e-ISSN: 2007-4034 / ISSN print: 1027-152X

Scientific article https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2023.10.009

Nutrient dynamics and yield of tomato with different fertilizer sources and nutrient solution concentrations

Dinámica nutrimental y rendimiento de jitomate con distintas fuentes fertilizantes y concentraciones de solución nutritiva

Felipe Sánchez-del Castillo; Esaú del Carmen Moreno-Pérez*; Joel Pineda-Pineda; Luis Alberto Aragón-Ramírez

Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.
*Corresponding author: esaump10@yahoo.com.mx

Abstract

The cost of highly soluble fertilizers has increased in recent years, impacting on the economic profitability of crops grown in greenhouse hydroponic systems. The aim was to evaluate water and macronutrient consumption in tomato plants, to compare the yield when using a nutrient solution made with low-cost, poorly soluble fertilizers versus a high-cost, highly soluble conventional formulation, and to compare the use of a conventional nutrient solution at different concentrations. An 'El Cid' tomato crop cycle of 85 days from transplanting to harvest was established. Two nutrient solution formulations (conventional and alternative) were tested at two concentrations (100 and 80 %). Morphological variables, dry matter weight, yield, and nutrient dynamics of N, P, K, Ca and Mg were evaluated. A randomized complete block design with six replications was used. Treatments with conventional formulations had higher yields than those managed with less soluble sources (2.12 vs. 1.62 kg·plant^{-1}). The 80 % conventional formulation, with a yield of 2.11 kg·plant^{-1}, was the most cost-effective. To produce 1 kg of fruit, plants consumed 28.4 L of water and absorbed 1.58 g of N, 0.70 g of P, 3.17 g of K, 1.51 g of Ca and 0.60 g of Mg.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., soilless culture, nutrient solution, water and nutrient use efficiency.

Resumen

El costo de los fertilizantes altamente solubles ha incrementado en los últimos años, lo cual impacta en la rentabilidad económica de cultivos con sistemas hidropónicos bajo invernadero. El objetivo fue evaluar el consumo de agua y macronutrientes en plantas de jitomate, y comparar el rendimiento al utilizar una solución nutritiva elaborada con fertilizantes poco solubles de bajo costo respecto a una formulación convencional altamente solubles de alto costo; además, comparar el uso de una solución nutritiva convencional a diferentes concentraciones. Se estableció un ciclo de cultivo de jitomate 'El Cid' de 85 días de trasplante a fin de cosecha. Se probaron dos formulaciones de solución nutritiva (convencional y alternativa) a dos concentraciones (100 y 80 %). Se evaluaron variables morfológicas, peso de materia seca, rendimiento, y dinámica nutrimental de N, P, K, Ca y Mg. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con seis repeticiones. Los tratamientos con las formulaciones convencionales tuvieron mayor rendimiento que los manejados con fuentes menos solubles (2.12 contra 1.62 kg·planta^{-1}). La formulación convencional al 80 %, con un rendimiento de 2.11 kg·planta^{-1}, resultó la más rentable desde el punto de vista económico. Para producir 1 kg de fruto, las plantas consumieron 28.4 L de agua y absorbieron 1.58 g de N, 0.70 g de P, 3.17 g de K, 1.51 g de Ca y 0.60 g de Mg.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., cultivo sin suelo, solución nutritiva, eficiencia en el uso de agua y nutrimentos.

Please cite this article as follows (APA 7): Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Pineda-Pineda, J., & Aragón-Ramírez, L. A. (2024). Nutrient dynamics and yield of tomato with different fertilizer sources and nutrient solution concentrations. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 31,* e2023.009. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2023.10.009

Received: September 11, 2023 | **Accepted:** October 4, 2024 | **Published online (advanced):** December 5, 2024

Introduction

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the most widely grown vegetable under greenhouses and shade houses in Mexico (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2021). With the conventional management practiced by most companies in the country (population density of 2.5 to 3 plants·m^{-2} of greenhouse, a single crop cycle per year and intermediate-level technology), an average of 300 t·ha^{-1}·year^{-1} are produced (Castellanos & Borbón-Morales, 2009). In contrast, in Northern Europe and Canada, with hydroponic technology and high-tech greenhouses, yields exceeding 500 t·ha^{-1}·year^{-1} have been reported (Cheiri et al., 2018; Heuvelink et al., 2018), although with high production costs.

At the *Universidad Autónoma Chapingo*, Mexico, an alternative system for managing hydroponically-grown greenhouse tomatoes was developed, in which the time from transplanting to the end of harvest lasts four months, thus obtaining three crop cycles per year. To do this, transplanting is done with 45-day-old seedlings, 8 plants·m^{2} of greenhouse are established and the plants are tipped two leaves above the third inflorescence (Sánchez-del Castillo et al., 2012). This system obtains yields of 16 kg·m^{-2} in one crop cycle (Moreno-Pérez et al., 2021), which is equivalent to almost 500 t·ha^{-1}·year^{-1} if all three crop cycles are established.

In hydroponic systems that use substrate as a growing medium, drip irrigation is applied with a nutrient solution containing the essential minerals for optimum plant growth and development. The fertilizers used, especially when preparing concentrated nutrient solutions, are usually highly soluble and expensive; in fact, the cost has increased significantly in recent years. To reduce the cost of production in this regard, without reducing yield and quality, there are two alternatives: a) prepare the nutrient solution with less soluble fertilizers, with the same composition and nutrient concentration, but cheaper, and b) reduce the concentration of the nutrient solutions during some stage of the crop cycle, although this aspect has been little studied.

In the initial growth stage of a crop, the main cause of water loss is evaporation (López-López et al., 2009), due to the low leaf area index of the plant at that time (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). Some substrates, such as tezontle sand, have a rough structure (Ponce-Lira et al., 2013) and a high surface area exposed to air and sun, which increases evaporation. If these types of substrates are not irrigated constantly and uniformly over their entire surface (as is often the case with drip irrigation), areas

Introducción

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más cultivada bajo invernadero y casas sombra en México (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2021). Con el manejo convencional que se practica por la mayoría de las empresas en el país (densidad de población de 2.5 a 3 plantas·m^{-2} de invernadero, un solo ciclo de cultivo al año y tecnología intermedia) se producen, en promedio, 300 t·ha^{-1}·año^{-1} (Castellanos & Borbón-Morales, 2009). En contraste, en Europa del Norte y Canadá, con tecnología hidropónica e invernaderos altamente tecnificados, se han reportado rendimientos que superan las 500 t·ha^{-1}·año^{-1} (Cheiri et al., 2018; Heuvelink et al., 2018), aunque con costos de producción elevados.

En la Universidad Autónoma Chapingo, México, se desarrolló un sistema alternativo de manejo de jitomate en hidroponía bajo invernadero, en el cual el tiempo de trasplante a fin de cosecha dura cuatro meses, con lo que se obtienen tres ciclos de cultivo por año. Para ello, el trasplante se hace con plántulas de 45 días de edad, se establecen 8 plantas·m^{2} de invernadero y las plantas se despuntan dos hojas por arriba de la tercera inflorescencia (Sánchez-del Castillo et al., 2012). Con dicho sistema, se obtienen rendimientos de 16 kg·m^{-2} en un ciclo de cultivo (Moreno-Pérez et al., 2021), lo cual equivale a casi 500 t·ha^{-1}·año^{-1} si se establecen los tres ciclos de cultivo.

