

## Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

### **Efecto de un sistema hidropónico en carrete (RHS) en la producción y calidad bioquímica de tomate**

### **Effects of a reel hydroponic system (RHS) on the production and biochemical quality of tomato**

Authors/Autores: Ayala-Contreras, C. A., González-Fuentes, J. A., Sariñana-Aldaco, O., Benavides-Mendoza, A., Preciado-Rangel, P.

ID: e1717

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1717>

Received/Fecha de recepción: August 20<sup>th</sup> 2024

Accepted /Fecha de aceptación: November 07<sup>th</sup> 2024

Available online/Fecha de publicación: November 21<sup>th</sup> 2024

Please cite this article as/Como citar este artículo: Ayala-Contreras, C. A., González-Fuentes, J. A., Sariñana-Aldaco, O., Benavides-Mendoza, A., Preciado-Rangel, P. (2024). Effects of a reel hydroponic system (RHS) on the production and biochemical quality of tomato. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1717. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1717>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

## Efecto de un sistema hidropónico en carrete (RHS) en la producción y calidad bioquímica de tomate

### Effects of a reel hydroponic system (RHS) on the production and biochemical quality of tomato

Calidad de tomate hidropónico/

Hydroponic tomato quality

Ayala-Contreras, C. A.<sup>1\*</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-0417-3596>), González-Fuentes, J. A.<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-8740-3931>), Sariñana-Aldaco, O.<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-9189-1931>), Benavides-Mendoza, A.<sup>1</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-2729-4315>), Preciado-Rangel, P.<sup>2</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-3450-4739>).

<sup>1</sup>Adscripción: Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro # 1923. C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México

<sup>2</sup>Adscripción: Departamento de Horticultura, Unidad Laguna, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, C.P.25054, Torreón, Coahuila, , México

**\*Corresponding Author:**

Carmen Alicia Ayala-Contreras. Dpto. de horticultura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro # 1923. Buena Vista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México. Teléfono: (844) 411-02-00. E-mail: cayala710@gmail.com

## RESUMEN

Los sistemas de producción hidropónicos son una técnica viable que permite un mejor uso de los recursos, actualmente se busca incrementar su funcionalidad, por medio de la adaptación de sistemas existentes, para hacer más eficiente el manejo, incrementar producción y calidad de los cultivos. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de un sistema hidropónico en carrete en la producción (RHS) y calidad bioquímica de frutos de tomate, comparado con un sistema hidropónico convencional en sustrato (SHS). Se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos para variables bioquímicas como vitamina C, capacidad antioxidante y proteínas totales, así como en características de interés comercial como sólidos solubles totales y acidez titulable; no hubo diferencias para glutatión, compuestos fenólicos, flavonoides, licopeno y beta-caroteno; la producción se incrementó en un 15 % en el RHS y las plantas tuvieron menor estrés hídrico en sus etapas de floración y cosecha en comparación con el SHS. El RHS influye en el contenido de biocompuestos, en frutos de tomate, de interés bioquímico y comercial; así mismo incrementó el rendimiento total por planta, lo cual representa una ventaja productiva y económica, por lo que el RHS es una propuesta importante como sistema de producción.

## **PALABRAS CLAVE:**

Rendimiento, biocompuestos, agua, raíces adventicias, tallos.

## **SUMMARY**

Hydroponic production systems are a viable technique that allows better use of resources, to increase their functionality through the adaptation of existing systems to make management more efficient to increase the production and quality of crops. The objective of this work was to evaluate the effects of a reel hydroponic system on the production (RHS) and biochemical quality of tomato fruits compared with those of a conventional substrate hydroponic system (SHS). Statistical differences in biochemical variables, such as vitamin C content, antioxidant capacity, and total protein content, as well as characteristics of commercial interest, such as total soluble solids and titratable acidity, were detected among the treatments. There were no differences in glutathione, phenolic compound, flavonoid, lycopene, or beta-carotene content, and the production of the RHS and the plants that experienced less water stress in their flowering and harvest stages was 15 % greater than that of the SHS. The RHS influences the content of biocomposites in tomato fruits of biochemical and commercial interest; similarly, it increases the total plant yield, which represents a productive and economic advantage, for which the RHS is an important production system.

## **KEY WORDS:**

Yield, biocomposites, water, adventitious roots, stems.

## **Introducción:**

La producción en invernadero tiene una relevancia importante en la producción de alimentos, especialmente cuando se implementan sistemas hidropónicos, debido a su capacidad de optimizar el uso de recursos y aumentar la productividad (Khan *et al.*, 2017). En este contexto, el cultivo de tomate de variedades de crecimiento indeterminado, caracterizado por su capacidad de prolongar la producción de frutos durante más tiempo (Mngoma *et al.*, 2022), se ha convertido en una alternativa de producción importante para satisfacer la demanda comercial de este producto (Ampim *et al.*, 2022).

El tomate es el producto hortícola más consumido a nivel mundial y es la principal hortaliza producida en ambientes protegidos debido a su importancia económica (Orona-Castillo *et al.*, 2022), su producción en México representó, para el 2022, un valor económico de 2.6 millones de dólares y un volumen de producción de 4.2 millones de toneladas (FAO – FAOSTAT, 2023). La producción en ambientes protegidos, como invernadero, ofrece ventajas relacionadas al manejo de las condiciones ambientales y sanidad del cultivo, lo que favorece la productividad y rentabilidad (Flores & Edwards, 2019). Según datos del SIAP para el año agrícola 2022, la producción de tomate bajo sistemas en invernadero fue de 1.4 millones de toneladas, siendo Puebla el principal estado productor con 154 toneladas por hectárea. El tomate tiene un valor nutracéutico importante ya que contiene diferentes pigmentos, vitaminas y antioxidantes de interés para el consumo humano (Fortis-Hernández *et al.*, 2018), el contenido de estos compuestos varía según múltiples factores

relacionados con el sistema de producción, cultivares empleados y manejo general (Fernandes *et al.*, 2021).

Para la producción de tomate se emplean diferentes variedades según el sistema de producción, en ambientes protegidos y en el caso de invernaderos con sistemas hidropónicos, se usan variedades de crecimiento indeterminado (Vicente *et al.*, 2015); estas variedades desarrollan, con el tiempo, tallos largos, lo que implica que las plantas deban transportar agua y nutrientes desde la parte basal hasta la parte apical, lo cual puede afectar su productividad según avanza el ciclo de producción (Cuellar-Murcia & Suárez-Salazar, 2018).

La producción hidropónica es la técnica en donde las raíces del cultivo están en contacto con agua y fertilizante en forma de solución nutritiva, usando otro medio de sostén diferente al suelo, pudiendo ser reemplazado por un medio inerte o por estructuras que no utilicen sustrato (Swain *et al.*, 2021). Los sistemas hidropónicos pueden modificarse según las necesidades del cultivo y el manejo de la solución nutritiva, uno de los sistemas que sigue este principio es la técnica de película de nutrientes (NFT, por sus siglas en inglés) (Sharma *et al.*, 2019). El sistema NFT consiste en establecer las plantas en canaletas o tubos, con un porcentaje de inclinación, para que una fina capa de solución nutritiva pase a través de las raíces, usando una bomba para llevar la solución desde un contenedor hasta las canaletas (Domingues *et al.*, 2012).

