, el ácido cítrico es el ácido orgánico predominante y su concentración disminuye durante la maduración; el ácido málico se encuentra en mayores concentraciones en los tomates inmaduros. Estos cambios transforman el característico sabor ácido del fruto inmaduro, en un sabor más dulce en el fruto maduro (Andelini *et al.*, 2023).

La fertilización es una actividad indispensable para alcanzar altos rendimientos, ya que aporta nutrientes clave como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). No obstante, la aplicación excesiva y prolongada de fertilizantes minerales se ha asociado con la degradación y contaminación del suelo, la eutrofización de cuerpos de agua superficiales y la contaminación del agua subterránea; además, está asociada a una mayor presencia de plagas, a la pérdida de biodiversidad y a los riesgos para la salud de productores y consumidores (Krasilnikov, Taboada y Amanullah, 2022). Para contrarrestar estos efectos negativos sin comprometer el rendimiento ni la calidad del fruto, se han promovido estrategias de manejo integrado de nutrientes mediante fertilizantes orgánicos-minerales (Olasekan *et al.*, 2022; Ye *et al.*, 2020).

El digestato es un fertilizante orgánico subproducto de la digestión anaerobia de estiércoles, que ha cobrado relevancia como enmienda orgánica para la fertilización de distintos cultivos. Es rico en nutrientes y promotores de crecimiento que favorecen el crecimiento vegetal, al tiempo que reduce la dependencia de fertilizantes químicos (Aguilar-Benítez *et al.*, 2023). Cuando se combina con fertilizantes minerales, el digestato es una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad en los sistemas de producción agrícolas. Estudios recientes muestran que la combinación de fertilización orgánica y mineral no solo mantiene o incrementa los rendimientos, sino que también el fruto aumenta la acumulación de compuestos benéficos para la salud de quien lo consume (Li *et al.*, 2023; Zhang, Duan, Tan y Zhang, 2016; Zhang *et al.*, 2024).

El objetivo de este estudio fue evaluar, en dos variedades comerciales de tomate cultivadas en invernadero, el efecto de diferentes combinaciones de fertilización mineral y digestato sobre el rendimiento, la calidad del fruto y la concentración de carotenos, compuestos fenólicos y ácidos orgánicos. Buscando proponer una combinación de fertilización orgánico-mineral que permita disminuir el uso de fertilizantes minerales sin comprometer el rendimiento y calidad del fruto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizaron plantas de tomate saladette de dos variedades Strongton F1, en el ciclo de cultivo del 2023 y King F1 en el ciclo del 2024, ambas de crecimiento indeterminado, proporcionadas por productores de Puebla, México.

El digestato empleado como fertilizante orgánico fue obtenido del digestor de la Universidad Autónoma de Chapingo, México. El digestor de la Universidad es una laguna con cubierta plástica, donde se colectan los estiércoles de los establos de la escuela, principalmente de ganado bovino y porcino. El digestato es la fracción líquida, este se filtró para su uso posterior.

El suelo empleado para el cultivo tuvo un pH de 6.6, conductividad de 3.1 mmhos cm^{-1} y contenido de N, P y K de 100 mg kg^{-1} , 38.45 g kg^{-1} y 1.8 Cmol kg^{-1} , respectivamente. El digestato tuvo un pH de 8.7, conductividad de 3.55 mS y contenido de N, P y K de 480, 195.8 y 480 mg L^{-1} , respectivamente.

El fertilizante mineral fue una solución nutritiva compuesta por: 900 mg L^{-1} de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 300 mg L^{-1} de KNO_3 , 260 mg L^{-1} de K_2SO_4 , 490 mg L^{-1} de MgSO_4 y 135 g mg L^{-1} de KH_2PO_4 . Esta formulación es la recomendada por los productores de tomate en invernadero de la región Tlaxcala-Puebla, México.

Sitio Experimental

El estudio se realizó en el Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional (CIBA), ubicado en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México. A 19° 15' de latitud N y entre 98° 21' y 98° 25' O, con una altitud de 2220 m.

Cultivo de Tomate

Se llevaron a cabo dos ciclos experimentales durante primavera-verano del 2023 y 2024, con una duración total de 180 días cada uno. Se adquirieron plántulas de tomate con productores locales de Tlaxcala, a los 30 días después de la germinación se trasplantaron a las unidades experimentales, estas fueron macetas con 15 kg de suelo, colectado de parcelas aledañas al CIBA. Las plántulas, con características similares de tamaño y número de hojas se trasplantaron una por cada maceta. Estas se distribuyeron en un invernadero de plástico tipo cenital. La distribución se hizo mediante un diseño completamente al azar, con una densidad de 4 macetas m⁻². Para cada tratamiento se usaron 4 plantas, teniendo un total de 24 plantas de tomate por ciclo de cultivo. Las plantas se regaron con agua corriente dos veces por semana, cuando alcanzaron una altura de 30 cm de altura se tutoraron; semanalmente se eliminó con cuidado la hierba. La fertilización inició a los 10 días después del trasplante y se aplicó cada cinco días directamente al suelo en cada una de las macetas, debido a que ambos fertilizantes son líquidos; el volumen total aplicado para cada tratamiento se indica en la Cuadro 1. Los tratamientos fertilizados fueron cinco y un testigo sin fertilizar: Tratamiento D25M75, se utilizó 25% digestato y 75% de la solución mineral; tratamiento D50M50, la fertilización se hizo con 50% de digestato y 50% de la solución mineral; D75M25, se aplicó 75% de digestato y 25% de solución mineral. D100, la fertilización fue con 100% digestato y M100, se aplicó el 100% de la solución mineral. La cantidad total de digestato y de solución mineral aplicada, así como la aportación de nutrientes NPK total por cada tratamiento se muestra en la Cuadro 1.

Calidad y Composición del Tomate

A los 180 días de cultivo, se seleccionaron al azar 24 frutos de cada tratamiento que mostraron un color rojo uniforme. Los frutos fueron homogenizados en una licuadora (Oster 600W) hasta obtener un puré, el cual se empleó para las determinaciones analíticas siguientes. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

Sólidos solubles (SST). Para la medición de sólidos solubles totales, se colocaron unas gotas del puré en un refractómetro digital de amplio rango Atago 3810 PAL-1 (ATAGO, Japón), los resultados se expresaron en °Brix (Paul, Singh y Pandey, 2010).

Acidez titulable (AT). Para la medición de acidez titulable, se mezclaron 10 mL del puré de tomate con 50 mL de agua destilada y la solución resultante se tituló con NaOH 0.1 N, empleando como indicador azul de bromotimol al 0.04% (2.5 mL). La acidez titulable se expresó como porcentaje de ácido cítrico, siguiendo la metodología descrita por Pérez-Espinoza, Chávez, Carrillo, Rodríguez y Ascencio (2017), empleando la ecuación 1.

$$\% \text{ ácido cítrico} = 0.064 \times \text{normalidad de NaOH} \times (\text{volumen mL /muestra (g)} \times 100) \quad (1)$$

Índice de sabor. El índice de sabor se calculó a partir de los resultados de acidez titulable (AT) y sólidos solubles (SST), a partir de la ecuación 2 (Hernández, Rodríguez y Díaz, 2008).

$$\text{Índice de sabor} = \text{AT} + \text{SST} / 20 \times \text{AT} \quad (2)$$

Cuadro 1. Cantidad total de fertilizantes y macronutrientes adicionados para cada tratamiento.
Table 1. Total quantities of fertilizers and nutrients added for treatment.