En los sistemas hidropónicos que utilizan sustrato como medio de cultivo, se aplica el riego por goteo con una solución nutritiva que contiene los minerales esenciales para el óptimo crecimiento y desarrollo de las plantas. Los fertilizantes que se utilizan, sobre todo cuando se preparan soluciones nutritivas concentradas, normalmente son altamente solubles y costosos, lo cual ha incrementado notablemente en los últimos años. Para reducir el costo de producción por este concepto, sin que haya una disminución del rendimiento y la calidad, existen dos alternativas: a) preparar la solución nutritiva con fertilizantes menos solubles, con la misma composición y concentración nutrimental, pero más económicos, y b) reducir la concentración de las soluciones nutritivas durante alguna etapa del ciclo de cultivo, aunque este aspecto ha sido poco estudiado.

En la etapa inicial de crecimiento de un cultivo, la principal causa de pérdida de agua es la evaporación (López-López et al., 2009), debido al bajo índice de área foliar de la planta en ese momento (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). Algunos sustratos, como la arena de tezontle, presentan una estructura rugosa (Ponce-Lira et al., 2013) y elevada área superficial expuesta al aire y al sol, lo cual aumenta la evaporación. Si este tipo de sustratos no se irrigan

with greater evaporation remain, leaving them dry or partially dry. This causes the localized accumulation of precipitated or fixed nutrients from the nutrient solution in significant quantities, which reduces the efficiency of nutrient uptake by the plant (Sánchez-del Castillo et al., 2021). In this regard, it is necessary to develop research that explores nutrient dynamics in tomato plants to optimize the use of water and fertilizers, and reduce production costs.

Based on the above, this study aimed to: evaluate water and macronutrient consumption in tomato plants; compare the yield obtained by using a nutrient solution made with poorly soluble, low-cost fertilizers versus a conventional solution formulated with highly soluble fertilizers of higher cost; and compare the use of a conventional nutrient solution at 100 % concentration against one at 80 %, and another with a variable concentration of nutrients according to the phenological stage of the plant.

Materials and methods

The experiment was established in a greenhouse belonging to the Postgraduate Program in Horticulture of the *Universidad Autónoma Chapingo*, located in Texcoco, State of Mexico. The Harris Moran seed company's 'El Cid' F1 cultivar, which has a saladette-type tomato and an indeterminate growth habit, was used. Sowing was done in 60-cavity trays with a volume of 250 cm^3 per cavity. The substrate used was a mixture of peat moss and perlite (1:1 by volume). During the first eight days after sowing (das), it was irrigated with water; subsequently, irrigation was carried out with 50 % nutrient solution until 45 das. The 100 % nutrient solution contained the following elements and concentrations ($mg \cdot L^{-1}$): N = 200, P = 50, K = 250, Ca = 230, S = 150, Mg = 50, Fe = 2, Mn = 1, B = 0.5, Cu = 0.1 and Zn = 0.1, as proposed by Sánchez-del Castillo et al. (2012) for tomato cultivation.

Transplanting was carried out at 45 das in cultivation trays made of galvanized sheet metal measuring 20 cm wide × 1 m long and 24 cm deep, previously lined on the inside with 150 µm thick black plastic and filled with red tezontle sand with particle size between 1 and 3 mm in diameter. Each tray was fitted with an outlet pipe to collect the excess nutrient solution after each irrigation.

A randomized complete block experimental design with six replications was used. Six treatments were compared, resulting from the combination of three concentrations of the nutrient solution (100 %, 80 % and one with a variable concentration according to the phenological stage) and two fertilizer formulations (conventional and alternative). The treatments were

de manera constante y uniforme en toda su superficie (como suele suceder con el riego por goteo) quedan áreas con mayor evaporación, dejándolas secas o parcialmente secas. Esto provoca la acumulación localizada de nutrientes precipitados o fijados de la solución nutritiva en cantidades importantes, lo cual reduce la eficiencia de absorción nutrimental por la planta (Sánchez-del Castillo et al., 2021). Al respecto, es necesario desarrollar investigaciones que exploren la dinámica de nutrientes en plantas de jitomate para optimizar el uso de agua y fertilizantes, y reducir los costos de producción.

Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el consumo de agua y macronutrientes en plantas de jitomate, y comparar el rendimiento obtenido al utilizar una solución nutritiva elaborada con fertilizantes de baja solubilidad y costo reducido, frente a una solución convencional formulada con fertilizantes altamente solubles de mayor costo. Adicionalmente, comparar el uso de una solución nutritiva convencional al 100 % de concentración contra una al 80 %, y otra con una concentración variable de nutrientes según la etapa fenológica de la planta.

Materiales y métodos

El experimento se estableció en un invernadero del Posgrado de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, localizada en Texcoco, Estado de México. Se empleó el cultivar 'El Cid' F1 de la empresa Harris Moran, de tipo saladette y hábito de crecimiento indeterminado. La siembra se realizó en charolas de 60 cavidades con un volumen de 250 cm^3 por cavidad. El sustrato utilizado fue una mezcla de turba vegetal-perlita (1:1 con base en volumen). Durante los primeros ocho días después de la siembra (dds), se regó con agua; posteriormente, el riego se realizó con solución nutritiva al 50 % hasta los 45 dds. La solución nutritiva al 100 % contenía los siguientes elementos y concentraciones ($mg \cdot L^{-1}$): N = 200, P = 50, K = 250, Ca = 230, S = 150, Mg = 50, Fe = 2, Mn = 1, B = 0.5, Cu = 0.1 y Zn = 0.1, tal como lo proponen Sánchez-del Castillo et al. (2012) para el cultivo de jitomate.

El trasplante se realizó a los 45 dds en tinas de cultivo construidas con lámina galvanizada de 20 cm de ancho × 1 m de largo y 24 cm de profundidad, forradas previamente en su interior con plástico negro de 150 µm de grosor y llenadas con arena de tezontle rojo con tamaño de partícula entre 1 y 3 mm de diámetro. A cada tina se le colocó un tubo de salida para colectar la solución nutritiva excedente después de cada riego.

El diseño experimental fue bloques completos al azar con seis repeticiones. Se compararon seis tratamientos, resultantes de la combinación de tres

applied from transplanting to the end of harvest. The 100 % conventional formulation contained the macro and micronutrients in the concentrations indicated above, provided by calcium nitrate, 85 % phosphoric acid, potassium sulfate, magnesium sulfate, ferrous sulfate, manganese sulfate, sodium tetraborate, copper sulfate and zinc sulfate. The alternative formulation was prepared with the same concentrations of macronutrients, but from less soluble and cheaper fertilizer sources: ammonium nitrate, simple calcium superphosphate, potassium chloride and calcium chloride, while the sources of magnesium and micronutrients were the same as in the conventional nutrient solution.

Treatments with variable concentrations of the nutrient solution (conventional and alternative) depending on the phenological stage were applied as follows: from transplanting to anthesis (50 % of the flowers of the first cluster), a 60 % concentration of all macronutrients was used, except N, which was applied at 100 %. From anthesis to fruit set of the third cluster, an 80 % concentration of all macronutrients was used, keeping N at 100 %, and from this stage until the end of harvest, all nutrients were applied at a 100 % concentration. Micronutrients were supplied at 100 % throughout the cycle.

The experimental unit consisted of eight plants established in two contiguous cultivation beds. Four plants were established in each tray at a distance of 20 cm between plants and 25 cm between rows. There were 50 cm aisles between the sets of trays, resulting in a population density of 9 plants·m^{-2} of greenhouse.