Actualmente la producción agrícola enfoca sus esfuerzos en la innovación de sus tecnologías, metodologías y prácticas que permitan aumentar la productividad, reducir costos, optimizar tiempo y recursos (Velázquez-González *et al.*, 2022). En sistemas de producción en invernadero y particularmente en cultivo de tomate hidropónico, mejorar o modificar los procesos ya existentes es fundamental para maximizar la productividad y calidad del cultivo (Szekely & Jijakli, 2022). El sistema NFT tipo carrete (RHS) es una variante al sistema que ya se conoce, donde en lugar de usar canaletas, se implementa una estructura en forma de carrete (Ayala-Contreras *et al.*, 2022), esta modificación representa una ventaja operativa y de diseño en cuanto al manejo de tallos y en la optimización del espacio, lo cual convierte al RHS en una opción prometedora para la producción intensiva de tomate. Por medio de este sistema, no solo se busca potencializar la cantidad de frutos por planta, sino también mejorar la calidad bioquímica del producto teniendo un impacto directo en su valor comercial y preferencias de consumo (Rusu *et al.*, 2023).

Por otro lado, se debe considerar que la generación de nuevas tecnologías puede presentar limitaciones relacionadas con costos de implementación inicialmente altos ya que pudiera implicar la fabricación de prototipos, capacitación e introducción en el mercado; sin embargo las innovaciones tienen un alcance amplio que permiten llegar a generar rentabilidad y sostenibilidad (Fuentes-Peñailillo *et al.*, 2024).

Tomando en cuenta las oportunidades que ofrece el sistema NFT, el propósito de este trabajo fue evaluar la producción y calidad bioquímica de frutos de tomate de crecimiento indeterminado producido en un sistema hidropónico en carrete (RHS), contribuyendo a un mayor entendimiento de las tecnologías aplicadas en la producción en ambientes protegidos y su potencial para incrementar la eficiencia productiva y calidad del producto comercial.

## Material y Métodos

Este experimento se estableció durante el ciclo febrero-diciembre 2022 en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México, dentro de un invernadero tipo túnel con fibra de vidrio y sistemas de calefacción y enfriamiento semiautomatizado, el cual está ubicado en el área de Horticultura (coordenadas 25°21'21.7" Latitud Norte y 101°02'06.7" Longitud Oeste). El material vegetal empleado fue de la casa comercial Harris Moran, tomate de crecimiento indeterminado, variedad EL CID F1. Las plántulas para el estudio se produjeron en charolas de poliestireno utilizando turba como sustrato.

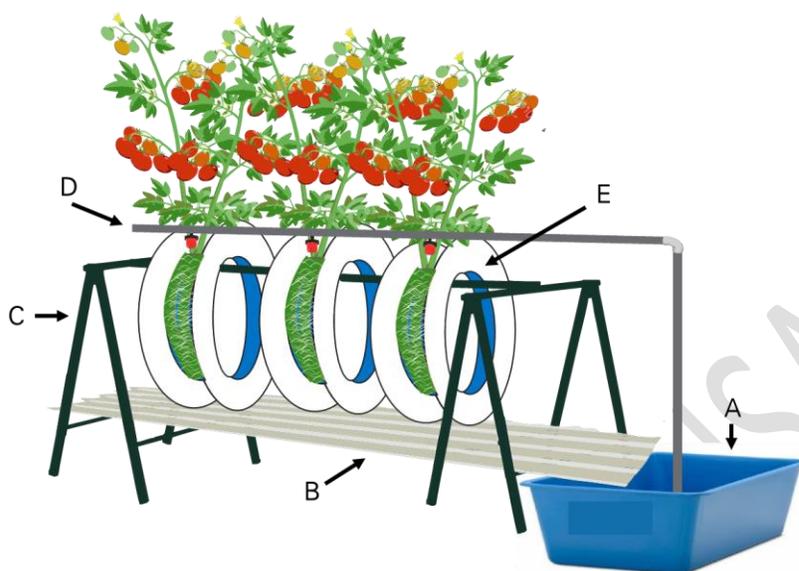
### Tratamientos.

Se evaluaron dos sistemas de producción, un sistema de producción en sustrato hidropónico (SHS) y un sistema hidropónico en carrete (RHS). Se empleó un diseño experimental completamente al azar con 10 repeticiones para cada tratamiento, la repetición consistió en una bolsa y un carrete con dos plantas de tomate cada uno, respectivamente.

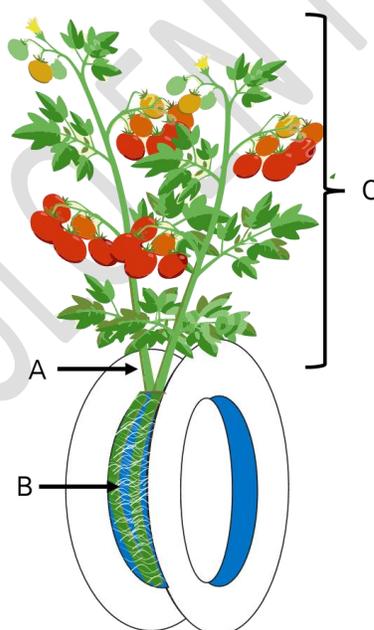
### Sistemas de producción.

Para el SHS el trasplante se realizó en bolsas de polietileno negro de 20 L de capacidad, colocando 2 plantas por bolsa, se guiaron a un tallo por planta con hilo rafia; la densidad de siembra fue de seis plantas m<sup>-2</sup>. Se aplicó solución nutritiva (SN) de Steiner para cubrir los requerimientos nutrimentales del cultivo mediante riego por goteo; en etapa vegetativa se aplicaron concentraciones de 3.5 meq L<sup>-1</sup> (miliequivalentes por litro) de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>) y potasio (K<sup>+</sup>), 1.5 meq L<sup>-1</sup> de magnesio (Mg<sup>++</sup>) y fosfatos (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>), 7 meq L<sup>-1</sup> de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 0.5 meq L<sup>-1</sup> de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y 6 meq L<sup>-1</sup> de calcio (Ca<sup>++</sup>), en etapa de fructificación se aplicó el doble de las concentraciones usadas en etapa vegetativa excepto H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> que se mantuvieron igual.

Para el RHS se utilizaron carretes de plástico previamente elaborados según el procedimiento establecido por (Ayala-Contreras *et al.*, 2022), se colocaron 2 plantas por carrete, tres carretes m<sup>-2</sup> y un sistema de riego por goteo recirculante que funcionaba 24 horas, para la aplicación de la SN (Figura 1). 100 días después del trasplante (DAT), cuando los tallos alcanzaron una longitud de más 2 m, se procedió a cortar la raíz principal y a enrollar los tallos en el carrete, sin hojas ni frutos, manteniendo el área del tallo enrollada expuesta a SN para generar raíces adventicias (AR) (Figura 2); esta actividad se continuó realizando durante todo el ciclo productivo conforme avanzaba la cosecha de racimos, cortando secciones del tallo con AR, buscando siempre mantener plantas productivas de 2 m de longitud (Figura 2).



**Figura 1. Diagrama del RHS.** A: bandeja de recolección de SN; B: canaleta de circulación de SN; C: soporte tipo caballete; D: sistema de riego recirculante con bomba sumergible; E: carrete.



**Figura 2. Diagrama de plantas de tomate establecidas en RHS.** A: tallo de tomate enrollado en el carrete; B: producción de RA en el tallo enrollado; C: tallo productivo de 2 m con flores y frutos (sección productiva).