Tratamiento	Digestato	Solución mineral	Cantidad de N	Cantidad de P	Cantidad de K
	----- L planta ⁻¹ -----		----- g planta ⁻¹ -----		
D25M75	0.53	1.5	19.41	8.56	37.91
D50M50	1.1	1	21.18	9.97	38.24
D75M25	1.6	0.5	21.42	10.01	37.98
D100	2.1	-	21.02	9.84	38.42
M100	-	2	21.60	9.72	38.35
Testigo	-	-	-	-	-

Licopeno y β -caroteno. Para la medición de licopeno y β -caroteno, se disolvió 1 mg del puré de tomate en 1 mL de agua destilada y se agitó a 30 °C durante 1 h. Posteriormente, se agregaron 8 mL de la mezcla de hexano:etanol:acetona 2:1:1 (v/v/v), agitando en vortex y dejando reposar 10 min. Posteriormente, se añadió 1 mL de agua destilada, se agitó en vortex y se dejó reposar durante 10 min para facilitar la separación de fases. La fase orgánica fue separada cuidadosamente y se midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis (Thermo scientific Genesys 10S, Madison, USA) a 451 y 503 nm para β -caroteno y licopeno, respectivamente. La cuantificación se hizo de acuerdo con Suwanaruang (2016), empleando las ecuaciones 3 y 4.

$$\text{Licopeno (mg kg}^{-1}\text{)} = (\text{Abs}_{503\text{nm}}) / 172\,000 \times 0.55V \times 537 / \text{peso de la muestra (mg)} \times 106 \quad (3)$$

$$\beta\text{-caroteno (mg kg}^{-1}\text{)} = (\text{Abs}_{451\text{nm}}) / 139\,000 \times 0.55V \times 537 / \text{peso de la muestra (mg)} \times 106 \quad (4)$$

Donde 172 000 o 139 000 $\text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ es el coeficiente de extinción de licopeno o β -caroteno, respectivamente.

Compuestos fenólicos. Para el análisis de compuestos fenólicos se obtuvieron extractos hidrofílicos. A 250 mg de puré de tomate liofilizado se le adicionaron 5 mL de metanol grado HPLC y se dejó en agitación magnética 2 h (Corning stirrer/hot plate, 480 C, Corning Incorporated, EUA). Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas (Centrífuga Ependorf 5810R, Alemania) durante 5 min a 3500 rpm y 5 °C. El sobrenadante recuperado se evaporó en un rotavapor (BUCHI R-210, Suiza) a 48 °C por 1 h. El extracto final se resuspendió con ácido acético 0.05% (fase móvil) y se sonicó (Cole-parmer, EUA) a 400 kHz durante 10 min y se filtraron mediante un filtro de nylon de 0.22 μm y se colocó en viales para su análisis por HPLC (Gómez-Romero, Segura-Carretero y Fernández-Gutiérrez, 2010).

El análisis se realizó en un sistema HPLC de fase reversa con detector DAD y una columna Luna C18 (5 μm , 120 Å, 150 \times 3 mm) a 25 °C. La fase móvil consistió en: Componente A=ácido acético al 0.05% y componente B=metanol, con un gradiente de elución de 0-5 min 95 %A-5% B, flujo de 0.5 mL min^{-1} ; 10-12 min 85% A-15% B, flujo 0.4 mL min^{-1} ; 37 min 70 %A -30% B, flujo 0.4 mL min^{-1} ; 57 min 55% A -45% B, flujo 0.6 mL min^{-1} ; 67 min 45% A -55% B, flujo 0.6 mL min^{-1} ; 69-70 min 95% A -5% B, flujo 0.5 mL min^{-1} . Se inyectaron volúmenes de muestra de 5 μL . La detección se leyó a distintas longitudes de onda específicas para cada compuesto: 260 nm (ácido gálico, ácido 3,4 dihidroxibenzoico, 4-hidroxibenzoico), 280 nm (naringina), 320 nm (ácido cafeico, p-cumárico y ácido ferúlico) y 354 nm (hesperidina). Para cuantificación, se construyeron curvas de calibración mediante estándares con concentraciones conocidas correspondientes a cada compuesto analizado (Zeb, 2015).

Ácidos orgánicos. La extracción del ácido ascórbico se realizó a partir de 125 mg de puré de tomate liofilizado, al cual se le añadieron 2 mL de NaH_2PO_4 20 mM a pH 2.5. La muestra se agitó mediante vortex durante 1 min y posteriormente se sometió a ultrasonificación (Cole-parmer, EUA) durante 20 min a 35 °C. A continuación, se centrifugó (centrífuga Ependorf 5810R, Alemania) durante 10 min a 4000 rpm y 5 °C. El sobrenadante fue recuperado y el proceso se repitió dos veces. Los extractos acuosos obtenidos se mezclaron y ajustaron a pH 4, y se filtraron mediante un filtro de nylon de 0.22 μm y se colocó en viales para su análisis por HPLC (Marconi, Floridi y Montanari, 2007).

La extracción y purificación de los ácidos oxálico, málico y cítrico se llevó a cabo a partir de dos extracciones independientes utilizando 125 mg de puré de tomate liofilizado y 2 mL de agua grado HPLC (Cada muestra se pasó por vortex durante 1 min y posteriormente fue sometida a ultrasonificación (Cole-parmer, USA) durante 20 min a 35 °C. A continuación, las muestras se centrifugaron (Ependorf centrifuge 5810R, Germany) durante 10 min a 4000 rpm y a 5 °C. El sobrenadante obtenido se recuperó y se ajustó a pH 10 con NaOH 1M y se pasó por un cartucho SPE SAX (AccuBond Agilent Technologies, USA), previamente activado con 2 mL de MeOH y 2 mL de agua HPLC. Posteriormente, se realizó un lavado con 1.5 mL de agua a pH 8 y la elución fue con 1.5 mL de NaH_2PO_4 20 mM a pH 1.9. La elución obtenida se ajustó el pH a 4 previo a su análisis por HPLC (Marconi *et al.*, 2007).

La cuantificación de los ácidos orgánicos se realizó en un sistema HPLC de fase reversa con detector DAD y una columna Zorbax SB-Aq 4.6 \times 150 mm a 35 °C. La fase móvil consistió en: Componente A = 20 mM NaH_2PO_4 a pH 2 y componente B= acetonitrilo, con un gradiente de elución: 0-14 min 100 %A -0% B, flujo 0.5 mL min^{-1} ; 15-22 min 90 %A -10% B, flujo 1 mL min^{-1} ; 23-27 min 100 %A -0% B, flujo 0.8-0.5 mL min^{-1} . Se inyectaron 5 μL , y se leyó a las distintas longitudes de onda: 210 nm (oxálico, málico y cítrico) y 240 nm (ascórbico). Para cuantificación, se construyeron curvas de calibración mediante estándares con concentraciones conocidas correspondientes a cada compuesto analizado (Nour, Trandafir e Ionica, 2010).

Rendimiento y Tamaño de Frutos

Conforme los frutos llegaron a la madurez, indicada por un color rojo uniforme, se cosecharon y se pasaron en una balanza Electronic Balance (VELAB, Balances, USA). El rendimiento se obtuvo como la suma de todos los frutos cosechados por tratamiento. Se seleccionaron 24 frutos al azar de cada tratamiento, posteriormente con ayuda de un vernier digital (Electronic Digital Caliper, Resolution 0.1mm) se les midió el diámetro polar y el diámetro ecuatorial (Jiang, Zhao, Tong, Wang y Zhao, 2019).