For each nutrient solution formulation, a 200 L plastic barrel was used. Irrigation was carried out using drip tape with integrated drippers every 20 cm. Throughout the crop cycle, three to five irrigations were applied per day depending on the environmental conditions and the phenological stage of the plants. Over-irrigation was used to allow drainage of between 10 and 20 % of the volume of the solution applied during the day to maintain a constant electrical conductivity (EC) in the rhizosphere (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). The nutrient solution that drained off due to over-irrigation was collected in plastic containers, and its volume, pH and EC were measured daily. With this information, a weekly count was made of the nutrient solution supplied and the volume of nutrient solution drained from the trays of each treatment throughout the crop cycle.

The plants were trained to a single stem, and the tipping (removal of the terminal bud) was done two leaves above the third inflorescence in order to harvest only three clusters per plant.

concentraciones de la solución nutritiva (100 %, 80 % y una con concentración variable según la etapa fenológica) y dos formulaciones de fertilizantes (convencional y alternativa). Los tratamientos se aplicaron desde el trasplante hasta fin de la cosecha. La formulación convencional al 100 % contenía los macro y micronutrientes en las concentraciones indicadas anteriormente, aportados mediante nitrato de calcio, ácido fosfórico al 85 %, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, sulfato ferroso, sulfato de manganeso, tetraborato de sodio, sulfato de cobre y sulfato de zinc. La formulación alternativa se preparó con las mismas concentraciones de macronutrientes, pero a partir de fuentes fertilizantes menos solubles y de menor precio: nitrato de amonio, superfosfato de calcio simple, cloruro de potasio y cloruro de calcio, mientras que las fuentes de magnesio y micronutrientes fueron las mismas que en la solución nutritiva convencional.

Los tratamientos con concentración variable de la solución nutritiva (convencional y alternativa) según la etapa fenológica se aplicaron de la siguiente manera: desde el trasplante hasta antesis (50 % de las flores del primer racimo) se usó una concentración al 60 % de todos los macronutrientes, excepto el N que se aplicó al 100 %. De antesis hasta el amarre de los frutos del tercer racimo, se usó 80 % de concentración de todos los macronutrientes, manteniendo el N al 100 %, y de esta etapa hasta el final de la cosecha, todos los nutrientes se aplicaron al 100 % de concentración. Los micronutrientes se suministraron al 100 % durante todo el ciclo.

La unidad experimental constó de ocho plantas establecidas en dos tinas de cultivo contiguas. En cada tina se establecieron cuatro plantas a una distancia de 20 cm entre plantas y 25 cm entre hileras. Entre los juegos de tinas se tenían pasillos de 50 cm, lo cual resultó en una densidad de población de 9 plantas·m^{-2} de invernadero.

Para cada formulación de solución nutritiva se utilizó un tinaco de 200 L de capacidad. El riego se realizó mediante cintillas con goteros integrados cada 20 cm. A lo largo del ciclo de cultivo, se aplicaron de tres a cinco riegos por día según las condiciones ambientales y la etapa fenológica de las plantas. Se procuró dar sobre-riegos que permitieran drenar entre el 10 y 20 % del volumen de la solución aplicada durante el día para mantener una conductividad eléctrica (CE) constante en la rizosfera (Sánchez-del Castillo & Moreno-Pérez, 2017). La solución nutritiva que drenaba por el sobre-riego se recolectó en contenedores plásticos, y diariamente se medía su volumen, pH y CE. Con esta información se tuvo un recuento semanal de la solución nutritiva aportada y del volumen de solución nutritiva drenada de las tinas de cada tratamiento durante todo el ciclo de cultivo.

Variables evaluated

1. Morphological variables. At the end of the crop cycle (130 das), the following were measured: plant height (cm) from the base to the tipping height (which was two leaves above the third inflorescence), stem diameter (mm) between the first and second inflorescence, and leaf area per plant (cm^2). This last variable was obtained by measuring the area of each leaf in a leaf area integrator (L-3000, Li-Cor ®, USA). Three plants per experimental unit were used to determine these variables.

2. Total dry weight per plant (g). It was obtained at the end of the crop cycle from a destructive sampling of three plants per experimental unit (the same ones used for the morphological variables).

3. Yield ($kg \cdot plant^{-1}$) and its components (number of fruits per plant and average fruit weight [g]).

4. Macronutrient balance in the system. At the end of the cycle (130 das), chemical analyses were performed on one plant per experimental unit of each replication to determine the amount of each macronutrient absorbed and its percentage of absorption with respect to the total supplied with the nutrient solution. Likewise, the amount and percentage of macronutrients leached and retained (fixed) by the substrate until the end of the crop cycle, as well as those resolubilized or volatilized, were determined.

5. Water use efficiency (WUE). This variable was determined based on the amount (L) of water required (applied) to produce 1 kg of fruit (ratio of L of water applied per plant/yield expressed in kg per plant).

6. Nutrient absorption efficiency (NAE). This was obtained by calculating the amount (g) absorbed of each macronutrient per kilogram of fruit produced (ratio of nutrients absorbed by the plant/yield expressed in kg per plant).

Statistical analysis

The data obtained were subjected to analysis of variance tests and Tukey's comparison of means ($P \leq 0.05$) using SAS statistical package ver. 9.1 (SAS Institute Inc., 2002). WUE and NAE were determined only for the 80 % conventional nutrient solution formulation.

Results and discussion

Morphological variables and dry weight

Both the analysis of variance (data not shown) and the comparison of means (Table 1) show that no

Las plantas se condujeron a un solo tallo, y el despunte (eliminación de la yema terminal) se hizo dos hojas por arriba de la tercera inflorescencia para cosechar sólo tres racimos por planta.

Variables evaluadas

1. Variables morfológicas. Al final del ciclo de cultivo (130 dds) se midió la altura de planta (cm) desde la base hasta la altura de poda (que fue dos hojas arriba de la tercera inflorescencia), diámetro de tallo (mm) medido entre la primera y segunda inflorescencia, y área foliar por planta (cm^2). Esta última variable se obtuvo al medir el área de cada hoja en un integrador de área foliar (L-3000, Li-Cor ®, EUA). Para determinar estas variables se usaron tres plantas por unidad experimental.

2. Peso seco total por planta (g). Se obtuvo al final del ciclo de cultivo a partir de un muestreo destructivo de tres plantas por unidad experimental (las mismas usadas para las variables morfológicas).

3. Rendimiento ($kg \cdot planta^{-1}$) y sus componentes (número de frutos por planta y peso medio de fruto [g]).

4. Balance de macronutrientes en el sistema. Al final del ciclo (130 dds), de una planta por unidad experimental de cada repetición, se realizaron análisis químicos para determinar la cantidad de cada macronutriente absorbido y su porcentaje de absorción respecto al total aportado con la solución nutritiva. Asimismo, se determinó la cantidad y porcentaje de macronutrientes lixiviados y retenidos (fijados) por el sustrato hasta el final del ciclo de cultivo, así como los resolubilizados o volatilizados.

5. Eficiencia de uso del agua (EUA). Esta variable se determinó con base en la cantidad (L) de agua requerida (aplicada) para producir 1 kg de fruto (relación de L de agua aplicada por planta/rendimiento expresado en kg por planta).

6. Eficiencia de absorción nutrimental (EAN). Esta se obtuvo al calcular la cantidad (g) absorbida de cada macronutriente por kilogramo de fruto producido (relación de nutrientes absorbidos por la planta/rendimiento expresado en kg por planta).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se sometieron a pruebas de análisis de varianza y comparaciones de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el paquete estadístico SAS ver. 9.1 (SAS Institute Inc., 2002). La EUA y la EAN se determinaron únicamente para la formulación convencional de la solución nutritiva al 80 %.