### **Variables evaluadas.**

Las variables bioquímicas fueron determinados en seis frutos de tomate por planta, recolectados al azar cuando presentaban color y textura firme, las muestras fueron congeladas y almacenadas en un ultracongelado (Thermo-Scientific TSX vertical). Para realizar los análisis, las muestras fueron liofilizadas en un liofilizador (Labconco Legacy 6

L) durante 8 días, posteriormente fueron maceradas con un mortero cerámico, las muestras secas fueron almacenadas en bolsas plásticas, al ambiente en una caja de cartón oscuro para evitar contacto con la luz.

Para realizar la extracción y evaluar capacidad antioxidante, glutatión y proteínas totales, se colocaron 100 mg de las muestras secas en tubos de 2 mL agregando 10 mg de PVP (polivinilpirrolidona), posteriormente se agregó 2 mL de buffer de fosfatos 0.1 M, la mezcla homogenizada, se zonificó por 5 min y centrifugó a 12,500 rpm a 4 °C por 10 minutos, una vez finalizado el proceso se recolectó el sobrenadante y se realizaron las cuantificaciones.

### **Capacidad antioxidante hidrofílica (ABTS)**

El procedimiento utilizado para la cuantificación de esta variable se realizó según lo planteado por Re *et al.* (1999), utilizando la decoloración del catión radical ABTS (ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico). Para dar lugar al radical, se realiza la reacción con persulfato de potasio a 2.45 mM y ABTS a 7 mM (1:1 v/v) durante 16 horas en oscuridad, el radical debe tener una absorbancia de 0.7 a 754 nm. Posteriormente, en tubos de 2 mL se coloca 0.980 mL del radical con 20 µL de la muestra, agitando y dejando en oscuridad durante 7 min. Una vez transcurrido el tiempo de reposo se realizó la medición a 754 nm en un espectrofotómetro Uv-Vis (Genesis 10s, Thermo Scientific, USA) y los datos son reportados en miligramos equivalentes de ácido ascórbico en 100 g de peso seco (mg AAE 100 g<sup>-1</sup> DW).

### **Glutatión**

Este compuesto se determinó por medio de espectrofotométrica, metodología propuesta por Xue *et al.* (2001), Utilizando DTNB (ácido 5,5 ditiobis-<sup>2</sup> nitro benzoico); para la reacción de coloración se utilizó 0.48 mL de la muestra, 2.2 mL de fosfato de disódico, 0.33 mL de DTNB a 1 mM; posteriormente la mezcla se reposo durante 15 min y se realizó la lectura en un espectrofotómetro Uv-Vis (Genesis 10s, Thermo Scientific, USA) a 412 nm, el resultado se expresa en mg 100 g<sup>-1</sup> DW.

### **Proteínas totales**

La cuantificación se realizó por medio de espectrofotométrica de Bradford, (1976). Se colocó 1 mL de reactivo Bradford y 0.1 mL de la muestra, se dejó reposar por 5 minutos y se leyó a 595 nm en un espectrofotómetro Uv-Vis (Genesis 10s, Thermo Scientific, USA) . Los resultados se presentan en mg 100 g<sup>-1</sup> DW.

### **Compuestos fenólicos**

Para medir esta variable se usó la metodología propuesta por Ainsworth & Gillespie (2007). Para la extracción se usaron 2 mL de acetona con agua (1:1 v/v) con 100 mg de muestra seca, la mezcla se agitó durante 20 s usando un vórtex, posteriormente se zonificó por 5 min y se centrifugó durante 10 minutos a 12,000 rpm a 4°C. Para la cuantificación se utilizó el sobrenadante de la extracción colocando 50 µL en tubos de ensayo, se agregó 0.5 mL de carbonato de sodio al 20 %, 0.2 mL de reactivo Folin Ciocalteu y 5 mL de agua destilada; se mantuvo en reposo a 45° C durante 30 min, en un horno de secado (CONAQUIN ICB 18 L) , posteriormente se realizó la lectura en un espectrofotómetro Uv-

Vis (Genesis 10s, Thermo Scientific, USA) a 750 nm y los datos fueron reportados en mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de materia seca (mg GAE 100 g<sup>-1</sup> DW).

### Flavonoides

La determinación de este compuesto fue según Zhishen *et al.* (1999). Se emplearon 2 mL de metanol al 80 % y 100 mg de muestra en agitación con vórtex, se zonifico durante 5 min y se procedió a centrifugar 4,000 rpm durante 10 min a 4 °C. La cuantificación se realizó manteniendo la muestra en reposo durante 5 min con 75 µL de NaNO<sub>2</sub> al 5 %, luego se agregó 1.5 mL de AlCl<sub>3</sub> al 10 %, 2 mL de agua destilada y 0.5 mL de NaOH 1 M. La cuantificación se realizó en un espectrofotómetro Uv-Vis (Genesis 10s, Thermo Scientific, USA) a 510 nm y los resultados se expresan en mg equivalentes de catequina por 100 gramos de peso seco (mg CE 100 g<sup>-1</sup> DW).

### Licopeno y β-caroteno

Estas variables se evaluaron según Fish *et al.* (2002). Se utilizó 0.1 g de material seco con 2 mL de la mezcla de hexano y acetona en una proporción de 3:2. En un espectrofotómetro Uv-Vis (Genesis 10s, Thermo Scientific, USA) se mide a 453, 505, 645 y 663 nm. Los resultados se expresan en mg Kg<sup>-1</sup> DW.

Los compuestos se calculan mediante las siguientes ecuaciones (Fish *et al.*, 2002):

*Licopeno* (= - 0.0458 x A663 + 0.204 x A645 + 0.372 x A505 - 0.0806 x A453  
(Ecuación 1)

*Beta - caroteno* = 0.216 x A663 - 1.22 x A645 - 0.304 x A505 +  
0.452 x A453 (Ecuación 2)

### Vitamina C

Esta variable se cuantificó por titulación, se utilizaron 20 g de jugo diluidos en 20 mL agua destilada. Se usó el reactivo Thielmann y HCl al 2 % para la titulación. El contenido de vitamina C se cuantificó mediante (Igbokwe & Anagonye, 2013):

$$\text{Vitamina C} = \text{VRT} * 0.088 * \text{VT} * 100 \frac{100}{\text{Pv}} * G \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde: VRT: gasto en mL de Thielmann, VT: Total en mL captado de vitamina C en HCl, Pv: Volumen en mL del proporcional, G: gramos de la muestra. Los resultados se expresan en mg de ácido ascórbico en 100 g de muestra fresca (mg AA 100 g<sup>-1</sup> DW).

### Solidos solubles totales (TSS)

Los SST se determinaron con un refractómetro portátil Civeq, y se reportan en °Brix.

### Acidez titulable (TA)

La determinación de este compuesto se realizó por titulación usando NaOH 0.1 N y fenolftaleína. Se colocó en un vaso de precipitado el volumen de jugo equivalente a 7 g de

fruto con 100 mL de agua destilada para su dilución. Para determinar el contenido se usó la siguiente ecuación (Anthon & Barrett, 2012):

$$AT = \frac{(V * N * 0.064 * 100)}{VM} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde V: mL gastados de NaOH, N: Normalidad del NaOH, VM: volumen de la muestra. Los resultados se expresan en porcentaje de mg ácido cítrico 100 mL<sup>-1</sup>.