Análisis Estadísticos

El diseño de experimentos fue completamente al azar y el análisis estadístico se realizó en el programa Origin 2021 (OriginLab Corporation, 2021). Se evaluó el efecto de los tratamientos mediante un análisis de varianza (ANOVA de un factor) y un análisis *post hoc* para la comparación de medias con Tukey. La significancia estadística se consideró en $p < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad y Composición del Tomate

Las principales características de calidad del fruto de tomate, como los sólidos solubles, la acidez y el índice de sabor, se ven influenciadas por factores como el genotipo, el estado de madurez, la fertilización, las variaciones estacionales, la disponibilidad de agua y el manejo agronómico (Coyago-Cruz *et al.*, 2019; Tigist, Workneh y Woldetsadik, 2013). Ambas variedades de tomate, King y Strongton, mostraron respuestas similares a los tratamientos de fertilización (Cuadro 2), con excepción de los sólidos solubles, los cuales fueron consistentemente superiores en la variedad Strongton F1. El aumento en la proporción de digestato resultó en mayores cantidades de sólidos solubles en ambas variedades. En Strongton, los tratamientos con 75% y 100% de digestato alcanzaron los valores más altos de sólidos solubles, superando al fertilizante mineral en un 18% y 25%, respectivamente. Estos tratamientos también excedieron al testigo en un 23% y 30%. El resto de los tratamientos con digestato no presentó diferencias significativas respecto al fertilizante mineral. En King, el tratamiento con 75% de digestato produjo las mayores cantidades de sólidos solubles, aproximadamente 20% superior al fertilizante mineral y 12% mayor que el testigo.

No se observaron diferencias estadísticamente significativas en la acidez titulable entre los tratamientos en ninguna de las dos variedades, excepto entre el tratamiento D100 y Testigo de Strongton. Factores como el contenido de ácidos orgánicos, el metabolismo y el estado de madurez del fruto influyeron en mayor medida en la variabilidad de la acidez (Rajapaksha *et al.*, 2024). El sabor está determinado por la cantidad de sólidos solubles totales y la cantidad de ácidos orgánicos; además, la relación entre estos componentes constituye un índice que refleja la percepción del sabor. En este estudio, se observó que, con todas las fertilizaciones orgánico-mineral en ambos ciclos de cultivo, el índice de sabor fue mayor al obtenido con el tratamiento M100. Esto sugiere que el

Cuadro 2. Efecto del tipo de fertilización en la calidad de tomate saladette variedad Strongton y variedad King.
Table 2. Fertilization effect on quality of fruits from the saladette tomato varieties Strongton and King.

Tratamiento	Variedad Strongton			Variedad King		
	Sólidos solubles ° Brix	Acidez titulable % ácido cítrico	Índice de sabor	Sólidos solubles ° Brix	Acidez titulable % ácido cítrico	Índice de sabor
D25M75	5.37 ± 0.24 abc	0.292 ± 0.014 ab	1.21	4.25 ± 0.09 b	0.296 ± 0.024 a	1.01
D50M50	5.13 ± 0.29 bcd	0.305 ± 0.005 ab	1.14	4.28 ± 0.12 b	0.313 ± 0.035 a	0.99
D75M25	5.70 ± 0.27 ab	0.296 ± 0.012 ab	1.25	4.81 ± 0.15 a	0.348 ± 0.034 a	1.03
D100	6.23 ± 0.24 a	0.339 ± 0.003 a	1.25	4.29 ± 0.14 b	0.312 ± 0.018 a	1
M100	4.66 ± 0.18 cd	0.302 ± 0.009 ab	1.07	3.8 ± 0.06 b	0.304 ± 0.019 a	0.93
Testigo	4.35 ± 0.13 d	0.256 ± 0.01 b	1.10	4.22 ± 0.1 b	0.296 ± 0.009 a	1

Se muestra el promedio ($n = 3$) y el error estándar, letras diferentes en columnas indican diferencias significativas en la prueba Tukey $p \leq 0.05$. The mean ($n = 3$) and standard error are shown; different letters within columns indicate significant differences according to Tukey's test $p \leq 0.05$.

uso de fertilizantes orgánicos contribuye a mejorar el sabor del fruto de tomate con respecto a los fertilizantes minerales (Rajapaksha *et al.*, 2024). Resultados similares se obtuvieron con la fertilización integrada por fertilizante químicos y gallinaza (50:50), la cual incrementó los valores de sólidos solubles, el contenido de azúcar y la acidez total en los frutos (Loan, Hung, Thiem y Thu, 2024). En un estudio de cultivo de tomate fertilizado con 2, 5 y 8% de extracto de sargazo se encontró que la fertilización con 8% del extracto sí incrementó el contenido de sólidos solubles y el índice de sabor y no hubo diferencias significativas en la acidez titulable con ningún tratamiento, comparado con la fertilización mineral (Romero-Rodríguez *et al.*, 2022). Terry-Alfonso, Ruiz y Carrillo (2018), encontraron que el contenido de sólidos solubles, nitratos, vitamina y materia seca del tomate cosechado con 50% fertilización mineral mas micorrizas y bioestimulantes fueron iguales con 100% fertilización mineral. Yang, Mattoo, Liu, Zvomuya y He (2023), hicieron un análisis de 313 estudios publicados donde se evaluó la fertilización orgánica e inorgánica-mineral, y concluyeron que los fertilizantes orgánicos incrementan significativamente la calidad del tomate comparado con la fertilización inorgánica. Los aumentos fueron en azúcares (0.38-12%), volátiles aromáticos (72.1%) y disminuyeron los ácidos orgánicos (hasta 6.76% menos).

Hubo diferencias importantes en la calidad de los tomates bajo fertilización orgánico-mineral respecto a la fertilización mineral. La norma NMX-Ff-031-1997-SCFI (NMX-Ff-031-1997-SCFI, 1997) que establece los parámetros de calidad para el tomate, indica que los sólidos solubles en un tomate maduro deben de ser de 4, y para el procesado industrial, los °Brix deben ser mayores a 4.5. Con la fertilización orgánica-mineral y orgánica en ambas variedades produjeron mayores cantidades de sólidos solubles totales que donde se aplicó fertilizante mineral y en el testigo. Con la variedad Strongton con todas las fertilizaciones orgánica-mineral y orgánica se obtuvieron valores mayores a 5; con la variedad King fueron mayores a 4. El incremento de los solutos en el fruto (azúcares, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos) proviene principalmente de carbohidratos producidos por la fotosíntesis en las hojas y llegan al fruto a través del floema, el transporte de carbohidratos depende del flujo de agua del floema y la savia (Hou, Zhang, Du, Kang y Davies, 2020). El digestato pudo haber influido en la acumulación de iones en el suelo, que se asocia con un menor potencial hídrico, induciendo así un estrés hídrico tardío en las plantas de tomate, dado lugar a una producción mayor de sólidos solubles, que posteriormente son depositados en el fruto (Barzee *et al.*, 2019; Hou *et al.*, 2020). Otros trabajos han mostrado resultados similares, indicando que los fertilizantes orgánicos influyen positivamente en la cantidad de sólidos solubles en el fruto (°Brix), en comparación con los fertilizantes minerales (Stoknes, Scholwin, Krzesinski, Wojciechowska y Jasinska, 2016; Bilalis *et al.*, 2018).

El tomate es un fruto muy preciado no solo por su versatilidad de usos, sino también por su contenido de compuestos fenólicos, carotenoides, ácidos orgánicos y vitaminas que son benéficos para la salud. El Cuadro 3 muestra las concentraciones de compuestos fenólicos, carotenos y ácidos orgánicos de la variedad Strongton.

Cuadro 3. Efecto del tipo de fertilización en el contenido de compuestos fenólicos y ácidos orgánicos en tomate variedad Strongton. Table 3. Fertilization effect on phenolic compounds and organic acids composition in tomatoes of the Strongton variety.