Table 1. Comparisons of means of morphological variables and dry matter weight of tomato plants grown with different formulations and concentrations of nutrient solution, at 130 days after sowing.

Cuadro 1. Comparaciones de medias de variables morfológicas y peso de materia seca de plantas de jitomate cultivadas con distintas formulaciones y concentraciones de solución nutritiva, a los 130 días después de la siembra.

Formulation / Formulación	Leaf area/plant (cm^2) / Área foliar/ planta (cm^2)	Plant height (cm) / Altura de planta (cm)	Stem diameter (mm) / Diámetro de tallo (mm)	Dry matter weight (g) / Peso de materia seca (g)
Conventional at 100 % / Convencional al 100 %	6,538 a	107 a	10.1 a	144.2 a
Conventional at 80 % / Convencional al 80 %	6,658 a	107 a	9.8 a	170.5 a
Conventional variable / Convencional variable	5,593 a	110 a	9.7 a	145.9 a
Alternative at 100 % / Alternativa al 100 %	5,349 a	107 a	10.2 a	120.8 a
Alternative at 80 % / Alternativa al 80 %	5,874 a	109 a	10.3 a	135.6 a
Alternative variable / Alternativa variable	6,151 a	110 a	10.5 a	150.5 a
HSD / DMSH	2,464	4.3	1.7	60.3

HSD = honestly significant difference. Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

DMSH = diferencia mínima significativa honesta. Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

morphological variable (plant height, stem diameter and leaf area), nor dry weight, presented significant statistical differences among treatments.

According to the leaf area obtained and the population density established, the leaf area index of the crop was between 4.7 and 5.8, which probably caused leaf shading. The index reached is slightly high for maximum photosynthesis and dry matter accumulation per day in tomato (Cheiri et al., 2018; Heuvelink & Dorais, 2005; Heuvelink et al., 2018). Dry matter weight per plant ranged between 120.8 and 170.5 g, with no statistical differences among treatments. Considering the above, it can be inferred that the change in fertilizer sources did not affect plant growth, and neither was it affected by decreasing the concentration by 20 % or by varying the concentration according to phenological stage. These results agree with those reported by Godoy-Hernández et al. (2009).

Yield and its components

Analysis of variance (data not shown) and comparison of means (Table 2) indicate that yield was significantly higher in plants grown with conventional formulations (2.1 kg·plant^{-1} on average), compared to plants grown with alternative formulations (1.6 kg·plant^{-1} on average). This difference was due to the higher number of fruits per plant obtained with conventional formulations (about four more fruits per plant), since the average fruit weight did not vary significantly among treatments. It should be noted that in this case

Resultados y discusión

Variables morfológicas y peso seco

Tanto el análisis de varianza (datos no presentados) como la comparación de medias (Cuadro 1) muestran que ninguna variable morfológica (altura de planta, diámetro de tallo y área foliar), ni el peso seco, presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos.

De acuerdo con el área foliar obtenida y la densidad de población establecida, el índice de área foliar del cultivo estuvo entre 4.7 y 5.8, lo cual probablemente provocó sombreado de las hojas. El índice alcanzado es ligeramente alto para una máxima fotosíntesis y para la acumulación de materia seca por día en jitomate (Cheiri et al., 2018; Heuvelink & Dorais, 2005; Heuvelink et al., 2018). El peso de materia seca por planta osciló entre 120.8 y 170.5 g, sin diferencias estadísticas entre tratamientos. Considerando lo anterior, se puede inferir que el cambio de fuentes de fertilizantes no afectó el crecimiento de la planta, y tampoco lo afectó al disminuir en 20 % la concentración o al variar la concentración según la etapa fenológica. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Godoy-Hernández et al. (2009).

Rendimiento y sus componentes

El análisis de varianza (datos no mostrados) y la comparación de medias (Cuadro 2) indican que el

Table 2. Comparison of means of commercial yield per tomato plant and its components with different formulations and concentrations of nutrient solution.

Cuadro 2. Comparación de medias del rendimiento comercial por planta de jitomate y sus componentes con distintas formulaciones y concentraciones de solución nutritiva.

Formulation / Formulación	Fruits/plant / Frutos/planta	Average fruit weight (g) / Peso medio de fruto (g)	Yield (kg·plant^{-1}) / Rendimiento (kg·planta^{-1})
Conventional at 100 % / Convencional al 100 %	19.8 ab	102 a	2.03 ab
Conventional at 80 % / Convencional al 80 %	19.8 ab	107 a	2.11 a
Conventional variable / Convencional variable	20.4 a	106 a	2.16 a
Alternative at 100 % / Alternativa al 100 %	16.2 abc	98 a	1.58 c
Alternative at 80 % / Alternativa al 80 %	15.7 bc	107 a	1.68 bc
Alternative variable / Alternativa variable	15.0 c	106 a	1.58 c
HSD / DMSH	4.3	9.4	0.41

HSD = honestly significant difference. Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

DMSH = diferencia mínima significativa honesta. Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

only commercial fruits were considered, i.e., without damage from blossom end rot.

The lower number of commercial fruits obtained in plants grown with the alternative formulations was due to the presence of fruits affected by blossom end rot, a physiological disorder caused by a localized calcium deficiency. This probably occurred because calcium was supplied mainly in the form of simple calcium superphosphate (low-solubility fertilizer) (Sánchez-del Castillo & Escalante-Rebolledo, 1988), which resulted in non-commercial fruits. The calcium deficiency could also be explained by the use of N-NH_4^+ in 50 % of the N contribution in conventional formulations, which, due to its positive charge, competes strongly with Ca^{2+} uptake by the root (Resh, 2013; Sonneveld & Voogt, 2009; Wallace & Muller, 2008). Likewise, a high K:Ca ratio can negatively affect Ca uptake, since both cations compete during root uptake and K^+, being monovalent, is absorbed faster than Ca^{2+}, which is divalent (Malvi, 2011; Sonneveld & Voogt, 2009). In conventional formulations, calcium was supplied as calcium nitrate, a highly soluble fertilizer, so no blossom end rot was observed in the fruits.

Regarding the concentration of the nutrient solution (100 and 80 %) in both formulations (conventional and alternative), the results show that it is possible to use a solution with a lower concentration without affecting yield or average fruit weight, as long as the same fertilizer sources and the same daily volume of nutrient solution are maintained (Table 2), since yield

rendimiento fue significativamente mayor en las plantas cultivadas con las formulaciones convencionales (2.1 kg·planta^{-1} en promedio), en comparación con las plantas cultivadas con las formulaciones alternativas (1.6 kg·planta^{-1} en promedio). Esta diferencia se debió al mayor número de frutos por planta obtenido con las formulaciones convencionales (alrededor de cuatro frutos más por planta), ya que el peso medio de fruto no varió significativamente entre tratamientos. Cabe señalar que en este caso únicamente se consideraron los frutos comerciales; es decir, sin daño por pudrición apical.

El menor número de frutos comerciales obtenido en las plantas cultivadas con las formulaciones alternativas se debió a la presencia de frutos afectados por pudrición apical, desorden fisiológico provocado por una deficiencia localizada de calcio. Esto probablemente ocurrió porque el calcio se suministró, principalmente, en forma de superfosfato de calcio simple (fertilizante de baja solubilidad) (Sánchez-del Castillo & Escalante-Rebolledo, 1988), lo cual resultó en frutos no comerciales. La deficiencia de calcio también se podría explicar por el uso de N-NH_4^+ en un 50 % de la aportación de N en las formulaciones convencionales, el cual, por su carga positiva, compite fuertemente con la absorción de Ca^{2+} por la raíz (Resh, 2013; Sonneveld & Voogt, 2009; Wallace & Muller, 2008). Asimismo, una alta relación K:Ca puede afectar negativamente la absorción de Ca, ya que ambos cationes compiten durante la absorción por la raíz y el K^+, al ser monovalente, es absorbido más rápidamente que el Ca^{2+}, que es divalente (Malvi, 2011; Sonneveld &

was statistically equal with both concentrations. In a similar study, Suazo-López et al. (2014) also found no significant differences in concentrations at 75 % compared to 100 %.