## Producción

La cosecha de los frutos se realizó durante 100 días, la cosecha se realizaba conforme avanzaba la maduración en cada racimo, se seleccionaron 6 frutos por racimo para obtener datos promedio por fruto; se evaluaron las variables: diámetro de fruto (polar y ecuatorial) usando un pie de rey digital (Sunnimix), cantidad y peso de frutos por planta, usando una báscula digital (Ohaus-precisión 0.01 g), la producción se reportó en kg m<sup>2</sup>.

## Potencial hídrico en hojas

Se cortaron hojas, dentro del área productiva, en dos momentos del desarrollo fenológico, durante la floración y durante la cosecha. Se empleó una bomba de presión Scholander (PMS Instrument Company, Albany, OR, USA) para determinar el potencial hídrico en los tallos de las hojas, los resultados se reportan en megapascales (MPa).

## Análisis estadístico

Dada la naturaleza del experimento, para el análisis estadístico de los datos obtenidos, se empleó la prueba t de Welch ( $p \leq 0.05$ ), utilizando Rstudio versión 1.3.1093.

## Resultados y Discusión

Los compuestos bioactivos de los frutos de tomate se presentan en la Figura 3. Las variables glutatión, carotenoides, compuestos fenólicos y flavonoides no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los sistemas hidropónicos (prueba de t de Welch  $\alpha \leq 0.05$ ), por su parte la vitamina C (Figura 3: A), proteínas totales y capacidad antioxidante (Figura 4: A y B) sí presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos. La vitamina C se incrementó en un 32 % en el RHS, con un valor promedio de 34.88 mg ácido ascórbico en 100 g de peso fresco. En cuanto a proteínas totales, el contenido en el RHS fue 33 % más que en el SHS, siendo 58 mg más alto. De igual manera, los frutos establecidos en el RHS presentaron valores de capacidad antioxidante 7 % más altos que el SHS, quien tuvo un valor promedio de 79.09 mg AAE por 100 g de materia seca.

En los vegetales el ácido l-ascórbico (AA o vitamina C) es el antioxidante más abundante que se solubiliza en agua y es de gran interés a nivel comercial por su valor nutricional (Yactayo-Chang *et al.*, 2017). Los frutos producidos en RHS tienen mayor contenido de vitamina C comparado con el SHS, Sronsri *et al.* (2022) indica que los frutos de tomate establecidos en un cultivo sin suelo presentaron mayor contenido de vitamina C en comparación con el cultivo en suelo, atribuyendo el incremento al uso de SN recirculante

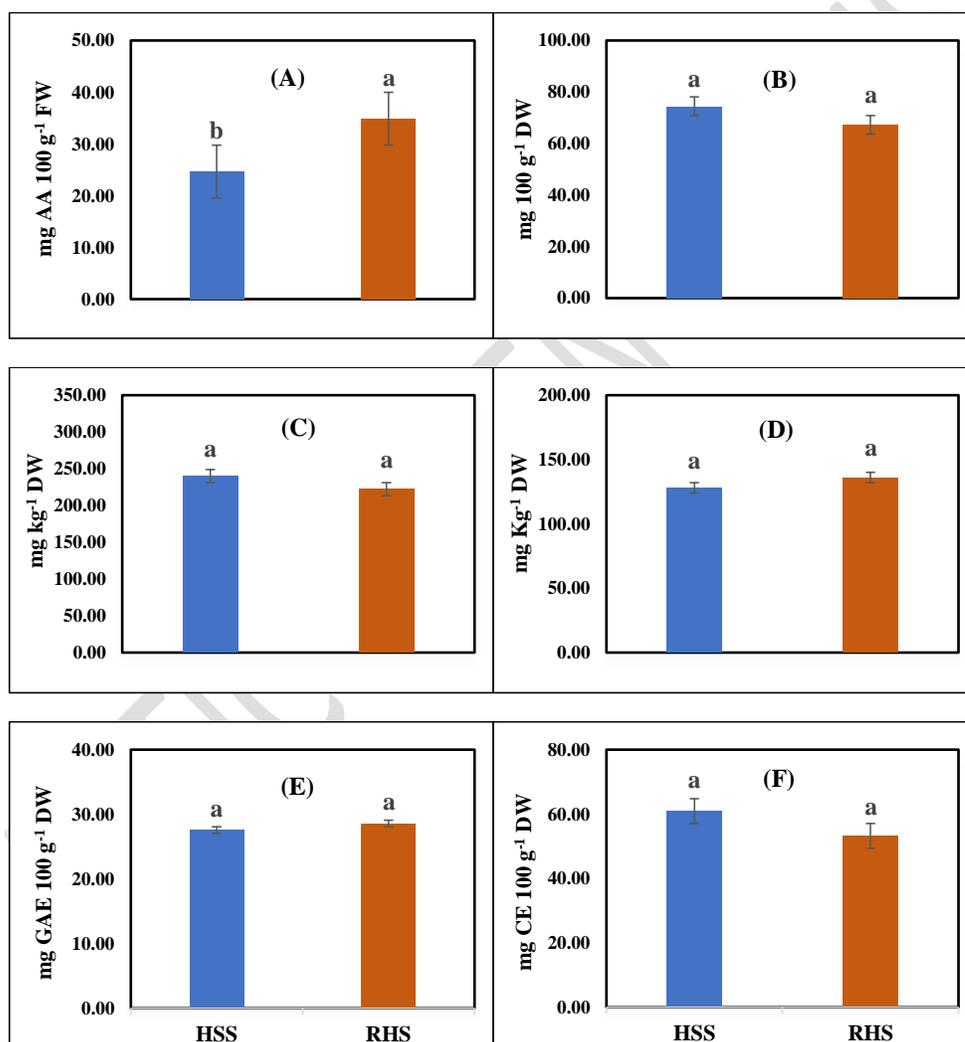
y el aporte estable de los elementos que la planta necesita para la síntesis de este compuesto; en el SHS, aunque es un sistema de producción sin suelo, no emplea SN recirculante, por lo que se atribuir el mayor contenido de vitamina C en el RHS a que el sistema permite la recirculación de la solución en todo momento. Los cultivos producidos en sistemas hidropónicos pueden incrementar el contenido de biocompuestos con capacidad antioxidante, como la vitamina C, debido a la disponibilidad de nutrientes en la SN (Delgadillo-Díaz *et al.*, 2019); Kaur *et al.* (2018) menciona que los sistemas hidropónicos sin sustrato permiten un mejor suministro de nutrientes y de forma más directa en las diferentes etapas de crecimiento de la planta, lo que mejora los parámetros de calidad, el RHS aporta los nutrientes necesarios, de forma constante lo que garantiza que la planta disponga de lo necesario para sintetizar los compuestos de forma eficiente. El adecuado suministro nutrimental en la fertilización influye directamente en el contenido antioxidante de tomate (Fanasca *et al.*, 2006); el RHS aporta SN en todo momento y de forma próxima a la parte productiva por medio de las RA, lo que favorece la adsorción de nutrientes. Por otro lado, el contenido de proteínas totales en los frutos indica un alto valor nutrimental y funcional para los diferentes procesos metabólicos que se realizan en el fruto; (Almeselmani *et al.*, 2009) llevo a cabo un estudio donde concluyo que la relación entre los nutrientes y el suministro preciso, según las necesidades del cultivo, favorecen el incremento en proteínas totales y otros compuestos bioactivos.