Compuestos mg kg ⁻¹	D25M75	D50M50	D75M25	D100	M100	Testigo
Licopeno	15.29 ± 2.56 bc	10.84 ± 1.07 c	21.58 ± 2.17 ab	28.06 ± 2.47a	15.65 ± 1.98 bc	14.71 ± 1.01 bc
β-caroteno	16.56 ± 2.43 bc	11.84 ± 0.62 c	22.71 ± 2.71 ab	30.44 ± 3.63 a	17.20 ± 1.52 bc	15.53 ± 0.85 bc
Ácido gálico	5.64 ± 0.15 abc	5.98 ± 0.27 ab	6.88 ± 0.33 a	6.71 ± 0.11 a	3.69 ± 0.88 c	4.18 ± 0.32 bc
Ácido 3,4 dihidroxibenzoico	10.21 ± 0.44 a	8.76 ± 1.1 ab	11 ± 0.92 a	10.49 ± 0.17 a	10.72 ± 0.46 a	5.27 ± 0.74 b
Ácido 4-hidroxibenzoico	0.33 ± 0.04b c	0.22 ± 0.07 c	0.73 ± 0.07 a	0.45 ± 0.02 abc	0.65 ± 0.15 ab	0.73 ± 0.01 a
Ácido cafeico	10.17 ± 0.55 a	11.55 ± 0.92 a	10.04 ± 0.52 a	11.17 ± 0.09 a	7.49 ± 0.09 b	5.79 ± 0.07 b
Ácido p-cumárico	5.24 ± 0.52 a	4.84 ± 1.19 a	5.39 ± 0.41 a	5.52 ± 0.19 a	6.41 ± 0.3 a	5.96 ± 1.45 a
Ácido ferúlico	2.82 ± 0.01 b	2.88 ± 0.2 b	4.19 ± 0.14 a	3.67 ± 0.48 ab	3.76 ± 0.08 ab	2.96 ± 0.14 b
Naringina	4.4 ± 0.41 a	4.54 ± 0.45 a	4.88 ± 1.57 a	6.59 ± 1.09 a	4.12 ± 0.58 a	6.09 ± 0.9 a
Hesperidina	4.81 ± 0.04 c	11.69 ± 1.28 b	11.44 ± 0.83 b	10.04 ± 0.26 b	12.82 ± 0.28 b	21.33 ± 1.15 a
Oxálico	15.91 ± 0.35 bc	nd	7.35 ± 0.69 c	nd	22.6 ± 2.2 a	19.94 ± 0.25 a
Málico	246 ± 8.7 a	144.33 ± 6.1 c	24.04 ± 1 e	172.19 ± 6.86 b	196.55 ± 1.84 b	50.61 ± 3.93 d
Ascórbico	2.89 ± 0.21 c	5.22 ± 0.17 b	1.99 ± 0.25 c	3.24 ± 0.26 c	2.49 ± 0.03 c	33.75 ± 0.75 a
Cítrico	1166 ± 39 bc	1297 ± 8.8 ab	1057 ± 3.1 cd	1389 ± 33.1 a	1200 ± 23 b	1013 ± 40 d

Se muestra el promedio (n=3) y el error estándar, letras diferentes en renglones indican diferencias significativas en la prueba Tukey $p \leq 0.05$.
The mean (n = 3) and standard error are shown; different letters within rows indicate significant differences according to Tukey's test $p \leq 0.05$.

Es interesante observar que, para todos los compuestos analizados –excepto el ácido oxálico– al menos un tratamiento orgánico-mineral alcanzó concentraciones iguales o estadísticamente superiores a las del tratamiento M100. Las mayores concentraciones en licopeno, β -caroteno, ácido gálico y ácido cafeico se obtuvieron con las mayores aplicaciones de digestato. Con D100 los incrementos fueron en 79, 77, 82 y 49%, respectivamente, en comparación con M100; y con D75M25, los incrementos fueron de 38, 32, 86 y 34%, respectivamente. La fertilización mixta no tuvo efecto significativo sobre el ácido 3,4-dihidroxibenzoico, ácido 4-hidroxibenzoico, ácido p-cumárico, ácido ferúlico y naringina, cuyos niveles fueron estadísticamente similares a los del tratamiento M100. De manera notable, el tratamiento testigo presentó un mayor contenido de hesperidina, lo cual podría estar asociado con estrés inducido por deficiencia nutrimental (Hou *et al.*, 2020), además de mostrar las concentraciones más altas de ácido oxálico y ácido ascórbico. En cuanto a los ácidos orgánicos, el ácido cítrico fue el compuesto predominante en ambas variedades, seguido del ácido málico. Zhang *et al.* (2024) encontraron concentraciones más altas de carotenos como el licopeno y compuestos fenólicos en tomate cuando se combinó estiércol de caballo con urea, en comparación con la aplicación exclusiva de urea, que coincide con lo reportado en el presente trabajo.

Se observaron diferencias en la concentración de compuestos fenólicos, carotenos y ácidos orgánicos entre las variedades evaluadas, ya que la producción de estos compuestos en el tomate es influenciada por factores como la variedad, el grado de madurez del fruto, la fertilización, así como por factores abióticos (luz, temperatura) y condiciones de estrés (Anton *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2024). Los resultados divergentes observados entre las variedades coinciden con lo reportado por Oboulbiga *et al.*, (2018), quienes analizaron el contenido de licopeno y β -caroteno en 45 variedades de tomate, encontrando rangos de 2.41 a 83.51 mg 100 g⁻¹ de materia seca y de 0.83 a 26.80 mg 100 g⁻¹ de materia seca, respectivamente. Las concentraciones de fenoles oscilaron entre 502.84 y 1181.08 mg GAE 100 g⁻¹ de materia seca; estos autores concluyeron que el genotipo es el factor que más influye en la composición fitoquímica de los frutos.

Todos los tratamientos con digestato incrementaron la concentración del ácido gálico y ácido cafeico en los frutos, en comparación con la fertilización mineral, los incrementos fueron entre un 51.7 a 86.4% y entre un 34 al 54.2% respectivamente. El ácido cafeico desempeña un papel fundamental en los mecanismos de defensa vegetal y en las rutas del metabolismo secundario (Anton *et al.*, 2014). La presencia de los ácidos 3,4-dihidroxibenzoico y 4-hidroxibenzoico, aunque menos reportados en tomate, refleja su función como antioxidantes y como reguladores de las respuestas a estrés biótico y abiótico. En particular, el ácido 3,4-dihidroxibenzoico participa en la lignificación de la pared celular y actúa como señal química durante interacciones planta-microorganismo (Bhattacharya, Sood y Citovsky, 2010). La producción de estos ácidos fenólicos está influenciada por el estado nutricional de la planta (Khadem y Marles, 2010). Por otro lado, las mayores concentraciones de hesperidina detectadas en los frutos del tratamiento testigo pueden atribuirse a respuestas de estrés inducidas por deficiencia nutrimental, las cuales estimulan la biosíntesis de flavonoides (González-Coria *et al.*, 2022).

