

Effect of plant row arrangement on yield components of bell pepper

Efecto de la disposición de hileras de plantas en los componentes de rendimiento de pimiento morrón

Felipe Sánchez-del Castillo; Esaú del Carmen Moreno-Pérez; Felipe de Jesús Martínez-Gaspar*; María Teresa Colinas-León; José Armando Ramírez-Árias

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, MÉXICO.

*Corresponding author: fmargas@gmail.com, tel. (595) 957 00 21

Abstract

An alternative to the production of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under greenhouse conditions is the management of plants in a high-density population, with blunting above the fourth branching to achieve short cycles and arrangement of plant rows at different heights to form a stair-like canopy (stepped canopy), a system that has not been studied in this species. The aim of this study was to compare four bell pepper production systems using two canopy arrangements (stair-like and uniform) and two planting densities (6 and 8 plants·m⁻²). The cultivar 'Cannon' was used. The experimental design used was plots split into randomized blocks with four replications. The plant row arrangements were located in the large plots and the densities in the subplots. With the stepped arrangement, the yield per unit area increased with respect to the control (uniform arrangement) by obtaining a higher fruit set per plant, without decreasing its weight. Under this plant arrangement, the density increase from 6 to 8 plants·m⁻² did not boost yield. The highest yield obtained was 12 kg·m⁻² with 6 plants·m⁻² of greenhouse area in a period of four months, from transplant to final harvest. This suggests the possibility of establishing three crop cycles per year, with an annual yield higher than those achieved by current greenhouse production systems.

Keywords: *Capsicum annuum*, planting arrangements, stepped canopy, greenhouse, hydroponics.

Resumen

Una alternativa a la producción de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) bajo invernadero consiste en el manejo de las plantas en alta densidad de población, con despuntes por encima de la cuarta ramificación para lograr ciclos cortos y con disposición de hileras de plantas a diferentes alturas para formar un dosel en forma de escalera (dosel escaleriforme), sistema que no ha sido estudiado en esta especie. El objetivo del presente estudio fue comparar cuatro sistemas de producción de pimiento morrón generados mediante dos arreglos del dosel (en forma de escalera y uniforme) y dos densidades de plantación (6 y 8 plantas·m⁻²). Se utilizó el cultivar 'Cannon'. El diseño experimental utilizado fue parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones. En las parcelas grandes se ubicaron los arreglos de las hileras de plantas y en las subparcelas las densidades. Con el arreglo escaleriforme incrementó el rendimiento por unidad de superficie respecto del testigo (uniforme) al lograr más frutos amarrados por planta, sin disminución en su peso. Bajo esta disposición de plantas, el aumento de densidad de 6 a 8 plantas·m⁻² no incrementó el rendimiento. El mayor rendimiento obtenido fue de 12 kg·m⁻² con 6 plantas·m⁻² de invernadero en un periodo de cuatro meses, de trasplante al final de la cosecha. Lo anterior sugiere la posibilidad de establecer tres ciclos de cultivo al año, con rendimiento anual superior al de los sistemas de producción que se manejan actualmente en invernadero.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, arreglos de plantación, dosel escaleriforme, invernadero, hidroponía.



Introduction

The bell pepper (*Capsicum annuum* L.) is one of the most important peppers produced in Mexico. In 2014, the value of pepper exports to the United States reached US \$929 million (*Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* [SAGARPA], 2016) and, according to SAGARPA (2012), the area sown under protected farming conditions for this crop accounts for 16 % of the total, surpassed only by the 70 % devoted to the cultivation of tomato (*Solanum lycopersicum* L.).

Pepper is a plant of indeterminate growth, reaching at least 2 m in height (Jovicich, Cantliffe, & Stoffella, 2004a). Greenhouse yields with intermediate technology can reach up to 130 t·ha⁻¹ and with high technology up to 250 t·ha⁻¹ (*Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal* [FUMIAF], 2005).

Two main production systems are used. The first, which is the most preferred in southern Europe, is to let the plants grow freely with all their stems, which have sympodial growth and on each branching produce flowers, usually solitary ones. The first six to eight flowers become fruit, but all demand a high amount of assimilates, so in the flowers that form later a high abortion percentage occurs. Once the first fruits finish their growth and are harvested, the availability of sugars increases and allows the vegetative growth, fruit set and growth of four to eight more fruits to continue. Between one harvest flow and another, two months elapse (Cruz-Huerta, Sánchez-del Castillo, Ortiz-Cereceres, & Mendoza-Castillo, 2009; Marcelis, Heuvelink, Hofman-Eijer, Bakker, & Xue, 2004), which results in a complete crop cycle lasting from eight to ten months after transplant, yielding between 50 and 80 t·ha⁻¹ (Jurado & Nieto, 2003).

In the second cultivation system, which was developed in countries of Northern Europe and North America, the plant is restricted to two stems. This is the most common system used in Mexico for pepper production. In this system the branches of each bifurcation are pruned leaving only the flower formed in the fork, at a density of 2 to 3 plants·m⁻², so 4 to 6 stems·m⁻² growing up to 3 m in height are managed (Jovicich, Cantliffe, & Vansickle, 2004b). By limiting the number of fruits growing simultaneously, the source-sink relationship is modified, so that production can be continued during almost the whole year. The system generally requires high technology greenhouses to control the indoor environment and, although annual yields may exceed 200 t·ha⁻¹, the cost of production per kilogram is very high (Paschold & Zengerle, 2000).