Los carotenoides (licopeno y betacaroteno) son pigmentos sintetizados durante la maduración del fruto (Perveen *et al.*, 2015), su acumulación está influenciada por la temperatura del aire; entre 22-25 ° C se consideran ideales para la biosíntesis de estos compuestos, por debajo de 10 ° C y por encima de 30 ° C, la biosíntesis se ve comprometida (Chen *et al.*, 2014). Durante este experimento, el promedio mensual de temperatura mínima del aire varió entre 7 ° C y 10 ° C, y la temperatura máxima entre 23 ° C y 38 ° C; el contenido de estos compuestos en el fruto de tomate no se ve influenciada por el sistema hidropónico, si no por efecto de las condiciones ambientales donde se desarrollaron, principalmente de la temperatura y la luz, que son factores fundamentales para la síntesis de estos pigmentos (Verdoliva *et al.*, 2021). En cuanto a glutatión, compuestos fenólicos y flavonoides (Figura 3: B, E y F) el sistema de producción no influyó en el contenido de estos metabolitos secundarios; el contenido de estos compuestos puede verse modificado en mayor medida cuando las plantas son sometidas a algún tipo de estrés o estímulos que afecten las rutas metabólicas para la síntesis de estos compuestos (Toscano *et al.*, 2019), aunque en el RHS las plantas sufren periodos de estrés, durante el corte de sus tallos, esto no afecta su desempeño metabólico en la producción de biocompuestos, ya que el RHS solventa la falta de raíz principal generando un estímulo en los tallos y produciendo raíces adventicias que aprovechen el riego y fertilización en todo momento, que el sistema proporciona.

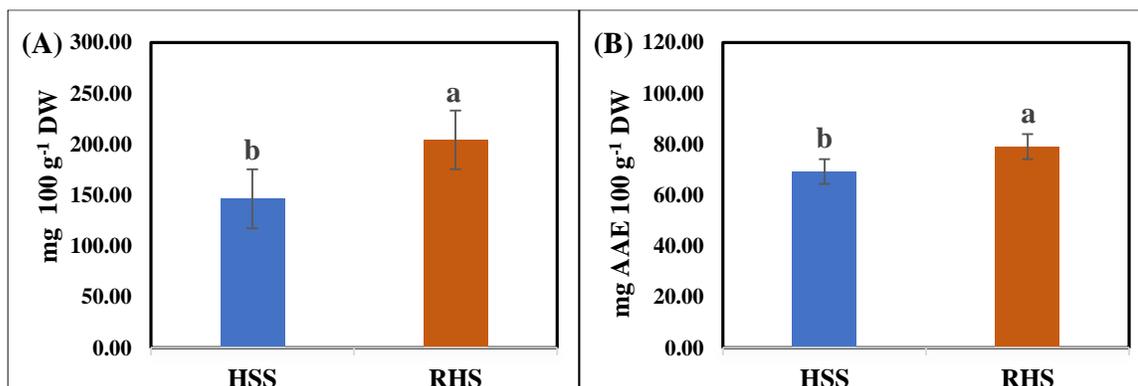
Son pocos los estudios que investigan los efectos del medio de cultivo en los parámetros de calidad (Olle *et al.*, 2012); Gruda (2009) sugiere que existen cambios significativos en los parámetros de calidad de muchas hortalizas en respuesta al medio de cultivo utilizado; factores como el tipo de variedad, nutrición, condiciones ambientales, prácticas de manejo y medios de cultivos pueden influir en el contenido de compuestos bioactivos, siendo el estado de maduración, el principal factor (Fernandes *et al.*, 2021; Nour *et al.*, 2015).

Los resultados correspondientes a sólidos solubles totales (TSS) y acidez titulable (TA) en frutos frescos de tomate, se muestran en la Tabla 1, en ambas variables existen

diferencias estadísticas entre los sistemas hidropónicos (prueba de t de Welch  $\alpha \leq 0.05$ ). Estas variables se ven altamente influenciadas por el estado de maduración del fruto de tomate, siendo su relación de forma inversa, a mayor etapa de maduración mayor contenido de SST y menor contenido de TA y a menor etapa de maduración, menor contenido TSS y mayor contenido de TA (Agius *et al.*, 2018; Casierra-Posada & Aguilar-Avedaño, 2008). La cosecha de los frutos en ambos sistemas se realizó siguiendo la misma metodología, vasado en color del fruto, los resultados indican que los frutos en el RHS presentaron un mayor estado de maduración. Esto se atribuye a que el RHS se encuentra elevado con respecto al suelo (Figura 1), y por ende más ceca el techo del invernadero, teniendo una temperatura las alta, lo cual genera que los frutos maduren de forma más rápida.



**Figura 3. Contenido de compuestos antioxidantes no enzimáticos en frutos de tomate, establecidos en diferentes sistemas hidropónicos.** SHS: sistema en sustrato hidropónico; RHS: sistema hidropónico en carrete. A: vitamina C; B: glutatión; C: licopeno; D:  $\beta$ -caroteno; E: compuestos fenólicos; F: flavonoides. Letras iguales dentro de cada columna indican que no existe diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (prueba t de Welch,  $\alpha \leq 0.05$ ).



**Figura 4. Contenido de proteínas totales (A) y capacidad antioxidante (B) en frutos de tomate establecidos en un sistema en sustrato hidropónico (SHS) y en sistema hidropónico en carrete (RHS).** Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias estadísticas significativas (prueba t de Welch,  $\alpha \leq 0.05$ ).

El sistema de producción puede influenciar el contenido de estos compuestos, principalmente en su relación con la conductividad eléctrica (EC) de las soluciones donde se desarrollan las plantas (Beckles, 2012); en sistemas hidropónicos, la relación en la EC de la NS puede variar significativamente entre sustratos, dadas las condiciones climáticas y la acumulación de nutrientes; Dorai *et al.* (2001) indica que en sustratos como turba y sistemas hidropónicos recirculantes la EC puede tener un efecto en el contenido de compuestos nutraceuticos en frutos de tomate bajo invernadero; Khanbabaloo *et al.* (2018) encontró que un aumento en la EC (3 dS m<sup>-1</sup>) mejora la calidad y el sabor del tomate sin afectar el rendimiento. Mitsanis *et al.* (2021) llevo a cabo un estudio donde relacionó las características nutraceuticas de frutos de tomates, establecidos en diferentes sustratos hidropónicos, sistemas de manejo y tiempos de cosecha, donde el tiempo de cosecha fue el factor más importante seguido por el tipo sustrato, principalmente en rasgos de sabor y contenido antioxidantes. El contenido de TSS es un atributo de calidad importante durante la fase de maduración (Siddiqui *et al.*, 2015); a nivel comercial, los frutos de tomate de alta calidad deben tener valores de °Brix superiores a 3 (Schwarz *et al.*, 2013), los valores de sólidos solubles reportados en este experimento fueron superiores al valor sugerido anteriormente.

Las variables relacionadas con producción de frutos de tomate (Cuadro 2) presentan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (prueba de t de Welch  $\alpha \leq 0.05$ ) en peso de fruto y producción por m<sup>2</sup> excepto en diámetro de los frutos. La producción por m<sup>2</sup> incremento en un 15 % en el RHS, representando 0.68 kg por planta en comparación con el SHS.