Las mayores proporciones de digestato, especialmente en los tratamientos D100 y D75M25 de la variedad Strongton, resultaron en un incremento en las concentraciones de carotenos en comparación con la fertilización exclusivamente mineral. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas que indican que los insumos orgánicos pueden favorecer la biosíntesis de compuestos antioxidantes (Turhan y Özmen, 2021). El aumento observado en los carotenos también podría estar relacionado con el estrés oxidativo generado por la presencia de metales pesados en el digestato; dicho estrés puede activar los mecanismos de defensa vegetal que conducen a la acumulación de antioxidantes no enzimáticos como el licopeno y el β -caroteno (Midden, Harris, Shaw, Sizmur y Pawlett, 2023). Los principales antioxidantes cuantificados en ambas variedades de tomate fueron el licopeno y el β -caroteno, lo cual concuerda con los hallazgos de Zhang *et al.* (2016), quienes reportaron que los carotenoides, los fenoles y los flavonoides constituyen los principales antioxidantes en tomate, y que su composición es influenciada por el suministro de nitrógeno, las prácticas agrícolas y la disponibilidad de luz. El licopeno otorga el color rojo característico del tomate; por ello, mayores niveles de licopeno y otros carotenos son deseables para el procesamiento industrial debido a sus propiedades antioxidantes reforzadas en productos como la pasta de tomate (Chassy, Bui, Renaud, Van Horn y Mitchell, 2006).

El Cuadro 4 presenta las concentraciones de los ácidos orgánicos y compuestos fenólicos cuantificados en tomates de la variedad King. Los frutos de los tratamientos D25M75, D50M50 y D75M25 mostraron contenidos de licopeno superiores en 40, 34 y 28%, respecto a M100; mientras que el β -caroteno fue 35, 28 y 23% mayor que en M100, respectivamente. El ácido gálico presentó concentraciones más altas respecto a los tratamientos D100 y M100. La fertilización mixta no tuvo efecto significativo sobre el ácido cafeico, la naringina, la hesperidina y el ácido cítrico, cuyos niveles fueron estadísticamente iguales a los de M100. Algunos compuestos no fueron detectados en frutos de determinados tratamientos, como el ácido p-cumárico, el ácido 4-hidroxibenzoico y el ácido 3,4-dihidroxibenzoico. Las concentraciones más elevadas de ácido ascórbico, hesperidina, ácido málico y ácido oxálico se detectaron en los frutos del testigo, probablemente como respuesta a estrés (Hou *et al.*, 2020).

Cuadro 4. Efecto del tipo de fertilización en el contenido de compuestos fenólicos y ácidos orgánicos en tomate variedad King.
Table 4. Effect of the fertilization on phenolic compounds and organic acids composition in tomatoes of the King variety.

Compuestos mg kg ⁻¹	D25M75	D50M50	D75M25	D100	M100	Testigo
Licopeno	64.68 ± 2.52 a	62.06 ± 1.9 a	59.35 ± 4.06 a	44.62 ± 3.3 b	46.19 ± 1.47 b	28 ± 1.99 c
β-caroteno	63.1 ± 0.71 a	59.71 ± 2.1 a	57.5 ± 3.87 a	44.55 ± 2.9 b	46.63 ± 0.39 b	31.97 ± 2.11 c
Ácido gálico	4.23 ± 0.03 bc	3.22 ± 0.19 d	3.28 ± 0.03 d	5.68 ± 0.25 a	4.93 ± 0.17 ab	3.46 ± 0.13 cd
Ácido 3,4 dihidroxibenzoico	3.77 ± 0.10 a	2.01 ± 0.55 b	1.21 ± 0.14 c	0.61 ± 0.29 c	nd	nd
Ácido 4-hidroxibenzoico	0.32 ± 0.17 c	nd	2.49 ± 0.03 a	1.07 ± 0.09 b	nd	0.56 ± 0.046 c
Ácido caféico	11.78 ± 0.26 a	13.57 ± 0.36 a	13.35 ± 0.07 a	13.58 ± 1.51 a	13.84 ± 0.47 a	5.9 ± 0.05 b
Ácido p-coumárico	nd	nd	nd	4.10 ± 0.08 a	3.9 ± 0.05 a	nd
Ácido ferrúlico	8.72 ± 0.02 a	6.86 ± 0.27 b	8.92 ± 0.09 a	6.34 ± 0.16 b	5.15 ± 0.15 c	3.02 ± 0.09 d
Naringina	10.3 ± 0.54 a	8.29 ± 2.09 ab	5.48 ± 0.03 abc	4.78 ± 0.16 abc	8.93 ± 1.7 ab	2.76 ± 0.32 c
Hesperidina	59.05 ± 1.01 b	81.05 ± 16.1 a	71.66 ± 1.49 ab	71.72 ± 2.34 ab	57.49 ± 1.75 b	83.23 ± 2.15 a
Oxálico	24.21 ± 3 cd	26.44 ± 2.66 cd	21.37 ± 2.34 d	40.62 ± 4.77 bc	48.95 ± 2.27 b	71.68 ± 5.27 a
Málico	170 ± 4.46 c	263 ± 7.44 b	176 ± 9.71 c	162 ± 6.18 c	201 ± 7.75c	361 ± 24.4 a
Ascórbico	8.95 ± 1.28 c	12.04 ± 0.84 c	22.64 ± 0.81 d	27.59 ± 0.65 d	37.43 ± 2.15 b	53.61 ± 1.78 a
Cítrico	738 ± 17.31 b	1242 ± 29.74 a	1234 ± 4.96 a	1266 ± 18.82 a	1401 ± 10.94 a	1293 ± 10.44 a

Se muestra el promedio (n=3) y el error estándar, letras diferentes en renglones indican diferencias significativas en la prueba Tukey $p \leq 0.05$.
The mean (n = 3) and standard error are shown; different letters within rows indicate significant differences according to Tukey's test $p \leq 0.05$.

Los ácidos orgánicos son metabolitos clave durante el desarrollo del fruto; constituyen aproximadamente el 13% del peso seco del tomate, siendo el ácido cítrico el componente dominante, mientras que el ácido málico desempeña un papel importante en los estados inmaduros (Andelini *et al.*, 2023). El ácido ascórbico es transportado desde las hojas hacia el fruto a través del floema, aunque también puede sintetizarse localmente en el fruto. Durante la maduración, especialmente en tomates completamente rojos, la síntesis local predomina sobre la translocación desde las hojas (Zhang *et al.*, 2021). Las condiciones de sombra reducen los niveles de ácido ascórbico al limitar la exposición a la luz solar, lo que subraya la importancia de la luz para su acumulación. Las mayores concentraciones de ácido ascórbico observadas en los frutos del tratamiento testigo podrían estar asociadas a una mayor exposición a la luz solar, resultado de una menor cobertura foliar (Gautier *et al.*, 2010).

Los resultados observados indicando que la fertilización orgánica y la orgánica-mineral mejora la calidad y contenido de compuestos fenólicos, carotenoides y ácidos orgánicos en frutos de tomate, han sido reportados en otros trabajos. Estrada-Arellano *et al.* (2022) llevaron a cabo un estudio sobre la calidad del tomate en presencia de estiércol solarizado como fertilizante orgánico. Al agregar 60 Mg ha⁻¹ de estiércol al cultivo de la variedad Palermo, hubo un incremento en los fenoles totales, el licopeno y la capacidad antioxidante en el fruto en 24, 6 y 4%, respecto comparado con el tratamiento de fertilización química, específicamente. La aplicación de composta incrementó significativamente el contenido de vitamina C, flavonoides, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, respecto a la fertilización química; con esta última hubo un incremento en β-caroteno y licopeno (Teshome, Aklilu y Zewdu, 2025). Con la fertilización usando harina de *Lupinus albus* L, N granulado procedente de sangre seca, roca fosfórica, fertilizante mineral NK y sulfato de potasio se obtuvieron las concentraciones más altas de polifenoles y vitamina C en frutos de tomate (Pinto, Fischer, Bastias, Wilckens y Urrea-Huilipang, 2025)

Rendimiento y Tamaño de los Frutos

Los Cuadros 5 y 6 presentan los datos de peso y tamaño por fruto, así como el rendimiento para las variedades Strongton y King, respectivamente. En general, las dimensiones del fruto y el rendimiento fueron similares entre ambas variedades. En la variedad Strongton, la mayoría de los tratamientos generaron pesos y tamaños de fruto comparables a los obtenidos con la fertilización mineral y superiores al tratamiento testigo. Aunque no se observaron diferencias estadísticas, numéricamente los tratamientos D25M75 y D75M25 superaron a la fertilización mineral en todos los parámetros, con incrementos de 29.3% en peso del fruto, 8.5% en diámetro polar, 5.7% en diámetro ecuatorial y 11.7% en rendimiento para D25M75. En el caso de D75M25, se observaron incrementos numéricos de 19%, 2% y 4% en peso del fruto, diámetro polar y diámetro ecuatorial, respecto M100. Sin embargo, el rendimiento tendió a disminuir conforme aumentó la proporción de digestato.