Recently, research has been conducted to develop an alternative production system, consisting of late transplanting and early blunting to stop the growth of

Introducción

El pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) es uno de los tipos de chile más importantes que se producen en México. En 2014, el valor de la exportación de pimiento hacia Estados Unidos alcanzó 929 millones de dólares (*Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación* [SAGARPA], 2016) y, de acuerdo con la SAGARPA (2012), la superficie sembrada en condiciones de agricultura protegida representa 16 %, sólo superada por el 70 % destinada al cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.).

El pimiento es una planta de crecimiento indeterminado, que alcanza al menos 2 m de altura (Jovicich, Cantliffe, & Stoffella, 2004a). Los rendimientos en invernadero con tecnología intermedia pueden llegar hasta 130 t·ha⁻¹ y con alta tecnología hasta 250 t·ha⁻¹ (*Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal* [FUMIAF], 2005).

Los principales sistemas de producción empleados son dos. El primero, que es el más preferido en el sur de Europa, consiste en dejar crecer libremente las plantas con todos sus tallos; los cuales tienen crecimiento simpódico y en cada ramificación producen flores, normalmente solitarias. Las primeras seis a ocho flores llegan a formar fruto, pero todas demandan alta cantidad de asimilados, de tal manera que en las flores que se forman posteriormente ocurre alto porcentaje de aborto. Una vez que los primeros frutos finalizan su crecimiento y son cosechados, la disponibilidad de azúcares aumenta y permite continuar el crecimiento vegetativo, el amarre y crecimiento de cuatro a ocho frutos más. Entre un flujo de cosecha y otro transcurren hasta dos meses (Cruz-Huerta, Sánchez-del Castillo, Ortiz-Cereceres, & Mendoza-Castillo, 2009; Marcelis, Heuvelink, Hofman-Eijer, Bakker, & Xue, 2004), lo que causa que en un ciclo de cultivo completo pasen de ocho a diez meses después del trasplante, con rendimientos de entre 50 y 80 t·ha⁻¹ (Jurado & Nieto, 2003).

En el segundo, que es el más usado en la producción de pimiento en México, se utiliza el sistema de cultivo desarrollado en países del Norte de Europa y de América, el cual se basa en conducir a la planta con dos tallos. En este sistema se podan las ramas de cada bifurcación dejando solamente la flor formada en la horqueta, a una densidad de 2 a 3 plantas·m⁻²; de manera que se manejan de 4 a 6 tallos·m⁻² que crecen hasta 3 m de altura (Jovicich, Cantliffe, & Vansickle, 2004b). Al limitar el número de frutos que crecen simultáneamente, se modifica la relación fuente-demanda, por lo que se puede lograr producir continuamente durante casi todo el año. El sistema generalmente requiere de invernaderos con alta tecnología para tener control del ambiente interior y, aunque los rendimientos anuales pueden superar

plants above the fourth branching of their stems. The purpose is to shorten the crop cycle, by reducing the time from transplant to final harvest to less than four months and to achieve three crop cycles per year instead of only one (Cruz-Huerta et al., 2009; Reséndiz-Melgar, Moreno-Pérez, Sánchez-del Castillo, Rodríguez-Pérez, & Peña-Lomelí, 2010). The lower yield obtained per plant is offset in part by managing a higher population density (6 plants·m⁻² instead of two or three as in the conventional system); therefore, the annual yield is greater since it involves the production of three cycles (Cruz-Huerta, Ortiz-Cereceres, Sánchez-del Castillo, & Mendoza-Castillo, 2005). Reséndiz-Melgar et al. (2010) evaluated this system by comparing 17 varieties at two population densities and found that the most outstanding variety was Orion with 7.6 kg·m⁻² and 7.75 fruits set per plant, out of a total of 15 possible in the first four bifurcations. On the other hand, Cruz-Huerta et al. (2005, 2009) studied this system with the Ariane variety and reported that three crop cycles per year could obtain similar or even higher yields than those attained by the production system used in European countries, but with lower production costs.

The limitation on producing more in each cycle, with this production system, has been the high fruit abortion percentage, attributed to the competition between plants to intercept the incident photosynthetically active radiation (PAR) more evenly throughout the canopy, and the simultaneous growth of several fruits per plant that cause high demand for photo-assimilates that cannot be fully satisfied (Cruz-Huerta et al., 2009; Reséndiz-Melgar et al., 2010). Therefore, strategies to make more efficient use of the amount of incident sunlight and the way in which it is intercepted by the leaves are sought (Jovicich et al., 2004a). One way is to appropriately manage the population density of the crop (Papadopoulos & Pararajasingham, 1997). Another is to adjust the arrangement of the plants in the greenhouse by placing the rows of plants at a different height to form a stair-like canopy arrangement (Sánchez-del Castillo, Bastida-Cañada, Moreno-Pérez, Contreras-Magaña, & Sahagún-Castellanos, 2014).

In tomato, several experiments have been conducted in this regard and the results show that with stair-shaped canopy systems a higher yield is obtained than when the plants are established in a uniform arrangement (Sánchez-del Castillo, Moreno-Pérez, & Contreras-Magaña, 2012), and higher than the yield achieved with conventional greenhouse systems (Resh, 2001; Sánchez-del Castillo et al., 2012). However, this system has not been evaluated for the cultivation of bell pepper.