From an economic point of view, the above translates into fertilizer savings for the producer. From an environmental perspective, it would increase NAE, reduce leaching losses (Rodríguez-Jurado et al., 2020) and, thus, decrease the pollution of the water table, particularly in open hydroponic systems, which are the most commonly used.

Nutrient solution consumed by plants

The volume of nutrient solution consumed (nutrient solution supplied minus that drained) during the 85 days from transplanting to the end of harvest was statistically the same in all treatments (Table 3). Water consumption ranged from 59 to 65 L·plant^{-1}, which is equivalent to an average daily expenditure of 0.73 L·plant^{-1}.

Since the 80 % formulations had lower nutrient concentrations than the 100 % formulations, N, P, K, Ca and Mg consumption was also lower. The consumption of P, Ca and Mg was statistically lower in the formulations that varied according to the phenological stage compared to the 100 % one, since during one third of the crop cycle they were managed at 50 % and another third at 80 % of their normal concentration.

Voogt, 2009). En las formulaciones convencionales, el calcio se aportó como nitrato de calcio, un fertilizante altamente soluble, por lo que no se observó pudrición apical en los frutos.

En cuanto a la concentración de la solución nutritiva (100 y 80 %) en ambas formulaciones (convencional y alternativa), los resultados muestran que es posible utilizar una solución con menor concentración sin afectar el rendimiento ni el peso medio de los frutos, siempre que se mantengan las mismas fuentes de fertilizantes y el mismo volumen diario de solución nutritiva (Cuadro 2), ya que el rendimiento fue estadísticamente igual con ambas concentraciones. En un estudio similar, Suazo-López et al. (2014) tampoco encontraron diferencias significativas en concentraciones al 75 % respecto al 100 %.

Desde el punto de vista económico, lo anterior se traduce en un ahorro en fertilizantes para el productor. Desde una perspectiva ambiental, aumentaría la EAN, reducirían las pérdidas por lixiviación (Rodríguez-Jurado et al., 2020) y, con ello, disminuiría la contaminación del manto freático, particularmente en los sistemas hidropónicos abiertos que son los más utilizados.

Solución nutritiva consumida por las plantas

El volumen de solución nutritiva consumida (solución nutritiva aportada menos la drenada), durante los 85 días de trasplante a fin de la cosecha, fue

Table 3. Comparison of means of nutrient solution consumed (water and macronutrients) in tomato plants at 130 days after sowing, with different formulations and concentrations.

Cuadro 3. Comparación de medias de la solución nutritiva consumida (agua y macronutrientes) en plantas de jitomate a los 130 días después de la siembra, con distintas formulaciones y concentraciones.

Formulation / Formulación	Water (L·plant^{-1}) / Agua (L·planta^{-1})	N (g)	P (g)	K (g)	Ca (g)	Mg (g)
Conventional at 100 % / Convencional al 100 %	62 a	12.4 a	3.1 a	15.5 a	15.5 a	3.1 a
Conventional at 80 % / Convencional al 80 %	60 a	9.5 b	2.4 d	11.9 b	11.9 d	2.4 d
Conventional variable / Convencional variable	64 a	12.7 a	2.7 bcd	15.4 a	13.4 bc	2.7 bcd
Alternative at 100 % / Alternativa al 100 %	59 a	11.8 a	3.0 ab	14.8 a	14.8 ab	3.0 ab
Alternative at 80 % / Alternativa al 80 %	62 a	9.9 b	2.5 cd	12.4 b	12.4 cd	2.5 cd
Alternative variable / Alternativa variable	65 a	12.9 a	2.7 bc	15.5 a	13.6 bc	2.7 bc
HSD / DMSH	6.8	1.26	0.31	1.57	1.52	0.31

HSD = honestly significant difference. Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

DMSH = diferencia mínima significativa honesta. Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

With the conventional formulation at 100 %, the cost per m^3 was $60.00 MXN, while at 80 % the cost was $48.00 MXN. If an expenditure of 0.67 m^3 of nutrient solution per m^2 per cycle is considered, under the system proposed by Sánchez-del Castillo et al. (2012) of three crop cycles per year (Table 3), at a commercial scale of 1 ha, the consumption would be 20,100 m^3 of nutrient solution per year, with a fertilizer cost of $1,206,000.00 MXN. If the 80 % solution is applied, the same yield and average fruit weight values are obtained, but at a cost of $964,800.00 MXN; that is, it represents an annual saving of $241,200.00 MXN in fertilizers.

The 80 % alternative solution had a cost close to $30.00 MXN per m^3, which meant a potential fertilizer saving of $600,000.00 MXN per hectare per year compared to the conventional formulation at the same concentration. However, the higher yield and quality obtained with the conventional formulation makes it economically more cost-effective.

Nutrient balance in the system

Table 4 shows the amounts of macronutrients (N, P, K, Ca and Mg) supplied with the 80 % conventional nutrient solution, which was the most economically advantageous. The nutrients absorbed by the plant, leached, resolubilized, and retained or volatilized are also reported. The table shows that, of the total N supplied, the plant absorbed about 30 %, 7 % was leached and 3 % was resolubilized. Part of the remaining 60 % of N was retained in the substrate and another part was lost through volatilization. Pineda-Pineda et al. (2011), in a similar study on tomato, recorded plant N uptake values of 25 % at 40 days after transplanting (dat), 47 % at 59 dat and 80 % at 74 dat (1.9 % stored in the substrate and 18 % lost to drainage). Sonneveld and Voogt (2009) reported that N uptake in a tomato crop in a greenhouse substrate, under free-draining conditions, can be up to 57 %.

estadísticamente igual en todos los tratamientos (Cuadro 3). El consumo de agua varió de 59 a 65 L·planta^{-1}, lo cual equivale a un gasto promedio diario de 0.73 L·planta^{-1}.

Como las formulaciones al 80 % tenían menor concentración de nutrientes que las formulaciones al 100 %, el gasto de N, P, K, Ca y Mg también fue menor. El consumo de P, Ca y Mg resultó estadísticamente menor en las formulaciones que variaron de acuerdo con la etapa fenológica en comparación con la de 100 %, ya que durante un tercio del ciclo del cultivo se manejaron al 50 % y otro tercio al 80 % de su concentración normal.

Con la formulación convencional al 100 %, el costo por m^3 fue de $60.00 MXN, mientas que al 80 % el costo fue de $48.00 MXN. Si se considera un gasto de 0.67 m^3 de solución nutritiva por m^2 por ciclo, bajo el sistema propuesto por Sánchez-del Castillo et al. (2012) de tres ciclos de cultivo al año (Cuadro 3), a una escala comercial de 1 ha, el consumo sería de 20,100 m^3 de solución nutritiva al año, con un costo en fertilizantes de $1,206,000.00 MXN. Si se aplica la solución al 80 % se obtiene el mismo rendimiento y peso medio de fruto, pero con un costo de $964,800.00 MXN; es decir, representa un ahorro anual de $241,200.00 MXN en fertilizantes.