Cuadro 5. Efecto del tipo de fertilización en los parámetros de tamaño y rendimiento de los tomates obtenidos con la variedad Strongton.
Table 5. Fertilization effect on fruit size and yield from tomatoes of the Strongton variety.

Tratamiento	Peso por fruto	Diámetro polar	Diámetro ecuatorial	Producción total
	g	----- mm -----	-----	kg
D25M75	118.2 ± 7.56 a	78.37 ± 2.49 a	51.96 ± 1.19 a	14.65
D50M50	84.23 ± 7.99 bcd	67.35 ± 3.18 abc	46.24 ± 1.36 bc	12.38
D75M25	109.21 ± 9.12 ab	73.83 ± 3.24 ab	51.08 ± 1.45 a	12.23
D100	96.25 ± 8.27 abc	70.97 ± 3.34 abc	48.70 ± 1.34 ab	9.48
M100	91.43 ± 7.64 abc	72.23 ± 2.57 abc	49.14 ± 1.13 a	13.12
Testigo	64.8 ± 3.74 cd	63.91 ± 2.01 bc	43.13 ± 1.27 bc	4.789

Se muestra el promedio (n=3) y el error estándar, letras diferentes en columnas indican diferencias significativas en la prueba Tukey $p \leq 0.05$.
The mean (n = 3) and standard error are shown; different letters within columns indicate significant differences according to Tukey's test $p \leq 0.05$.

En la variedad King no se detectaron diferencias significativas en el peso del fruto ni en los diámetros entre los tratamientos orgánico-mineral y la fertilización mineral. Los frutos con una menor proporción de digestato alcanzaron los mayores rendimientos, superando al tratamiento mineral en 12% para D25M75 y 6.6% para D50M50. Como se observó en la variedad Strongton, el tratamiento testigo produjo los frutos de menor tamaño y el rendimiento más bajo.

Los resultados de este estudio demuestran que la integración de digestato con fertilizantes minerales puede mantener o incluso mejorar el rendimiento y la calidad del fruto de tomate, al tiempo que reduce la dependencia de insumos minerales. Esto coincide con investigaciones previas que indican que la sustitución parcial de fertilizantes minerales por orgánicos puede mantener la productividad y mejorar los atributos respecto a la calidad (Saha *et al.*, 2019; Turhan y Özmen, 2021). De manera similar, Ye *et al.* (2020) reportaron que tasas reducidas de fertilizante mineral suplementadas con un biofertilizante orgánico que contenía *Trichoderma* produjeron rendimientos de tomate comparables a los obtenidos con fertilización 100% mineral. Li *et al.* (2023) observaron que la adición de digestato y fertilizantes minerales incrementó el rendimiento del tomate en 26.2% y 10.7% en condiciones de campo e invernadero, respectivamente, además de mejorar el contenido de proteína y ácido ascórbico.

Además de la calidad, el rendimiento y el tamaño del fruto también fueron influenciados positivamente por la fertilización con digestato. En ambas variedades, la combinación de 25% de digestato con 75% de fertilizante mineral mejoró el rendimiento y el tamaño individual del fruto en comparación con la fertilización exclusivamente mineral. Este hallazgo sugiere que es factible reducir la aplicación de fertilizante mineral mediante la suplementación con digestato sin comprometer el rendimiento. Esto coincide con estudios previos, como el de Saha *et al.* (2019), quienes reportaron incrementos significativos en el diámetro del fruto, el peso individual y el rendimiento cuando el cultivo recibió aproximadamente 60% de enmiendas orgánicas combinadas con 40% de fertilizante mineral, en comparación con la fertilización mineral exclusiva. Li *et al.* (2023) observaron que la fertilización orgánico-mineral incrementa la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, lo que favorece el crecimiento del cultivo y la eficiencia fotosintética, generando aumentos en rendimiento de hasta 10.78%. Brtnicky *et al.*, (2022) propusieron que estas mejoras se deben en gran medida a una mayor actividad del microbioma del suelo estimulada por la aplicación de digestato. Asimismo, Castro-Ramos *et al.* (2022) destacaron que el digestato contiene promotores de crecimiento vegetal que influyen en las respuestas y el desarrollo de las plantas, además, aporta materia orgánica, ácidos húmicos y micronutrientes esenciales para un crecimiento óptimo del cultivo (Piaz, Nabel y Jablonowski, 2014).

En conjunto, estos resultados respaldan investigaciones previas que indican que las estrategias de fertilización orgánico-mineral mejoran la disponibilidad de nutrientes en el suelo, promueven comunidades microbianas benéficas y favorecen parámetros clave del crecimiento vegetal, incluida la eficiencia fotosintética, lo que finalmente se traduce en mayores rendimientos y calidad de los frutos.

Cuadro 6. Efecto del tipo de fertilización en los parámetros de tamaño y rendimiento de los tomates obtenidos con la variedad King. Table 6. Fertilization effect on fruit size and yield from tomatoes of the King variety.

Tratamiento	Peso por fruto (g)	Diámetro polar	Diámetro ecuatorial	Producción total
		----- mm -----		kg
D25M75	122.19 ± 8.32 a	70.61 ± 2.42 ab	51.09 ± 1.48 ab	18.31
D50M50	122.85 ± 5.35 a	73.20 ± 1.84 ab	55.56 ± 1.1 a	17.34
D75M25	112.84 ± 5.74 a	72.40 ± 1.2 ab	53.30 ± 1.04 a	15.23
D100	101.96 ± 4.59 ab	67.59 ± 1.67ab c	51.89 ± 1.04 ab	14.92
M100	118.09 ± 4.67 a	74.74 ± 1.25 a	54.39 ± 0.91 a	16.26
Testigo	70.90 ± 3.79 c	57.46 ± 1.35 d	41.94 ± 1.08 d	2.15

Se muestra el promedio (n=3) y el error estándar, letras diferentes en columnas indican diferencias significativas en la prueba Tukey $p \leq 0.05$.
The mean (n = 3) and standard error are shown; different letters within columns indicate significant differences according to Tukey's test $p \leq 0.05$.