Based on the above, the aim of this research was to compare four bell pepper production systems generated by two canopy arrangements (stair-shaped and uniform) and two planting densities (6 and 8 plants·m⁻²). It was

las 200 t·ha⁻¹, el costo de producción por kilogramo es muy elevado (Paschold & Zengerle, 2000).

Recientemente, se ha realizado investigación para desarrollar un sistema de producción alternativo, consistente en hacer trasplante tardío y despunte temprano para detener el crecimiento de las plantas por encima de la cuarta ramificación de sus tallos. La finalidad es acortar el ciclo del cultivo, al disminuir el tiempo de trasplante a cosecha a menos de cuatro meses y lograr tres ciclos de cultivo al año en vez de sólo uno (Cruz-Huerta et al., 2009; Reséndiz-Melgar, Moreno-Pérez, Sánchez-del Castillo, Rodríguez-Pérez, & Peña-Lomelí, 2010). El menor rendimiento que se obtiene por planta se compensa, en parte, por el manejo de mayor densidad de población (6 plantas·m⁻² en lugar de las dos o tres del sistema convencional); de tal manera que el rendimiento anual es mayor, ya que involucra la producción de tres ciclos (Cruz-Huerta, Ortiz-Cereceres, Sánchez-del Castillo, & Mendoza-Castillo, 2005). Reséndiz-Melgar et al. (2010) evaluaron este sistema comparando 17 variedades en dos densidades de población y encontraron que la variedad más sobresaliente fue Orión con 7.6 kg·m⁻² y 7.75 frutos amarrados por planta, de un total de 15 posibles en las cuatro primeras bifurcaciones. Por su parte, Cruz-Huerta et al. (2005, 2009) estudiaron este sistema con la variedad Ariane y reportaron que de tres ciclos de cultivo al año podrían obtenerse rendimientos similares o incluso superior al sistema de producción que se desarrolla en países europeos, pero con menor costo de producción.

La limitante para producir más en cada ciclo, con este sistema de producción, ha sido el porcentaje alto de aborción de frutos, atribuido a la competencia entre las plantas para interceptar la radiación fotosintéticamente activa (RFA) incidente más homogéneamente en todo el dosel, y el crecimiento simultáneo de varios frutos por planta que provocan alta demanda de fotoasimilados que no puede ser satisfecha totalmente (Cruz-Huerta et al., 2009; Reséndiz-Melgar et al., 2010). Por lo anterior, se busca aprovechar más eficientemente la cantidad de luz solar que incide y la forma en que ésta es interceptada por las hojas (Jovicich et al., 2004a). Una manera es manejando apropiadamente la densidad de población del cultivo (Papadopoulos & Pararajasingham, 1997). Otra es ajustar la disposición de las plantas en el invernadero colocando las hileras de plantas a distinta altura para formar un arreglo de doseles en forma de escalera (Sánchez-del Castillo, Bastida-Cañada, Moreno-Pérez, Contreras-Magaña, & Sahagún-Castellanos, 2014).

En jitomate se han realizado varios experimentos al respecto y los resultados obtenidos muestran que con los sistemas de dosel en forma de escalera se logra mayor rendimiento que cuando las plantas se establecen en un arreglo uniforme (Sánchez-del Castillo, Moreno-Pérez, &

hypothesized that it is possible to increase the number of fruits set per plant and per unit area, and therefore the pepper crop yield, with plants blunted just above the fourth bifurcation and by the formation of stair-like canopies in order to intercept the incident PAR more homogeneously throughout the canopy.

Materials and methods

This research was carried out from March to September 2015 in a metal-frame, chapel-type greenhouse with a polyethylene cover allowing 80 % light transmission. The greenhouse is located in the Experimental Field of the *Universidad Autónoma Chapingo*, Texcoco, State of Mexico (19° 29' North latitude, 98° 53' West longitude and 2,251 masl). The greenhouse had a cooling pad, extractors and a heating system that allowed for adequate temperature control, as well as windows protected with anti-aphid mesh, roll-up curtains and white polypropylene fabric used as ground cover over the floor of the aisles.

Cannon variety was used; it is characterized by being of indeterminate growth and producing blocky-type fruits of 150 to 200 g per fruit. This variety is appreciated in the market for its thick wall, large caliber and good taste.

Sowing was done in 60-cavity polystyrene trays, depositing one seed in each cavity. The substrate for sowing was peat moss mixed with perlite at a ratio of 1:1 (v:v). In the first eight days, the irrigations applied were with water alone. Once emerged, and up to 10 days later, the plants were watered with a nutrient solution diluted to 50 % of its normal concentration. Subsequently, and until the end of the cycle, they were watered with the 100 % solution. The nutrient solution used contained the following elements and concentrations in ppm (mg·L⁻¹): N = 200, P = 50, K = 200, Ca = 235, Mg = 40, S = 160, Fe = 3, B = 0.5, Mn = 0.5, Cu = 0.1 and Zn = 0.1, with electrical conductivity of 2.5 dS·m⁻¹ and pH between 6 and 6.5.

To supply the nutrient solution, a drip irrigation tape with emitters spaced 20 cm apart was used, placing a tape in each row. The average solution flow ranged from 3 to 6 L·m⁻²·day⁻¹.