La solución alternativa al 80 % tuvo un costo cercano a $30.00 MXN por m^3, lo cual significó un ahorro potencial en fertilizantes de $600,000.00 MXN por hectárea al año respecto de la formulación convencional a la misma concentración. No obstante, el mayor rendimiento y calidad que se obtiene con la formulación convencional la hace económicamente más rentable.

Balance de nutrientes en el sistema

En el Cuadro 4 se muestran las cantidades de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) aportados con la solución nutritiva convencional al 80 %, que fue la que

Table 4. Macronutrient balance in g·plant^{-1} and in percentage (%) with respect to the total applied using a conventional nutrient solution at 80 % concentration in a tomato production system at 130 days after sowing.

Cuadro 4. Balance de macronutrientes en g·planta^{-1} y en porcentaje (%) respecto del total aplicado mediante una solución nutritiva convencional al 80 % de concentración en un sistema de producción de jitomate a los 130 días después de la siembra.

Nutrients / Nutrientes	Contributed / Aportado	Absorbed / Absorbido	Leached / Lixiviado	Resolubilized / Resolubilizado	Retained or gasified / Retenido o gasificado
N	11.1 (100)	3.34 ab (30)	0.83 bc (7)	0.29 b (3)	6.64 (60)
P	2.8 (100)	1.48 a (53)	0.08 a (3)	0.06 a (2)	1.18 (42)
*K	14.4 (100)	6.70 a (47)	2.16 d (15)	1.70 c (12)	3.84 (26)
*Ca	15.81 (100)	3.18 a (20)	5.08 ab (32)	1.98 c (12)	5.57 (36)
*Mg	3.8 (100)	1.26 a (33)	2.78 b (73)	0.68 b (18)	-0.92 (+24)

*For the analysis, the amounts of these nutrients present in the irrigation water were considered.

*Para el análisis se consideraron las cantidades de estos nutrientes presentes en el agua de riego.

The relatively low plant N uptake (30 %) may be related to the third cluster tipping at 80 dat, since, as plant growth stops, nutrient uptake is reduced (Terabayashi et al., 2004). According to Bock (1984), up to 50 % of the N lost may be through leaching, denitrification, or volatilization of NH_4^+ to NH_3. In the present study, it is possible that N losses from the substrate occurred through volatilization, a situation that can occur especially under alkaline conditions and high ambient temperatures (Mengel & Kirkby, 2001).

Van den Ende (1989) points out that there may be a percentage of N lost through denitrification if samples are left to air dry for a long period of time, a situation that occurred in this study, since the samples were left to dry for at least 20 days. In addition, plants can also release NH_3 into the atmosphere through stomata and cuticle (Marschner, 2012) during crop growth, especially if photorespiration is high (Taiz et al., 2017).

Of the total P supplied to the system, about 53 % was absorbed by the plant, 3 % was lost in the drainage, 2 % was resolubilized from the substrate, and 42 % was precipitated or adsorbed in the substrate. Pineda-Pineda et al. (2011) recorded 38 % of P absorbed by the tomato plant during vegetative development, 54.8 % retained in the substrate and 6.8 % lost in the drainage. Silber et al. (1999) point out that tezontle has the ability to adsorb or release nutrients, especially P, during the growth period of the plants.

K uptake by the plant was 47 % of the total applied, 15 % was lost in the drainage, 12 % was resolubilized and 26 % was precipitated or adsorbed in the substrate. Pineda-Pineda et al. (2011) recorded 39.3 % of K absorbed by the plant, 35.1 % retained in the substrate and 25.5 % lost in the drainage.

Of the total amount of Ca supplied to the system, 20 % was absorbed by the plant, 32 % leached, 12 % resolubilized and 36 % precipitated or adsorbed by the substrate. It is likely that the Ca reacted with P and S to form chemical precipitates, so a good part could not be resolubilized. Similarly, Pineda-Pineda et al. (2011) recorded 24.3 % Ca adsorbed by the plant, 38.8 % retained in the substrate and 36.8 % lost in the drainage.

The Mg absorbed by the plant with respect to the total amount supplied was 33 %. According to the results (Table 4), 73 % of the Mg was lost in the drainage and 18 % was resolubilized from the substrate, which resulted in 24 % more Mg in the system. It is likely that the extra Mg is a contribution from the tezontle and the water with which the nutrient solution was prepared, since its analysis reported 14.7 $mg \cdot L^{-1}$ of Mg. Due to its composition, tezontle is a substrate that corresponds

resultó con mayores ventajas económicas. Asimismo, se reportan los nutrientes absorbidos por la planta, lixiviados, resolubilizados, y retenidos o volatilizados. En dicho cuadro se observa que, del total del N aportado, la planta absorbió alrededor de 30 %, 7 % se lixivió y 3 % se resolubilizó. Una parte del 60 % del N restante se retuvo en el sustrato y otra parte se perdió por volatilización. Pineda-Pineda et al. (2011), en un estudio similar en jitomate, registraron valores de absorción de N por la planta de 25 % a los 40 días después del trasplante (ddt), de 47 % a los 59 ddt y de 80 % a los 74 ddt (1.9 % almacenado en el sustrato y 18 % perdido en el drenaje). Por su parte, Sonneveld y Voogt (2009) mencionan que la absorción de N en un cultivo de jitomate en sustrato en invernadero, bajo condiciones de libre drenaje, puede ser de hasta 57 %.

La relativa baja absorción de N por las plantas (30 %) puede estar relacionada con el despunte al tercer racimo realizado a los 80 ddt, ya que, al detenerse el crecimiento de la planta, la absorción de nutrientes se reduce (Terabayashi et al., 2004). De acuerdo con Bock (1984), hasta el 50 % del N que se pierde puede ser por lixiviación, desnitrificación o volatilización de NH_4^+ a NH_3. En el presente estudio, es posible que hayan ocurrido pérdidas de N del sustrato por volatilización, situación que se puede dar, especialmente, en condiciones alcalinas y temperaturas elevadas del ambiente (Mengel & Kirkby, 2001).

Van den Ende (1989) señala que puede existir un porcentaje de N perdido por desnitrificación si las muestras se dejan secar al aire por un largo periodo de tiempo, situación que sucedió en este estudio, ya que las muestras se dejaron secar por lo menos 20 días. Además, las plantas también pueden liberar NH_3 a la atmósfera a través de los estomas y la cutícula (Marschner, 2012) durante el crecimiento del cultivo, sobre todo si la fotorrespiración es alta (Taiz et al., 2017).

Del total de P aportado al sistema, alrededor del 53 % fue absorbido por la planta, 3 % se perdió en el drenaje, 2 % se resolubilizó del sustrato y 42 % quedó precipitado o adsorbido en el sustrato. Pineda-Pineda et al. (2011) registraron un 38 % de P absorbido por la planta de jitomate durante el desarrollo vegetativo, 54.8 % retenido en el sustrato y 6.8 % perdido en el drenaje. Silber et al. (1999) señalan que el tezontle posee la capacidad de adsorber o liberar nutrientes, especialmente P, durante el periodo de crecimiento de las plantas.

La absorción de K por la planta fue de 47 % del total aplicado, 15 % se perdió en el drenaje, 12 % se resolubilizó y 26 % quedó precipitado o adsorbido en el sustrato. Pineda-Pineda et al. (2011) registraron 39.3 % de K absorbido por la planta, 35.1 % retenido en el sustrato y 25.5 % perdido en el drenaje.

to the group of ferromagnesian minerals, mainly constituted by O, Si, Al, Fe, Mn, Ca and Mg (Raviv & Lieth, 2008; Trejo-Téllez et al., 2013). In addition, it has cation exchange capacity (Ponce-Lira et al., 2013), which is why, depending on the pH, it can adsorb or release nutrients (Silber et al., 1999).