Fayezizadeh *et al.* (2021) indica que la producción en sistemas hidropónicos recirculantes incrementa la productividad de los cultivos y eficientiza el uso del agua y fertilizantes; por su parte Haghghi & Teixeira Da Silva, (2013) indican que el rendimiento puede verse afectado positivamente dependiendo del tipo de cultivo y sistema empleado. Los datos en este estudio sugieren que el mayor rendimiento se debió a que en el RHS, con SN recirculante, los nutrientes estaban disponibles de manera directa y próxima al área

productiva de la planta (Figura 2) por medio de las RA producidas por en el tallo, así como lo reporta (Ayala-Contreras *et al.*, 2022) en un estudio preliminar con el sistema NFT en forma de carrete; otros autores como (Olagunju *et al.*, 2023) indican que el rendimiento de tomate es mayor, cuando las plantas se mantienen en forma vertical con tallos cortos, a diferencia de tallos largos colocados horizontalmente; Asaduzzaman, (2015) menciona que el rendimiento puede aumentar de 2 a 5 veces en sistemas hidropónicos. Las tendencias de la agricultura en ambientes protegidos enfoca sus esfuerzos en la búsqueda de alternativas eficientes de producción, mediante la modificación o innovación de los sistemas de producción, técnicas de manejo y control de los ambientes (Urrestarazu, 2013), es por ello que es fundamental la investigación en nuevos sistemas de producción. Por otro lado, contar con SN en concentraciones nutricionales adecuadas y balanceadas con la CE, mejora el desarrollo, producción de los frutos y sus características bioquímicas (Lu *et al.*, 2022), tal como lo proporciona el RHS.

**Tabla 1. Sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT) en frutos de tomate producidos en los diferentes sistemas hidropónicos.**

	<b>TSS</b> (°Brix)	<b>TA</b> mg 100 mL <sup>-1</sup>
<b>RHS</b>	0.49 ± 0.06 <b>a</b>	3.15 ± 0.02 <b>b</b>
<b>HSS</b>	0.36 ± 0.09 <b>b</b>	3.85 ± 0.03 <b>a</b>
CV*	4.14	2.18
α	0.001	0.0004

\*CV: coeficiente de variación. Letras diferentes dentro de cada columna muestran una diferencia estadística significativa (prueba t de Welch, α ≤ 0.05).

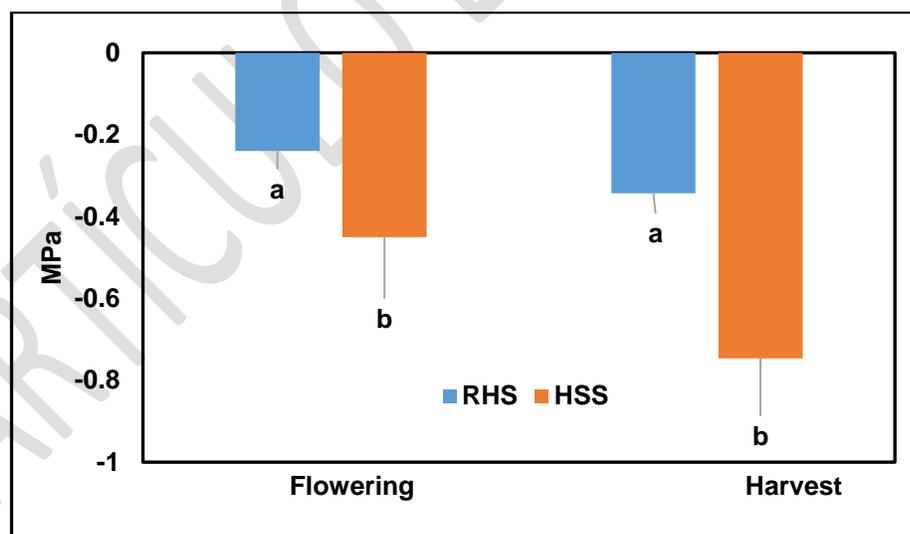
**Tabla 2. Rendimiento en el cultivo de tomate establecido en sistema hidropónico tipo carrete (RHS) y en sustrato hidropónico (SHS).**

	<b>RHS</b>	<b>SHS</b>	CV	α
<b>Production</b> (kg m <sup>2</sup> )	29.96 ± 2.49 <b>a</b>	25.92 ± 2.79 <b>b</b>	9.13	0.0198
<b>Fruit weight</b> (g)	114.7 ± 9.31 <b>a</b>	105.84 ± 8.84 <b>b</b>	10.39	0.0174
<b>Polar diameter</b> (mm)	67.53 ± 1.71 <b>a</b>	62.65 ± 3.73 <b>a</b>	11.22	0.428
<b>Equatorial diameter</b> (mm)	59.78 ± 2.08 <b>a</b>	52.61 ± 1.19 <b>a</b>	14.04	0.703

\*CV: coeficiente de variación. Letras diferentes dentro de cada columna muestran una diferencia estadística significativa (prueba t de Welch, α ≤ 0.05).

El potencial hídrico de las hojas de tomate (Figura 5), en ambas etapas fenológicas, fue estadísticamente diferente entre tratamiento (prueba de t de Welch  $\alpha \leq 0.05$ ); siendo mayor en el RHS, presentando valores menos negativos que el SHS. Durante el periodo de floración, las plantas establecidas en RHS tuvieron un valor promedio de -0.24 Mpa, lo que representa más de la mitad en comparación de lo presentado por el SHS que fue de -0.45 Mpa; en la etapa de cosecha el valor de potencial hídrico fue 41 % y 66 % mayor en la floración en el RHS y SHS, respectivamente.

Un estudio llevado a cabo por (Lipan *et al.*, 2021) menciona que no encontraron diferencias estadísticas en potencial hídrico de hojas, en la aplicación de riegos deficitarios, pero si encontraron correlación con el rendimiento y contenido de compuestos como SST y capacidad antioxidante de los frutos, ya que cuando se genera un estrés hídrico en las plantas con valores más negativos, estas variables pueden verse afectadas. El potencial hídrico en hojas es una medida que nos permite evaluar el estado hídrico de la planta y como está siendo su manejo en condiciones de estrés (Putti *et al.*, 2023), valores cercanos a -1 Mpa tienen un efecto importante en el desarrollo productivo de las plantas de tomate (Karaca *et al.*, 2023). El mayor estrés hídrico se observa en la etapa de cosecha en el SHS, donde los requerimientos nutricionales son elevados y el movimiento del agua debe ser mayor en plantas con tallos largos, a diferencia el RHS donde el riego es constante, lo cual se refleja con valores cercanos a 0 en ambas etapas fenológicas, estos resultados nos permiten complementar los resultados de presentados en producción, ya que las plantas en el RHS no presentaron estrés hídrico, dadas las características antes mencionadas en el sistema con AR absorbiendo los nutrimentos necesarios de forma cercana a las hojas y área productiva de frutos.



**Figura 5. Potencial hídrico de las hojas en plantas de tomate producidas en sistema hidropónico en carrete (RHS) y en sistema en sustrato hidropónico (SHS).**

## Conclusiones

Este estudio revela que el sistema hidropónico en carrete (RHS) ofrece ventajas significativas en cuanto rendimiento y calidad de frutos de tomate de crecimiento indeterminado, comparado con el sistema hidropónico convencional en sustrato (SHS). Los resultados en este estudio indican un aumento del 15 % en la producción, con mayor pesos de frutos y reducción del estrés hídrico de las plantas en las etapas críticas del desarrollo; así mismo, en el RHS promueve un aumento significativo en el contenido de compuestos bioquímicos de interés comercial y de consumo humano, como de vitamina C y capacidad antioxidante.