The transplant was carried out 50 days after sowing (das). The duration of the crop cycle, from transplant to final harvest, was 120 days. A hydroponic system consisting of cultivation beds 1 m wide and 30 cm high were used at floor level to form a uniform canopy, and a set of two lower beds and an upper middle one (40 cm high with respect to the lower ones) 30 cm wide was used to form a stair-like canopy (Figure 1). The cultivation beds were filled with red tezontle sand with particles from 1 to 4 mm in diameter. The middle bed was 40 cm above

Contreras-Magaña, 2012), y superiores al rendimiento que se ha logrado con sistemas convencionales en invernadero (Resh, 2001; Sánchez-del Castillo et al., 2012). Sin embargo, para el cultivo de pimiento morrón no se ha evaluado este sistema.

Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue comparar cuatro sistemas de producción de pimiento morrón generados mediante dos arreglos del dosel (en forma de escalera y uniforme) y dos densidades de plantación (6 y 8 plantas·m⁻²). Lo anterior bajo el supuesto de que al incrementar la densidad de plantación y el número de frutos por unidad de superficie es posible mantener el tamaño de éstos mediante el despunte de plantas en la cuarta bifurcación, y con ello aumentar el rendimiento unitario.

Materiales y métodos

El presente trabajo se llevó a cabo de marzo a septiembre de 2015 en un invernadero tipo capilla de estructura metálica con cubierta de polietileno a 80 % de transmisión de luz. Dicho invernadero está localizado en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (19° 29' latitud norte, 98° 53' longitud oeste y 2,251 msnm). El invernadero contaba con un muro húmedo, extractores y un sistema de calefacción que permitía un control adecuado de la temperatura; además, ventanas protegidas con malla antiáfidos, cortinas enrollables y el piso de los pasillos se cubrió con tela blanca de polipropileno (*Ground-cover*).

Se utilizó la variedad Cannon; la cual se caracteriza por ser de crecimiento indeterminado, producir frutos tipo *blocky* de 150 a 200 g por fruto. Esta es apreciada en el mercado por su pared gruesa, calibre grande y buen sabor.

La siembra se hizo en charolas de poliestireno de 60 cavidades, depositando una semilla en cada cavidad. El sustrato para la siembra fue turba vegetal (*peat moss*) mezclado con perlita, en proporción 1:1 (v:v). En los primeros ocho días, los riegos aplicados fueron con agua sola. Una vez emergidas, y hasta 10 días posteriores, las plantas se regaron con una solución nutritiva diluida al 50 % de su concentración normal. Posteriormente, y hasta el fin del ciclo, se regaron con la solución al 100 %. La solución nutritiva empleada contenía los siguientes elementos y concentraciones en ppm (mg·L⁻¹): N = 200, P = 50, K = 200, Ca = 235, Mg = 40, S = 160, Fe = 3, B = 0.5, Mn = 0.5, Cu = 0.1 y Zn = 0.1, presentando conductividad eléctrica de 2.5 dS·m⁻¹ y pH entre 6 y 6.5.

Para suministrar la solución nutritiva, se usó una cinta de riego por goteo con emisores separados cada 20 cm, colocando una cinta en cada hilera. El gasto promedio de solución osciló entre 3 y 6 L·m⁻²·día⁻¹.



Figure 1. Treatments with different plant arrangements: A) stair-like canopy with three rows of plants, B) stair-like canopy with four rows of plants, C) uniform canopy with three rows of plants and D) uniform canopy with four rows of plants.

Figura 1. Tratamientos con diferentes disposiciones de plantas: A) dosel en escalera con tres hileras de plantas, B) dosel en escalera con cuatro hileras de plantas, C) dosel uniforme con tres hileras de plantas y D) dosel uniforme con cuatro hileras de plantas.

the others, for which a structure with plastic boxes supported by blocks was assembled (Figure 1).

Two arrangements (plant layouts) and two population densities were evaluated. A split-plot randomized complete block experimental design was used with four replicates. The canopy arrangement, stepped and uniform, was in the large plots, while in the subplots the population densities were tested: 6 and 8 plants·m⁻² for each type of arrangement. The small-plot experimental unit was nine plants. The arrangement of plants in combination with the densities is described below:

1. Low-density, stair-like canopy arrangement (Figure 1A). The plants were placed in the form of stairs or a ladder at a density of 6 plants·m⁻²: sets of three rows

El trasplante se llevó a cabo 50 días después de la siembra (dds). La duración del ciclo de cultivo, del trasplante a fin de cosecha, fue 120 días. Se utilizó un sistema hidropónico que consistió en camas de cultivo de 1 m de ancho y 30 cm de altura a nivel del piso para dosel uniforme, y un juego de dos camas inferiores y una central superior (40 cm de altura respecto de las inferiores) de 30 cm de ancho para formar un dosel escaleriforme (Figura 1). Las camas de cultivo se rellenaron con arena de tezontle rojo con partículas de 1 a 4 mm de diámetro. La tina central estuvo a 40 cm por encima de las otras; para lo cual, se armó una estructura con cajas de plástico sostenidas con tabiques (Figura 1).

Se evaluaron dos arreglos (disposiciones de plantas) y dos densidades de población. Se utilizó el diseño

of plants, 33 cm between plants and rows, separated by 50 cm aisles. The middle row was placed 40 cm above the two outer ones.