Water use efficiency and nutrient uptake

The amount of water and nutrients required to produce 1 kg of tomato fruit was analyzed; for this purpose, the conventional formulation of an 80 % nutrient solution was considered, which was the most cost-effective. airrigation (nutrient solution) was 60 L (Table 3) and the yield obtained was 2.11 kg·plant^{-1} (Table 2), so 28.4 L of water were required to produce 1 kg of tomato fruit.

To obtain 1 kg of tomato fruit, Heuvelink and Dorais (2005) needed 40 L of water in an unheated plastic greenhouse in Spain, 22 L in a climate-controlled greenhouse in the Netherlands, and 15 L when reusing the nutrient solution (closed hydroponic system). Cunha-Chiamolera et al. (2017) report a WUE of at least 20 L·kg^{-1} of fruit. Rouphael et al. (2005) point out that the WUE in a soilless culture is related to the physical properties of the substrate, in particular to the readily available water content.

Although the WUE obtained in this study is within the range reported by other authors, the relatively low efficiency found may be due to the fact that tezontle, because of its high degree of roughness and particle size, has a large surface area (Ponce-Lira et al., 2013), which causes high evaporation rates. It should be noted that water is an increasingly limited resource for agricultural production, and in many regions of the world the limit of its use has been reached, so alternatives must be sought that make its use more efficient to avoid negative impacts on the environment (Salazar-Moreno et al., 2014).

According to the yield achieved (Table 2) and the amount of nutrients absorbed by the plant (Table 4) under the conventional system and the 80 % nutrient solution, it was found that to produce 1 kg of tomato the plants absorbed 1.58 g of N, 0.70 g of P, 3.17 g of K, 1.51 g of Ca and 0.60 g of Mg. Similar results were reported by Heuvelink and Dorais (2005) and Quesada-Roldán and Bertsch-Hernández (2013).

Conclusions

Nutrient solution formulations and concentrations had no effect on the morphological aspects or dry matter weight of the plants. However, the use of formulations with low-solubility fertilizer sources reduced the yield of commercial fruits per plant compared to nutrient

De la cantidad total de Ca aportada al sistema, el 20 % fue absorbido por la planta, 32 % lixiviado, 12 % resolubilizado y 36 % precipitado o adsorbido por el sustrato. Es probable que el Ca haya reaccionado con el P y el S para formar precipitados químicos, por lo que una buena parte no se pudo resolubilizar. De manera similar, Pineda-Pineda et al. (2011) registraron 24.3 % de Ca absorbido por la planta, 38.8 % retenido en el sustrato y 36.8 % perdido en el drenaje.

El Mg absorbido por la planta respecto del total aportado fue de 33 %. De acuerdo con los resultados (Cuadro 4), 73 % del Mg se perdió en el drenaje y 18 % se resolubilizó del sustrato, lo cual resultó en 24 % más de Mg en el sistema. Es probable que el Mg extra sea contribución del tezontle y del agua con la que se preparó la solución nutritiva, ya que su análisis reportó 14.7 mg·L^{-1} de Mg. Por su composición, el tezontle es un sustrato que corresponde al grupo de los minerales ferro-magnesianos, constituido principalmente por O, Si, Al, Fe, Mn, Ca y Mg (Raviv & Lieth, 2008; Trejo-Téllez et al., 2013). Además, posee capacidad de intercambio catiónico (Ponce-Lira et al., 2013), por lo cual, en función del pH, puede adsorber o liberar nutrientes (Silber et al., 1999).

Eficiencia de uso del agua y absorción de nutrientes

Se analizó la cantidad de agua y nutrientes necesarios para producir 1 kg de fruto de jitomate; para ello, se consideró la formulación convencional de una solución nutritiva al 80 %, que fue la que resultó más rentable. La cantidad de agua suministrada a cada planta a través del riego (solución nutritiva) fue de 60 L (Cuadro 3), y el rendimiento obtenido fue de 2.11 kg·planta^{-1} (Cuadro 2), por lo cual se requirieron 28.4 L de agua para producir 1 kg de fruto de jitomate.

Para obtener 1 kg de fruto de jitomate, Heuvelink y Dorais (2005) necesitaron 40 L de agua en un invernadero de plástico sin calefacción en España, 22 L en un invernadero con clima controlado en Holanda y 15 L cuando reutilizaron la solución nutritiva (sistema hidropónico cerrado). Por su parte, Cunha-Chiamolera et al. (2017) reportan una EUA de, al menos, 20 L·kg^{-1} de fruto. Rouphael et al. (2005) señalan que la EUA en un cultivo sin suelo está relacionada con las propiedades físicas del sustrato, en particular con el contenido de agua fácilmente disponible.

Aunque la EUA obtenida en este estudio se encuentra dentro del rango reportado por otros autores, la relativa baja eficiencia encontrada quizá se deba a que el tezontle, por su alta rugosidad y tamaño de partícula, presenta una elevada área superficial (Ponce-Lira et al., 2013), lo cual provoca altas tasas de evaporación. Cabe señalar que el agua es un recurso cada vez más limitado para la producción agrícola, y en muchas regiones del mundo se

solutions made with highly soluble fertilizers. In addition, it was shown that if the same fertilizer source and daily volume of nutrient solution are maintained, it is possible to use a concentration of 80 % without affecting fruit yield.

The variation in nutrient solution formulations based on phenological stage did not show significant fertilizer savings, nor did it have an impact on yield per plant or fruit size, compared to the 100 % conventional solution.

With the 80 % conventional nutrient solution, the nutrient uptake efficiency with respect to the total amount supplied from transplanting to the end of harvest (85 days) was 30, 53, 47, 20 and 33 % for N, P, K, Ca and Mg, respectively.

With the system at a high population density, tipping at the third cluster and use of highly soluble fertilizers at 80 % concentration, 28.4 L of water, as well as 1.58 g of N, 0.70 g of P, 3.17 g of K, 1.51 g of Ca and 0.60 g of Mg, were required to produce 1 kg of tomato.

End of English version

References / Referencias

Bock, B. R. (1984). Efficient use of nitrogen in cropping systems. In R. D. Hauck (Ed.), *Nitrogen in crop production* (pp. 273-294). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2134/1990.nitrogenincropproduction.c18

Castellanos, Z. J., & Borbón-Morales, C. (2009). Panorama de la horticultura protegida en México. In Z. J. Castellanos (Ed.), *Manual de producción de tomate en invernadero* (pp. 1-18.). Intagri S.C.

Cheiri, K., de Gelder, A., & Peet, M. M. (2018). Greenhouse tomato production. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (pp. 276-313). CABI Publishing.

Cunha-Chiamolera, T. P., Urrestarazu-Gavilán, M., Filho, A. B., & Morales, I. (2017). Agronomic and economic feasibility of tomato and lettuce intercropping in a soilless system as a function of the electrical conductivity of the nutrient solution. *HortScience, 52*(9), 1195-1200. https://doi.org/10.21273/HORTSCI12170-17

Godoy-Hernández, H., Castellanos-Ramos, J. Z., Alcántar-González, G., Sandoval-Villa, M., & Muñoz-Ramos, J. J. (2009). Efecto del injerto y nutrición de tomate sobre rendimiento, materia seca y extracción de nutrimentos. *Terra Latinoamericana, 27*(1), 1-11. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57315593001

Heuvelink, E., & Dorais, M. (2005). Crop growth and yield. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (pp. 85-144). CABI Publishing.