Este sistema propone una alternativa innovadora y viable para mejorar la eficiencia productiva y calidad de tomate en sistemas hidropónicos, contribuyendo a la mejora continua de los procesos y a la optimización de los recursos. Es importante plantear nuevas áreas de estudio alrededor de este tipo de sistemas, en función de la relación benéfico-costos.

## Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo (CAAC, JAGF); desarrollo de la metodología (CAAC, JAGF, OSA); manejo de software (CAAC, OSA); validación experimental (CAAC, JAGF, ABM); análisis de resultados (CAAC, ABM, OSA); Manejo de datos (CAAC, OSA); escritura y preparación del manuscrito (CAAC, ABM, PPR); redacción, revisión y edición (ABM, PPR, JAGF); administrador de proyectos (CAAC, JAGF); adquisición de fondos (JAGF, ABM, PPR).

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo. CAAC, JAGF, OSA, ABM, PPR.

## Financiamiento

Esta investigación fue financiada por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, a través de la dirección de proyectos de investigación y por CONAHCYT por medio de una beca para grado de doctorado.

## Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## Referencias

- Agius, C., von Tucher, S., Poppenberger, B., & Rozhon, W. (2018). Quantification of sugars and organic acids in tomato fruits. *MethodsX*, 5, 537-550. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.05.014>
- Ainsworth, E. A., & Gillespie, K. M. (2007). Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent. *Nature Protocols*, 2(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
- Almeselmani, M., Pant, R. C., & Singh, B. (2009). Potassium Level and Physiological Response and Fruit Quality in Hydroponically Grown Tomato. *International Journal of Vegetable Science*, 16(1), 85-99. <https://doi.org/10.1080/19315260903271526>
- Ampim, P. A. Y., Obeng, E., & Olvera-Gonzalez, E. (2022). Indoor Vegetable Production: An Alternative Approach to Increasing Cultivation. *Plants*, 11(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/plants11212843>
- Anthon, G. E., & Barrett, D. M. (2012). Pectin methylesterase activity and other factors affecting pH and titratable acidity in processing tomatoes. *Food Chemistry*, 132(2), 915-920. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.066>
- Asaduzzaman, M. (2015). *Soilless Culture: Use of Substrates for the Production of Quality Horticultural Crops*. BoD – Books on Demand.
- Ayala-Contreras, C. A., González-Fuentes, J. A., Zermeño-González, A., Benavides-Mendoza, A., Peña-Ramos, F. M., & Hernández-Mauriri, J. A. (2022). Respuesta fisiológica y productiva de tomate en un sistema NTF modificado tipo carrete. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(2). <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3361>
- Beckles, D. M. (2012). Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 63(1), 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.016>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Casierra-Posada, F., & Aguilar-Avenidaño, Ó. E. (2008). Calidad en frutos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cosechados en diferentes estados de madurez. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 300-307.
- Chen, J., Kang, S., Du, T., Guo, P., Qiu, R., Chen, R., & Gu, F. (2014). Modeling relations of tomato yield and fruit quality with water deficit at different growth stages under greenhouse condition. *Agricultural Water Management*, 146, 131-148. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.026>
- Cuellar-Murcia, C. A., & Suárez-Salazar, J. C. (2018). Flujo de savia y potencial hídrico en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones de invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 104-112. <https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7316>
- Delgadillo-Díaz, M., Gullian-Klanian, M., Sosa-Moguel, O., Sauri-Duch, E., & Cuevas-Glory, L. F. (2019). Evaluation of Physico-chemical Characteristics, Antioxidant Compounds and Antioxidant Capacity in Creole Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L. and *S. pimpinellifolium* L.) in an Aquaponic System or Organic Soil. *International Journal of Vegetable Science*, 25(2), 124-137. <https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1487496>
- Domingues, D. S., Takahashi, H. W., Camara, C. A. P., & Nixdorf, S. L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
- Dorai, M., Papadopoulos, A., & Gosselin, A. (2001). Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie*, 21(4), 367-383. <https://doi.org/10.1051/agro:2001130>
- Fanasca, S., Colla, G., Maiani, G., Venneria, E., Roupael, Y., Azzini, E., & Saccardo, F. (2006). Changes in Antioxidant Content of Tomato Fruits in Response to Cultivar and Nutrient

- Solution Composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(12), 4319-4325. <https://doi.org/10.1021/jf0602572>
- Fayezizadeh, M. R., Ansari, N. A. Z., Albaji, M., & Khaleghi, E. (2021). Effects of hydroponic systems on yield, water productivity and stomatal gas exchange of greenhouse tomato cultivars. *Agricultural Water Management*, 258, 107171. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107171>
- Fernandes, I., Leça, J. M., Aguiar, R., Fernandes, T., Marques, J. C., & Cordeiro, N. (2021). Influence of Crop System Fruit Quality, Carotenoids, Fatty Acids and Phenolic Compounds in Cherry Tomatoes. *Agricultural Research*, 10(1), 56-65. <https://doi.org/10.1007/s40003-020-00478-z>
- Fish, W. W., Perkins-Veazie, P., & Collins, J. K. (2002). A Quantitative Assay for Lycopene That Utilizes Reduced Volumes of Organic Solvents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15(3), 309-317. <https://doi.org/10.1006/jfca.2002.1069>
- Flores, L., & Edwards, M. (2019). A Historical Overview of Protected Agriculture in the State of Sinaloa, Mexico: Implications for Improving Rural Prosperity. *Journal of International Agricultural and Extension Education*, 26, 7. <https://doi.org/10.5191/jiaee.2019.26301>
- Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Segura-Castruita, M. A., Mendoza-Tacuba, L., Gallegos-Robles, M. A., Hernández, J. L. G., & Vásquez-Vásquez, C. (2018). Changes in nutraceutical quality of tomato under different organic substrates. *Horticultura Brasileira*, 36(2), 189-194. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620180207>
- Fuentes-Peñailillo, F., Gutter, K., Vega, R., & Silva, G. C. (2024). New Generation Sustainable Technologies for Soilless Vegetable Production. *Horticulturae*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010049>
- Gruda, N. (2009). *Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables?* 82. 141-147. <https://doi.org/10.18452/9433>
- Haghighi, M., & Teixeira Da Silva, J. A. (2013). Amendment of hydroponic nutrient solution with humic acid and glutamic acid in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) culture. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(4), 642-648. <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.809599>
- Igbokwe, G. E., & Anagonye, C. O. (2013). Determination of  $\beta$ -Carotene & Vitamin C content of Fresh Green Pepper (*Capsicum annum*), Fresh Red Pepper (*Capsicum annum*) and Fresh Tomatoes (*Solanum lycopersicum*) Fruits. *The Bioscientist Journal*, 1(1), Article 1.
- Karaca, C., Aslan, G. E., Buyuktas, D., Kurunc, A., Bastug, R., & Navarro, A. (2023). Effects of Salinity Stress on Drip-Irrigated Tomatoes Grown under Mediterranean-Type Greenhouse Conditions. *Agronomy*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010036>
- Kaur, H., Bedi, S., Sethi, V. P., & Dhatt, A. S. (2018). Effects of substrate hydroponic systems and different N and K ratios on yield and quality of tomato fruit. *Journal of Plant Nutrition*, 41(12), 1547-1554. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1459689>
- Khan, M. A., Butt, S. J., Khan, K. A., Nadeem, F., Yousaf, B., & Javed, H. U. (2017). Morphological and physico-biochemical characterization of various tomato cultivars in a simplified soilless media. *Annals of Agricultural Sciences*, 62(2), 139-143. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2017.10.001>
- Khanbabaloo, N., Seyed Hajizadeh, H., & Behtash, F. (2018). Effects of salinity on taste quality and biochemical traits of four tomato varieties (*Solanum lycopersicum*) grown under hydroponic conditions. *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 1(Issue 1), 15-26. <https://doi.org/10.22077/jhpr.2018.1096.1000>
- Lipan, L., Issa-Issa, H., Moriana, A., Zurita, N. M., Galindo, A., Martín-Palomo, M. J., Andreu, L., Carbonell-Barrachina, Á. A., Hernández, F., & Corell, M. (2021). Scheduling Regulated Deficit Irrigation with Leaf Water Potential of Cherry Tomato in Greenhouse and its Effect on Fruit Quality. *Agriculture*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070669>
- Lu, T., Yu, H., Wang, T., Zhang, T., Shi, C., & Jiang, W. (2022). Influence of the Electrical Conductivity of the Nutrient Solution in Different Phenological Stages on the Growth and Yield of Cherry Tomato. *Horticulturae*, 8(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050378>
- Mitsanis, C., Aktsoylou, D. C., Koukounaras, A., Tsouvaltzis, P., Koufakis, T., Gerasopoulos, D., & Siomos, A. S. (2021). Functional, Flavor and Visual Traits of Hydroponically Produced