2. High-density, stair-like canopy arrangement (Figure 1B). The plants were arranged in the form of stairs at a density of 8 plants·m⁻²: similar to the low-density, stair-like canopy, except that a row of plants was added in the upper middle bed (33 cm between plants and 25 cm between rows).
3. Low-density uniform canopy arrangement (Figure 1C), formed with three rows of plants at the same height placed in beds separated by 50 cm wide corridors. The spacing between plants and rows was 33 cm, resulting in a population density of 6 plants·m⁻².
4. High-density uniform canopy arrangement (Figure 1D), formed with four rows of plants at the same height. The spacing between plants was 33 cm and 25 cm between rows to obtain a population density of 8 plants·m⁻².

The plants developed without pruning until reaching the fourth branching, at which time the growth apex was removed (blunting). This practice was performed between 50 and 55 days after transplant (dat). The flowering of the first branching was removed from all plants. The training consisted of supporting the plant with polypropylene (raffia) threads tied to wires that ran along the greenhouse structure at 2 m high.

The characters evaluated were:

- 1) Unit fruit yield (kg·m⁻²).
- 2) Fruit yield per plant (g).
- 3) Number of fruits per unit area (fruits·m⁻²).
- 4) Number of fruits per plant.
- 5) Mean fruit weight (g).
- 6) Dry weight per plant (g) at the end of the crop cycle, 120 dat. One plant per row from each treatment and replicate was used, placing it in a drying oven at 70 °C until constant weight.
- 7) Yield of each row of plants within each arrangement and density combination (kg·m⁻¹).
- 8) Number of fruits per row of plants within each arrangement and density combination.
- 9) Mean fruit weight (g) per row of plants within each arrangement and density combination.

Analyses of variance and Tukey's range test ($P \leq 0.05$) were performed using the Statistical Analysis System (SAS, 2002) package.

Results and discussion

The analyses of variance of the yield variables and components (Table 1) indicated significance ($P \leq 0.01$) between the canopy arrangements, except for mean fruit weight. By contrast, densities did not affect the variables evaluated. The interaction between canopy

experimental de bloques completos al azar en arreglo en parcelas divididas con cuatro repeticiones. En las parcelas grandes se tuvo el arreglo del dosel: escaleriforme y uniforme; mientras que en las subparcelas se probaron las densidades de población: 6 y 8 plantas·m⁻² para cada tipo de arreglo. La unidad experimental en parcela chica fue de nueve plantas. La disposición de plantas en combinación con las densidades se describe a continuación:

1. Arreglo de dosel escaleriforme en baja densidad (Figura 1A). Se colocaron las plantas en forma de escalera a una densidad de 6 plantas·m⁻²: juegos de tres hileras de plantas, 33 cm entre plantas e hileras, separadas por pasillos de 50 cm. La hilera central se puso 40 cm por encima de las dos exteriores.
2. Arreglo de dosel escaleriforme en alta densidad (Figura 1B). Se dispusieron las plantas en forma de escalera a una densidad de 8 plantas·m⁻²: Similar al escaleriforme de baja densidad, excepto que se añadió una hilera de plantas en la cama central superior (33 cm entre plantas y 25 cm entre hileras).
3. Arreglo de dosel uniforme en baja densidad (Figura 1C). Formado con tres hileras de plantas a la misma altura colocadas en camas separadas por pasillos de 50 cm de ancho. La distancia entre plantas e hileras fue 33 cm, con lo que se tuvo una densidad de población de 6 plantas·m⁻².
4. Arreglo de dosel uniforme en alta densidad (Figura 1D). Formado con cuatro hileras de plantas a la misma altura. La distancia entre plantas fue 33 cm y 25 cm entre hileras para obtener una densidad de población de 8 plantas·m⁻².

Las plantas se desarrollaron sin poda hasta alcanzar la cuarta ramificación, momento en que se eliminó el ápice de crecimiento (despunte). Esta práctica se realizó entre los 50 y 55 días después de trasplante (ddt). A todas las plantas se les eliminó la floración de la primera ramificación. El tutorado realizado consistió en sostener a la planta con hilos de polipropileno (rafia) amarrados a alambres que corrían a lo largo de la estructura del invernadero a 2 m de altura.

Los caracteres evaluados fueron:

- 1) Rendimiento de fruto unitario (kg·m⁻²).
- 2) Rendimiento de fruto por planta (g).
- 3) Número de frutos por unidad de superficie (frutos·m⁻²).
- 4) Número de frutos por planta.
- 5) Promedio de peso de fruto (g).
- 6) Peso seco por planta (g) al final del ciclo de cultivo, 120 ddt. Se usó una planta por hilera en cada tratamiento y repetición, en una estufa de secado a 70 °C hasta que se logró peso constante.
- 7) Rendimiento de cada hilera de plantas dentro de cada combinación de arreglo y densidad (kg·m⁻¹).

Table 1. Analysis of variance of yield characters and components in bell pepper, established in two arrangements and two planting densities.**Cuadro 1. Análisis de varianza de caracteres de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón, establecido en dos arreglos y dos densidades de plantación.**

SV ^z /FV ^z	DF/ GL	YUA (kg·m ⁻²)/ RS (kg·m ⁻²)	NF	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
Arrangement/Arreglo	1	58.36**	1,929.40**	126,855.63**	41.28**	0.50	7,832.25**
Blocks/Bloques	3	3.47	153.53	78,020.35	3.36	61.80	361.16
Error a	3	4.56	207.30	112,650.59	4.64	71.61	613.75
Density/Densidad	1	0.28	13.87	56,170.18	2.17	95.30	196.00
Arrangement x Density/ Arreglo x Densidad	1	0.01	86.02	713,910.93	11.39	941.72*	5,256.25
Error b	6	1.75	39.17	48,100.47	1.01	72.39	212.79
CV		13.39	10.83	15.17	12.03	4.93	10.30
Mean/Media		9.91	57.7	1,445.12	8.3	172.31	141.50

^zSV: sources of variation, DF: degrees of freedom, YUA: yield per unit area, NF: number of fruits per m², YP: yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, CV: coefficient of variation.