CONCLUSIONES

Es posible reducir en 25% los requerimientos de fertilizante mineral supliéndolos con digestato en el cultivo de tomate, con lo cual incluso se incrementa el rendimiento de frutos en ambas variedades evaluadas. La fertilización orgánica-mineral también mejoró la calidad de los frutos; si bien ambas variedades respondieron positivamente a la fertilización orgánico-mineral, hubo cambios por variedad: En la variedad Strongton, los tratamientos con 75% y 100% de digestato aumentaron el contenido de sólidos solubles, licopeno, caroteno y ácido gálico. Por el contrario, en la variedad King, las proporciones bajas de digestato (25% y 50%) generaron mayores concentraciones de licopeno y β -caroteno, respecto a tratamientos con mayores proporciones de digestato o a la fertilización mineral. Estas diferencias sugieren que las estrategias óptimas de fertilización deben ajustarse según las respuestas específicas de cada variedad para maximizar la calidad y rendimiento. La integración del digestato con fertilizante mineral constituye un enfoque sostenible para mejorar la calidad del tomate sin comprometer el rendimiento y a la vez, se reduce el uso del fertilizante mineral. Además, la revalorización de un subproducto como el digestato da un enfoque en la producción circular de alimentos.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No Aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No Aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Toda la información generada y analizada durante este estudio se incluyen en la presente publicación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses

FINANCIACIÓN

El presente Proyecto fue financiado por las Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, mediante el proyecto SIP 20220594.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: M.M.S.O.; Metodología: A.R.R. y R.M.M.C.; Análisis formal: A.R.R. y R.M.M.C.; Escritura - preparación del borrador original: M.M.S.O.; Escritura - revisión y edición: M.E.S.C., A.S.O. y R.C.R.; Adquisición de fondos: M.M.S.O.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado-IPN por el apoyo financiado por el proyecto SIP 20220594. Al CONAHCYT por el otorgamiento de la beca de Doctorado para la primera autora.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Benítez, G., Solís-Oba, M. M., Castro-Rivera, R., López-Gayou, V., Lara-Ávila, J. P., & Esteves-Luna, M. A. (2020). Efecto de bacterias PGPB, composta y digestato en el rendimiento de materia seca de pasto ovido. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 24, 117-127. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2363>
- Andelini, M., Major, N., Išić, N., Kovačević, T. K., Ban, D., Palčić, I., ... & Goreta Ban, S. (2023). Sugar and organic acid content is dependent on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) peel color. *Horticulturae*, 9(3), 313. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030313>
- Anton, D., Matt, D., Pedastsaar, P., Bender, I., Kazimierczak, R., Roasto, M., ... & Püssa, T. (2014). Three-year comparative study of polyphenol contents and antioxidant capacities in fruits of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars grown under organic and conventional conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(22), 5173-5180. <https://doi.org/10.1021/jf500792k>
- Barzee, T. J., Edalati, A., El-Mashad, H., Wang, D., Scow, K., & Zhang, R. (2019). Digestate biofertilizers support similar or higher tomato yields and quality than mineral fertilizer in a subsurface drip fertigation system. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 58. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00058>
- Bhattacharya, A., Sood, P., & Citovsky, V. (2010). The roles of plant phenolics in defence and communication during Agrobacterium and Rhizobium infection. *Molecular Plant Pathology*, 11(5), 705-719. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00625.x>
- Bilalis, D., Krokida, M., Roussis, I., Papastylianou, P., Travlos, I., Cheimona, N., & Dede, A. (2018). Effects of organic and inorganic fertilization on yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Folia Horticulturae*, 30, 321-332. <https://doi.org/10.2478/fhort-2018-0027>
- Brtnický, M., Kintl, A., Holatko, J., Hammerschmiedt, T., Mustafa, A., Kucerik, J., & Elbl, J. (2022). Effect of digestates derived from the fermentation of maize legume intercropped culture and maize monoculture application on soil properties and plant biomass production. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 1-24. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00310-6>
- Cartaya, O., & Reynaldo, I. (2001). Flavonoides: Características químicas y aplicaciones. *Cultivos Tropicales*, 22(2), 5-14.
- Castro-Ramos, J. J., Solís-Oba, A., Solís-Oba, M., Calderón-Vázquez, C. L., Higuera-Rubio, J. M., & Castro-Rivera, R. (2022). Effect of the initial pH on the anaerobic digestion process of dairy cattle manure. *AMB Express*, 12(1), 162. <https://doi.org/10.1186/s13568-022-01486-8>
- Chassy, A. W., Bui, L., Renaud, E. N., Van Horn, M., & Mitchell, A. E. (2006). Three-year comparison of the content of antioxidant microconstituents and several quality characteristics in organic and conventionally managed tomatoes and bell peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 8244-8252. <https://doi.org/10.1021/jf060950p>
- Coyago-Cruz, E., Meléndez-Martínez, A. J., Moriana, A., Girón, I. F., Martín-Palomo, M. J., Galindo, A., ... & Corell, M. (2019). Yield response to regulated deficit irrigation of greenhouse cherry tomatoes. *Agricultural Water Management*, 213, 212-221. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.020>
- Estrada-Arellano, E., Murillo-Amador, B., Cervantes-Vázquez, T. J. A., Gallegos-Robles, M. A., Fortis-Hernández, M., & Vázquez-Vázquez, C. (2022). Fertilización orgánica para mejorar calidad nutracéutica de híbridos de tomate y su efecto en las propiedades químicas del suelo. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1613>
- Gautier, H., Lopez-Lauri, F., Massot, C., Murshed, R., Marty, I., Grasselly, D., ... & Genard, M. (2010). Impact of ripening and salinity on tomato fruit ascorbate content and enzymatic activities related to ascorbate recycling. *Functional Plant Science and Biotechnology*, 4(1), 66-75.
- Gómez-Romero, M., Segura-Carretero, A., & Fernández-Gutiérrez, A. (2010). Metabolite profiling and quantification of phenolic compounds in methanol extracts of tomato fruit. *Phytochemistry*, 71(16), 1848-1864. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.08.002>
- González-Coria, J., Lozano-Castellón, J., Jaime-Rodríguez, C., Olmo-Cunillera, A., Laveriano-Santos, E. P., Pérez, M., ... & Romanyà, J. (2022). The effects of differentiated organic fertilization on tomato production and phenolic content in traditional and high-yielding varieties. *Antioxidants*, 11(11), 2127. <https://doi.org/10.3390/antiox11112127>
- Hernández, M., Rodríguez, M., & Díaz, C. (2008). Chemical composition of tomato (*Lycopersicon esculentum*) from Tenerife, the Canary Islands. *Food Chemistry*, 106(3), 1046-1056. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.025>
- Hou, X., Zhang, W., Du, T., Kang, S., & Davies, W. J. (2020). Responses of water accumulation and solute metabolism in tomato fruit to water scarcity and implications for main fruit quality variables. *Journal of Experimental Botany*, 71(4), 1249-1264. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz526>
- Imran, M., Ghorat, F., Ul-Haq, I., Ur-Rehman, H., Aslam, F., Heydari, M., ... & Rebezov, M. (2020). Lycopene as a natural antioxidant used to prevent human health disorders. *Antioxidants*, 9(8), 706. <https://doi.org/10.3390/antiox9080706>
- Jiang, X., Zhao, Y., Tong, L., Wang, R., & Zhao, S. (2019). Quantitative Analysis of Tomato Yield and Comprehensive Fruit Quality in Response to Deficit Irrigation at Different Growth Stages. *HortScience*, 54(8), 1409-1417. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14180-19>
- Khadem, S., & Marles, R. J. (2010). Monocyclic phenolic acids; hydroxy- and polyhydroxybenzoic acids: Occurrence and recent bioactivity studies. *Molecules*, 15(11), 7985-8005. <https://doi.org/10.3390/molecules15117985>
- Krasilnikov, P., Taboada, M. A., & Amanullah. (2022). Fertilizer use, soil health and agricultural sustainability. *Agriculture*, 12, 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040462>
- Li, F., Yuan, Y., Shimizu, N., Magaña, J., Gong, P., & Na, R. (2023). Impact of organic fertilization by the digestate from by-product on growth, yield and fruit quality of tomato (*Solanum lycopersicon*) and soil properties under greenhouse and field conditions. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10, 70. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00448-x>