Heuvelink, E., Li, T., & Dorais, M. (2018). Crop growth and yield. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (pp. 89-136). CABI Publishing.

López-López, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., López-Cruz, I. L., & Sánchez-Cohen, I. (2009). Producción de tomate de cascara (*Physalis ixocarpa* Brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 15*(1), 83-89. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.15.011

Malvi, U. R. (2011). Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences, 24*(1), 106-109. https://

ha alcanzado el límite de su aprovechamiento, por lo cual se deben buscar alternativas que hagan más eficiente su uso para evitar impactos negativos al ambiente (Salazar-Moreno et al., 2014).

De acuerdo con el rendimiento alcanzado (Cuadro 2) y la cantidad de nutrientes absorbidos por la planta (Cuadro 4) bajo el sistema convencional y la solución nutritiva al 80 %, se encontró que para producir 1 kg de jitomate las plantas absorbieron 1.58 g de N, 0.70 g de P, 3.17 g de K, 1.51 g de Ca y 0.60 g de Mg. Resultados similares fueron reportados por Heuvelink y Dorais (2005), y Quesada-Roldán y Bertsch-Hernández (2013).

Conclusiones

Las formulaciones y concentraciones de la solución nutritiva no tuvieron efecto sobre los aspectos morfológicos ni sobre el peso de la materia seca de las plantas. Sin embargo, el uso de formulaciones con fuentes fertilizantes de baja solubilidad redujo el rendimiento de frutos comerciales por planta, en comparación con soluciones nutritivas elaboradas con fertilizantes altamente solubles. Además, se demostró que si se mantiene la misma fuente de fertilizantes y el mismo volumen diario de solución nutritiva es posible utilizar una concentración de 80 % sin afectar el rendimiento de frutos.

La variación de las formulaciones de la solución nutritiva en función de la etapa fenológica no mostró un ahorro significativo de fertilizantes, ni tuvo un impacto en el rendimiento por planta o en el tamaño de los frutos, en comparación con la solución convencional al 100 %.

Con la solución nutritiva convencional al 80 %, la eficiencia de absorción de nutrientes respecto al total aportado desde el trasplante hasta el final de la cosecha (85 días) fue de 30, 53, 47, 20 y 33 % para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

Con el sistema en alta densidad de población, despunte al tercer racimo y uso de fertilizantes altamente solubles al 80 % de concentración, se requirieron 28.4 L de agua, así como 1.58 g de N, 0.70 g de P, 3.17 g de K, 1.51 g de Ca y 0.60 g de Mg, para producir 1 kg de jitomate.

Fin de la versión en español

www.1stfruits.co.za/wp/wp-content/uploads/2019/09/Interaction-of-micronutrients-with-major-nutrients-with-special-reference-to-potassium.pdf

Marschner, P. (2012). *Mineral nutrition of higher plants*. Elsevier Academic Press.

Mengel, A., & Kirkby, K. (2001). *Principles of plant nutrition*. Kluwer Academic Publishers.

Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-del Castillo, F., Ruíz-Díaz, M., & Contreras-Magaña, E. (2021). Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 27*(1), 5-17. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010

Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, A., Sánchez-del Castillo, F., Castillo-González, A. M., Valdez-Aguilar, L. A., & Vargas-Canales, J. M. (2011). Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae, 893*, 997-1005. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.893.112

Ponce-Lira, B., Ortiz-Polo, A., Otazo-Sánhcez, E. M., Reguera-Ruíz, E., Acevedo-Sandoval, O. A., Prieto-García, F., & González-Ramírez, C. A. (2013). Caracterización física de una roca volcánica abundante en México: ¨tezontle rojo¨ proveniente del cerro de la Cruz, en Tlahuelilpan, Hidalgo. *Acta Universitaria, 23*(4), 9-16. https://doi.org/10.15174/au.2013.462

Quesada-Roldán, G., & Bertsch-Hernández, F. (2013). Obtención de la curva de extracción nutrimental del hibrido de tomate FB-17. *Terra Latinoamericana, 31*(1), 1-7. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57327411001

Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless culture. Theory and practice*. Editorial Elsevier

Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production. A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC Press Taylor & Francis Group.

Rodríguez-Jurado, S., García-Trejo, J. F., Mejía-Ugalde, I., Vera-Morales, J. M., Vargas-Hernández, M., & Ávila-Juárez, L. (2020). Water and fertilizer efficiency in a polyculture cropping system under three production system. *Journal of Water Reuse and Desalination, 10*(2), 95-105. https://doi.org/10.2166/wrd.2020.027

Rouphael, Y., Colla, G., Cardarelli, M., Fanasca, S., Salerno, A., Rivera, C. M., Rea, E., & Karam F. (2005). Water use efficiency of greenhouse summer squash in relation to the method of culture: soil *vs.* soilless. *Acta Horticulturae, 697*, 81-86. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.697.8

Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencia del Agua, 5*(2), 177-185. https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/472

Sánchez-del Castillo, F., & Escalante-Rebolledo, E. (1988). *Hidroponia*. Universidad Autónoma Chapingo.

Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., & Contreras-Magaña, E. (2012). Development of alternative crop systems for commercial production of vegetables in hydroponics - I: Tomato. *Acta Horticulturae, 947*, 179-187. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947.22

Sánchez-del Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.

Sánchez-del Castillo, F., Cabañas-Díaz, A., Pineda-Pineda, J., González-Molina, L., & Moreno-Pérez, E. C. (2021). Evaluación de métodos de recirculación de solución nutritiva para la producción de jitomate en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12*(3), 433-445. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2419

SAS Institute Inc. (2002). *SAS/STAT ver. 9.1 user's guide*. Author.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2021, November). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.siap.gob.mx/cierreagrícola

Silber, A., Bar-Yosef, B., & Chen, Y. (1999). pH-dependent kinetics of tuff dissolution. *Geoderma, 93*(1-2), 125-140. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00048-8

Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). Substrates: Chemical characteristics and preparation. In C. Sonnevled & W. Voogt (Eds.), *Plant nutrition of greenhouse crops* (pp. 227-252). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_11

Suazo-López, F., Zepeda-Bautista, R., Sánchez-del Castillo, F., Martínez-Hernández, J., Virgen-Vargas, J., & Tijerina-Chávez, L. (2014). Growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) affected by hydroponics, greenhouse and irrigation. *Annual Research & Review in Biology, 4*(24), 4246-4258. https://doi.org/10.9734/ARRB/2014/11936

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Artmed Editora Ltda.

Terabayashi, S., Muramatsu, I., Tokutani, S., Ando, M., Kitagawa, E., Shigemori, T., Date, S., & Fujime, Y. (2004). Relationship between the weekly nutrient uptake rate during fruiting stages and fruit weight of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown hydroponically. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 73*(4), 324-329. https://doi.org/10.2503/jjshs.73.324

Trejo-Téllez, L. I., Ramírez-Martínez, M., Gómez-Merino, F. C., García-Alvarado, J. C., Baca-Castillo, G. A., & Tejeda-Sartorius, O. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4*(5), 863-876. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263128352001

Van den Ende, J. (1989). Estimating the chemical composition of the soil solution of glasshouse soils. 1. Composition of soil solution and aqueous extracts. *Netherlands Journal of Agricultural Science, 37*(4), 311-322. https://doi.org/10.18174/njas.v37i4.16616

Wallace, A., & Mueller, R. T. (2008). Calcium uptake and distribution in plants. *Journal of Plant Nutrition, 2*(1-2), 247-256. https://doi.org/10.1080/01904168009362774