*, **: significant with $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively.

^zFV: fuentes de variación, GL: grados de libertad, RS: rendimiento por unidad de superficie, NF: número de frutos por m², RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, CV: coeficiente de variación.

*, **: significativo con $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$, respectivamente.

arrangements and population densities was significant only for mean fruit weight.

Despite having tested four replicates and four treatments, it was possible to identify statistical differences in fruit yield for the arrangement factor (housed in large plot). However, in planting densities (small plot), there were no significant variations in this character. These results can be considered reliable against the coefficients of variation, less than 16 %, despite the reduced number of degrees of freedom of error b, a situation that can be attributed to the large experimental plot used, being a factor which favors the precision of the effect estimates (Steel, Torrie, & Dykey, 1997).

Table 2 shows that the yield obtained per plant and per unit area were lower with the uniform canopy arrangement, while with stair-like canopies the yield per unit area increased by an average of 32 %. Similar results were reported in tomato (Sánchez-del Castillo, Moreno-Pérez, Coatzín-Ramírez, Colinas-León, & Peña-Lomelí, 2010; Sánchez-del Castillo, Moreno-Pérez, & Cruz-Arellanes 2009; Vázquez-Rodríguez, Sánchez-del Castillo, & Moreno-Pérez, 2007), by observing that in stair-like canopies an increase in yield per unit area was achieved with respect to the uniform canopy.

Table 3 shows that the arrangement with lower density had a significantly higher yield per plant, as a consequence of greater fruit set per plant and higher

- 8) Número de frutos por hilera de plantas dentro de cada combinación de arreglo y densidad.
- 9) Promedio de peso del fruto (g) por hilera de plantas dentro de cada combinación de arreglo y densidad.

Se realizaron análisis de varianza y comparaciones de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el paquete *Statistical Analysis System* (SAS, 2002).

Resultados y discusión

Los análisis de varianza de las variables de rendimiento y sus componentes (Cuadro 1) indicaron significancia ($P \leq 0.01$) entre los arreglos de dosel, excepto para el peso promedio de fruto. En contraste, las densidades no afectaron a las variables evaluadas. La interacción entre arreglos de dosel y densidades de población fue significativa solamente para peso medio de fruto.

A pesar de haberse ensayado cuatro repeticiones y cuatro tratamientos, se lograron identificar diferencias estadísticas en rendimiento de fruto para el factor arreglos (alojado en parcela grande). Sin embargo, en las densidades de plantación (parcela chica), no hubo variaciones significativas en este carácter. Estos resultados pueden considerarse confiables ante los coeficientes de variación, menores de 16 %, pese al número reducido de grados de libertad del error b; situación que puede atribuirse al tamaño grande de parcela experimental empleado, siendo un factor que

Table 2. Comparison of means for the yield variables and components in bell pepper, as a function of the plant arrangement.**Cuadro 2. Comparación de medias para las variables de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón, en función de la disposición de plantas.**

Arrangement/ Arreglo	YUA (kg·m ⁻²)/ RS (kg·m ⁻²)	NF	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
Stepped/Escalera	11.8 a ²	68.7 a	1,726.4 a	9.9 a	172.1 a	163.6 a
Uniform/Uniforme	8.0 b	46.8 a	1,163.9 b	6.7 a	172.4 a	119.3 b
HSD/DMSH	3.4	22.9	534.0	3.4	13.4	39.4

²Means with the same letter in each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

YA: yield per unit area, NF: number of fruits per m², YP: yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, HSD: honest significant difference.

²Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

RS: rendimiento por unidad de superficie, NF: número de frutos por m², RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Table 3. Comparison of means of population densities for the yield variables and components in bell pepper.**Cuadro 3. Comparación de medias de densidades de población para las variables de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón.**

Density (plants·m ⁻²)/ Densidad (plantas·m ⁻²)	YUA (kg·m ⁻²)/ RS (kg·m ⁻²)	NF	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
6	9.90 a ²	54.9 a	1,651 a	9.15 a	180.5 a	160.0 a
8	9.84 a	60.0 a	1,230 b	7.50 b	164.0 b	123.0 b
HSD/DMSH	1.6	7.6	268.3	1.2	10.4	17.8

²Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

YUA: yield per unit area, NF: Number of fruits per m², YP: Yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, HSD: honest significant difference.

²Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

RS: rendimiento por unidad de superficie, NF: número de frutos por m², RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

mean fruit weight. However, in number of fruits per m² and yield per m², there were no significant statistical differences, indicating that the density of 6 plants·m⁻² can be used commercially for a greater yield, as already indicated by Reséndiz-Melgar et al. (2010). The final plant dry weight was also higher with the lowest population density.