- Loan, N., Hung, N., Thiem, T., & Thu, T. (2024). Integration of mineral fertilizer with organic fertilizer for improved tomato fruit yield and quality. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, 7(2), 2099-2109. <https://doi.org/10.31817/vjas.2024.7.2.01>
- Marconi, O., Floridi, S., & Montanari, L. (2007). Organic acids profile in tomato juice by HPLC with UV detection. *Journal of Food Quality*, 30, 253-266. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2007.00119.x>
- Midden, C., Harris, J., Shaw, L., Sizmur, T., & Pawlett, M. (2023). The impact of anaerobic digestate on soil life: A review. *Applied Soil Ecology*, 191, 105066. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105066>
- Na, Q., Wang, Y., Zhang, M., Zhu, C., Cao, H., Liu, S., & Meng, L. (2025). SILCYB2 affects the accumulation of carotenoids in tomato fruits. *Food Bioscience*, 63, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105782>
- NMX-Ff-031-1997-SCFI (Norma Oficial Mexicana). (1997). Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-fruta fresca-papaya (*Carica papaya* L.) especificaciones, publicada en 1997. *Diario Oficial de la Federación*, D. F., México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI).
- Nour, V., Trandafir, I., & Ionica, M. E. (2010). HPLC organic acid analysis in different citrus juices under reversed phase conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 38(1), 44-48. <https://doi.org/10.15835/nbha3814569>
- Oboulbiga, E., Traore, C., Tarpaga, W., Parkouda, C., Sawadogo-Lingani, H., Kere-Kando, C., & Traore, A. (2018). Assessment of the content of β -carotene, lycopene and total phenolic of 45 varieties of tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 6(3), 82-89. <https://doi.org/10.11648/j.jfns.20180603.13>
- Olasekan, A., Olatunde, S., Femi, J., Aremu, A., Muiyiwa, C., Okunlola, F., & Oyelami, E. (2022). Organic and inorganic fertilizers effects on the performance of tomato (*Solanum lycopersicum*) and cucumber (*Cucumis sativus*) grown on soilless medium. *Scientific Reports*, 12, 12212. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16497-5>
- OriginLab Corporation. (2021). *OriginPro (Version 2021)*. Northampton, MA, USA: OriginLab Corporation.
- Paul, V., Singh, A., & Pandey, R. (2010). Estimation of total soluble sugars (TSS). In *Laboratory manual: Post-harvest physiology of fruits and flowers* (pp. 41-43). New Delhi, India: Indian Agricultural Research Institute. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21724.10883>
- Pérez-Espinoza, H. A., Chávez-Morales, J., Carrillo-Flores, G., Rodríguez-Mendoza, M. N., & Ascencio-Hernández, R. (2017). Fertilización foliar en el rendimiento y calidad de tomate en hidroponía bajo invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 333-343. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.54>
- Piaz, D., Nabel, M., & Jablonowski, N. (2014). Biogas-digestate as nutrient source for biomass production of *Sida hermaphrodita*, *Zea mays* L. and *Medicago sativa* L. *Energy Procedia*, 59, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.357>
- Pinto, A. A., Fischer, S., Bastias, R. M., Wilckens, R. E., & Urrea-Huilipang, Á. (2025). Shade netting and fertilization strategies: Influence on yield and antioxidant levels in tomato. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 85(5), 689-704. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392025000500689>
- Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J. P., & Lutts, S. (2019). Tomato fruit development and metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
- Rajapaksha, R. M. P. I., Vibodhani, D. D. N., Harshana, M. M. J., Jayathilaka, M. D. D. W., Munasinghe, M. A. U. P., Bandara, H. K. S. P., ... & Rathnayaka, R. M. S. M. B. (2024). Effect of organic fertilizer solutions on the growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Organic Agriculture*, 14, 513-522. <https://doi.org/10.1007/s13165-024-00478-1>
- Romero-Rodríguez, A., Luna-Zendejas, H. S., Solís-Oba, A., Castro-Rivera, R., Armenta-Bojórquez, A. D., & Solís-Oba, M. M. (2022). Evaluación de la calidad de tomate fertilizado con extracto de sargazo del Caribe mexicano y micorrizas. *Mexican Journal of Biotechnology*, 7(3), 15-31. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2022.7.3.15>
- Saha, K., Kabir, M. Y., Mondal, C., & Mannan, M. A. (2019). Growth and yield of tomato as affected by organic and inorganic fertilizers. *Journal of Bangladesh Agricultural University*, 17(4), 500-506. <https://doi.org/10.3329/jbau.v17i4.44618>
- Stoknes, K., Scholwin, F., Krzesinski, W., Wojciechowska, E., & Jasinska, A. (2016). Efficiency of a novel "food to waste to food" system including anaerobic digestion of food waste and cultivation of vegetables on digestate in a bubble-insulated greenhouse. *Waste Management*, 56, 466-476. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.027>
- Suwanaruang, T. (2016). Analyzing lycopene content in fruits. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 11, 46-48. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.12.008>
- Terry-Alfonso, E., Ruiz-Padrón, J. & Carrillo-Sosa, Y. (2018). Efecto de diferentes manejos nutricionales sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2), 389-401.
- Teshome, K., Akilu, S., & Zewdu A. (2025) Impact of Fertilization on Antioxidant Activity, Microbiological Quality, and Sensory Attributes of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivated in Ethiopia's Central Rift Valley. *Food Science & Nutrition*, <https://doi.org/10.1002/fsn3.70609>
- Tigist, M., Workneh, T., & Woldetsadik, K. (2013). Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 50(3), 477-486. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0378-0>
- Turhan, A., & Özmen, N. (2021). Effects of chemical and organic fertilizer treatments on yield and quality traits of industrial tomato. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18(2), 213-221. <https://doi.org/10.33462/jotaf.741367>
- Uchenna, E. U., & Abiodun, A. O. (2024). Quality attributes, physiology, and postharvest technologies of tomatoes (*Lycopersicum esculentum*) - A review. *American Journal of Food Science and Technology*, 12(2), 42-64. <https://doi.org/10.12691/ajfst-12-2-1>
- Yang, J., Mattoo, A. K., Liu, Y., Zvomuya, F., & He, H. (2023). Trade-offs of organic and organic-inorganic fertilizer combinations in tomato quality and yield: A global meta-analysis (1992-2021). *European Journal of Agronomy*, 151, 126985. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126985>
- Ye, L., Zhao, X., Bao, E., Li, J., Zou, Z., & Cao, K. (2020). Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and improves tomato yield and quality. *Scientific Reports*, 10, 177. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56954-2>
- Zeb, A. (2015). A reversed phase HPLC-DAD method for the determination of phenolic compounds in plant leaves. *Analytical Methods*, 7(18), 7753-7757. <https://doi.org/10.1039/C5AY01402F>
- Zhang, E., Duan, Y., Tan, F., & Zhang, S. (2016). Effects of long-term nitrogen and organic fertilization on antioxidants content of tomato fruits. *Journal of Horticulture*, 3, 172. <https://doi.org/10.4172/2376-0354.1000172>
- Zhang, Y., Ntagkas, N., Fanourakis, D., Tsaniklidis, G., Zhao, J., Cheng, R., ... & Li, T. (2021). The role of light intensity in mediating ascorbic acid content during postharvest tomato ripening: A transcriptomic analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 180, 111622. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111622>
- Zhang, Y., Zhu, K., Wang, X., Yan, J., Zhu, H., Zhang, N., ... & Wang, F. (2024). Manipulation of artificial light environment improves plant biomass and fruit nutritional quality in tomato. *Journal of Advanced Research*, 75, 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.11.030>