- Tomato Fruit in Relation to Substrate, Plant Training System and Harvesting Time. *Horticulturae*, 7(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090311>
- Mngoma, M. F., Magwaza, L. S., Sithole, N. J., Magwaza, S. T., Mditshwa, A., Tesfay, S. Z., & Ncama, K. (2022). Effects of stem training on the physiology, growth, and yield responses of indeterminate tomato (*Solanum lycopersicum*) plants grown in protected cultivation. *Heliyon*, 8(5), e09343. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09343>
- Nour, V., Ionica, M. E., & Trandafir, I. (2015). Bioactive Compounds, Antioxidant Activity and Color of Hydroponic Tomato Fruits at Different Stages of Ripening. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 43(2), 404-412. <https://doi.org/10.15835/nbha43210081>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2023). Datos de producción agrícola y alimentación mundial. Statistical YearBook. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/>
- Olagunju, S. O., Sosanya, O. S., Oguntade, O. A., Adewusi, K. M., Soremi, P. A. S., Joda, A. O., & Nassir, A. L. (2023). Effect of NPK fertiliser on upper and basal stem diameters and implication on growth habit of tomato. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 23(1), <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.09.002>
- Olle, M., Ngouajio, M., & Siomos, A. (2012). *Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: A review*. 99(4).
- Orona-Castillo, I., Del-Toro-Sánchez, C. L., Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Espinoza-Arellano, J. J., Rueda-Puente, E., Flores-Vázquez, M., & Cano-Ríos, P. (2022). Indicadores técnico-económicos de la producción del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México. *Biocencia*, 24(3), 70-76. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v24i3.1721>
- Perveen, R., Suleria, H. A. R., Anjum, F. M., Butt, M. S., Pasha, I., & Ahmad, S. (2015). Tomato (*Solanum lycopersicum*) Carotenoids and Lycopenes Chemistry; Metabolism, Absorption, Nutrition, and Allied Health Claims—A Comprehensive Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(7), 919-929. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.657809>
- Putti, F. F., de Queiroz Barcelos, J. P., Goes, B. C., Alves, R. F., Neto, M. M., da Silva, A. O., Filho, L. R. A. G., Zanetti, W. A. L., & de Souza, A. V. (2023). Effects of Water Deficit on Growth and Productivity in Tomato Crops Irrigated with Water Treated with Very Low-Frequency Electromagnetic Resonance Fields. *Plants*, 12(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/plants12213721>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10), 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rusu, O.-R., Mangalagiu, I., Amăriucăi-Mantu, D., Teliban, G.-C., Cojocaru, A., Burducea, M., Mihalache, G., Roșca, M., Caruso, G., Sekara, A., & Stoleru, V. (2023). Interaction Effects of Cultivars and Nutrition on Quality and Yield of Tomato. *Horticulturae*, 9(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9050541>
- Schwarz, K., Resende, J. T. V. de, Preczenhak, A. P., Paula, J. T. de, Faria, M. V., & Dias, D. M. (2013). Desempenho agrônomo e qualidade físico-química de híbridos de tomateiro em cultivo rasteiro. *Horticultura Brasileira*, 31 (3), 410-418. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000300011>
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. (2019). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364-371. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- Siddiqui, M. W., Ayala-Zavala, J. F., & Dhua, R. S. (2015). Genotypic Variation in Tomatoes Affecting Processing and Antioxidant Attributes. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(13), 1819-1835. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.710278>
- Sronsri, C., Sittipol, W., & U-yen, K. (2022). Quantity and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown by a circulating hydroponic method with a Halbach array magnetizer. *Journal of Food Composition and Analysis*, 108, 104460. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104460>
- Swain, A., Roy, A., Biswas, A., Chatterjee, S., & Viswanath, M. (2021). Hydroponics in vegetable crops: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 10(06), 629-634.

- Szekely, I., & Jijakli, M. H. (2022). Bioponics as a Promising Approach to Sustainable Agriculture: A Review of the Main Methods for Producing Organic Nutrient Solution for Hydroponics. *Water*, 14(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/w14233975>
- Toscano, S., Trivellini, A., Cocetta, G., Bulgari, R., Francini, A., Romano, D., & Ferrante, A. (2019). Effect of Preharvest Abiotic Stresses on the Accumulation of Bioactive Compounds in Horticultural Produce. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2019.01212>
- Urrestarazu, M. (2013). State Of The Art And New Trends Of Soilless Culture In Spain And In Emerging Countries. *Acta Horticulturae*, 1013, 305-312. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1013.37>
- Velázquez-González, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sanchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium- and Small-Scale Operations. *Agriculture*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>
- Verdoliva, S. G., Gwyn-Jones, D., Detheridge, A., & Robson, P. (2021). Controlled comparisons between soil and hydroponic systems reveal increased water use efficiency and higher lycopene and  $\beta$ -carotene contents in hydroponically grown tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 279, 109896. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109896>
- Vicente, M. H., Zsögön, A., de Sá, A. F. L., Ribeiro, R. V., & Peres, L. E. P. (2015). Semi-determinate growth habit adjusts the vegetative-to-reproductive balance and increases productivity and water-use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Plant Physiology*, 177, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.01.003>
- Xue, T., Hartikainen, H., & Piironen, V. (2001). Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. *Plant and Soil*, 237(1), 55-61. <https://doi.org/10.1023/A:1013369804867>
- Yactayo-Chang, J. P., Acosta-Gamboa, L. M., Nepal, N., & Lorence, A. (2017). The Role of Plant High-Throughput Phenotyping in the Characterization of the Response of High Ascorbate Plants to Abiotic Stresses. En M. A. Hossain, S. Munné-Bosch, D. J. Burritt, P. Diaz-Vivancos, M. Fujita, & A. Lorence (Eds.), *Ascorbic Acid in Plant Growth, Development and Stress Tolerance* (pp. 321-354). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74057-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74057-7_13)
- Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chemistry*, 64(4), 555-559. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)