Table 4 shows that in both densities the yield and number of fruits per unit area and per plant were higher in the stair-like canopy, compared to the uniform canopy. These differences were 3.5 kg·m⁻² in yield and 22 fruits·m⁻². It can also be seen that the significant interaction between arrangements and densities indicated in the mean fruit weight was due to the fact that in the uniform arrangement this character decreased significantly when increasing from 6 to 8 plants·m⁻². By contrast, in the stair-like arrangement the fruit weight was statistically similar at both densities.

favorece a la precisión de las estimaciones de efectos (Steel, Torrie, & Dykey, 1997).

En el Cuadro 2, se observa que el rendimiento obtenido por planta y por unidad de superficie fueron menores con el arreglo de dosel uniforme; mientras que con doseles en escalera el rendimiento por unidad de área incrementó en promedio 32 %. Resultados similares fueron reportados en jitomate (Sánchez-del Castillo, Moreno-Pérez, Coatzín-Ramírez, Colinas-León, & Peña-Lomelí, 2010; Sánchez-del Castillo, Moreno-Pérez, & Cruz-Arellanes 2009; Vázquez-Rodríguez, Sánchez-del Castillo, & Moreno-Pérez, 2007), al observar que en doseles en forma de escalera se logró un aumento en el rendimiento por unidad de superficie respecto del dosel uniforme.

En el Cuadro 3, se observa que el arreglo con densidad menor tuvo significativamente mayor rendimiento por planta, consecuencia de más frutos amarrados por

Table 4. Comparison of means for yield variables and components in bell pepper as a function of the arrangement of the plants and their population density.**Cuadro 4. Comparación de medias para variables de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón en función de la disposición de las plantas y su densidad de población.**

Arrangement/ Arreglo	Density (plants·m ⁻²)/ Densidad (plantas·m ⁻²)	YUA (kg·m ⁻²)/ RS (kg·m ⁻²)	NF	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
Stepped/Escalera	6	11.91 a ²	67.2 a	1,986 a	11.2 a	177 ab	185 a
Stepped/Escalera	8	11.62 a	69.6 a	1,453 b	8.7 b	166 ab	142 b
Uniform/Uniforme	6	7.88 b	43.2 b	1,315 b	7.1 bc	184 a	134 bc
Uniform/Uniforme	8	8.18 b	50.4 b	1,023 b	6.3 c	162 b	105 c
HSD/DMSH	3.24	15.3	531	2.3	21	36	

²Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

YUA: yield per unit area, NF: number of fruits per m², YP: yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, HSD: honest significant difference.

²Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

RS: rendimiento por unidad de superficie, NF: número de frutos por m², RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

The results of yield and number of fruits obtained with the uniform canopy arrangement are consistent with those reported by Reséndiz-Melgar et al. (2010), with the same bell pepper production system managed at high density and blunting above the fourth bifurcation. Reséndiz-Melgar et al. (2010) obtained yields of 7 kg·m⁻² in a four-month growing cycle. They point out that the limitation on yield per unit area was the high fruit abortion percentage per plant (approximately 50%). On the other hand, Cruz-Huerta et al. (2009) reported similar fruit abortion percentages with high population density management, by performing the blunting after either the third or fourth bifurcation. In both papers, they attribute this to a strong demand for assimilates by the first fruits in growth, coupled with limitations in the interception and homogeneous distribution of PAR in the canopy caused by competition among plants.

Solar radiation is the most important factor by which plants compete in an environment without restrictions, as is the case in greenhouse cultivation and hydroponics; for this reason, several cultural practices carried out under these conditions seek to increase PAR interception and improve its distribution among the canopy leaves (Jovicich et al., 2004a; Papadopoulos & Pararajasingham, 1997). The results obtained in the present research are similar to those reported by Jolliffe and Gaye (1995), who mention that, up to a certain limit, increasing population density in a favorable environment, such as that of a greenhouse, increases yield per unit area. The lack of increase in yield with increasing population density is explained by the fact that the mutual shading between plants negatively affects the production of photo-assimilates, to the degree that the number of fruits per plant or the mean weight of each

planta y mayor peso medio de fruto. Sin embargo, en número de frutos por m² y rendimiento por m², no hubo diferencias estadísticas significativas, indicando que se puede utilizar comercialmente la densidad de 6 plantas·m⁻² para un rendimiento mayor, como ya lo habían señalado Reséndiz-Melgar et al. (2010). El peso seco final de planta, también fue mayor con la menor densidad de población.

El Cuadro 4 muestra que en ambas densidades el rendimiento y el número de frutos por unidad de superficie y por planta fueron mayores en el dosel escaleriforme, respecto del dosel uniforme. Dichas diferencias fueron de 3.5 kg·m⁻² en rendimiento y 22 frutos·m⁻². Asimismo, se puede apreciar que la interacción significativa entre arreglos y densidades señalada en el peso medio de fruto, fue debido a que en el arreglo uniforme este carácter disminuyó significativamente al incrementar de 6 a 8 plantas·m⁻². En contraste, en el arreglo escaleriforme el peso de fruto fue estadísticamente similar en ambas densidades.

Los resultados de rendimiento y número de frutos obtenidos con el arreglo de dosel uniforme concuerdan con los reportados por Reséndiz-Melgar et al. (2010), con el mismo sistema de producción de chile pimiento en alta densidad y despuntes por encima de la cuarta bifurcación. Reséndiz-Melgar et al. (2010) obtuvieron rendimientos de 7 kg·m⁻² en un ciclo de cultivo de cuatro meses. Ellos señalan que la limitante del rendimiento por unidad de superficie fue el porcentaje alto de aborción de frutos por planta (aproximadamente 50%). Por su parte, Cruz-Huerta et al. (2009) reportan porcentajes de aborción de frutos

fruit decreases drastically (Heuvelink, 1995; Villegas-Cota et al., 2004).

With the arrangement of plants in the stair-like system managed at 6 plants·m⁻², it was possible to significantly increase the number of fruits and the yield per plant compared to the uniform canopy treatments; this indicates that with the stair-like arrangement, it was possible to increase the amount of PAR intercepted per plant and, above all, improve its distribution among the canopy leaves, thereby resulting in more efficient photosynthesis.

The density increase from 6 to 8 plants·m⁻² in the stair-like arrangement did not increase yield per unit area, mainly because the number of fruit set per plant decreased significantly, indicating that the low density is the most suitable for commercial management.

Numerous studies carried out in tomato with plants blunted at three clusters in stair-like canopy arrangements (Méndez-Galicia, Sánchez-del Castillo, Sahagún-Castellanos, & Contreras-Magaña, 2005; Sánchez-del Castillo et al., 2014, 2012 and 2010; Vázquez-Rodríguez et al., 2007) also show significant increases in yield per unit area, thanks to the fact that this arrangement has allowed increasing the population density with respect to uniform canopies without a significant decrease in mean fruit size and weight.

To understand these aspects in greater detail, an analysis was made of the behavior of plant rows within each treatment (Tables 5, 6, 7 and 8). The comparison of means for the stair-like treatment with 6 plants·m⁻² (Table 5) shows that the three rows of plants behaved similarly in the variables yield, fruits per plant, mean fruit weight and dry weight per plant at the end of the cycle, bolstering the argument that there is similar PAR interception and distribution in each row.

The behavior of the rows within the stair-like treatment with a density of 8 plants·m⁻², by placing four rows of plants instead of three (Figure 1B and Table 6), was different. It was observed that the yield per plant was 33 % lower in the two rows that occupied the lower level with respect to the higher level. This was caused by a lower number of fruits per plant, since the mean fruit weight was similar in all rows. The dry weight per plant also decreased in the lower two rows.

By increasing the population density in the same area, the intercepted PAR per unit area is distributed among more plants, with a corresponding decrease for each one, which affects its dry matter production and final yield; In addition, in the particular case of pepper, it affects the number of fruits that each

similares con manejo de altas densidades de población, ya sea realizando el despunte después de la tercera o de la cuarta bifurcación. En ambos trabajos, lo atribuyen a una demanda fuerte de asimilados por los primeros frutos en crecimiento, sumado a limitaciones en la intercepción y distribución homogénea de la RFA en el dosel ocasionado por la competencia entre plantas.

La radiación solar es el factor más importante por el cual las plantas compiten dentro de un ambiente sin restricciones, como lo es el cultivo en invernadero e hidroponía; por ello, varias prácticas culturales que se realizan en estas condiciones buscan incrementar su intercepción y mejorar su distribución entre las hojas del dosel (Jovicich et al., 2004a; Papadopoulos & Pararajasingham, 1997). Los resultados obtenidos en la presente investigación son similares a lo reportado por Jolliffe y Gaye (1995), quienes mencionan que, hasta cierto límite, al aumentar la densidad de población en un ambiente favorable, como el de un invernadero, incrementan el rendimiento por unidad de superficie. La falta de aumento en el rendimiento con incremento en la densidad de población se explica porque el sombreado mutuo entre plantas afecta negativamente la producción de fotoasimilados, al grado de que el número de frutos por planta o el peso medio de cada fruto disminuyen fuertemente (Heuvelink, 1995; Villegas-Cota et al., 2004).

Con la disposición de plantas en el sistema escaleriforme manejada a 6 plantas·m⁻², se logró incrementar significativamente el número de frutos y el rendimiento por planta respecto de los tratamientos de dosel uniforme; lo anterior apunta a que, efectivamente, con el arreglo escaleriforme se logró aumentar la cantidad de RFA interceptada por planta y, sobre todo, se mejoró su distribución entre las hojas del dosel provocando una fotosíntesis más eficiente.

El aumento de densidad de 6 a 8 plantas·m⁻² en arreglo escaleriforme no incrementó el rendimiento por unidad de superficie debido, fundamentalmente, a que el número de frutos amarrados por planta disminuyó significativamente; lo que indica que la densidad baja es la más adecuada para manejo comercial.

Numerosos estudios realizados en jitomate con plantas despuntadas a tres racimos en arreglos de dosel escaleriforme (Méndez-Galicia, Sánchez-del Castillo, Sahagún-Castellanos, & Contreras-Magaña, 2005; Sánchez-del Castillo et al., 2014, 2012 y 2010; Vázquez-Rodríguez et al., 2007) también muestran incrementos significativos en el rendimiento por unidad de superficie, gracias a que dicha disposición ha permitido aumentar la densidad de población respecto de doseles uniformes sin una disminución importante en el tamaño y peso medio de fruto.

Table 5. Comparison of means per row of plants for yield variables and components in bell pepper, for the stair-like canopy at 6 plants·m⁻².**Cuadro 5. Comparación de medias por hilera de plantas para variables de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón, para el dosel en forma de escalera a 6 plantas·m⁻².**

Row /Hilera	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
Lower east/Inferior oriente	1,968 a ^z	10.7 a	184 a	191 a
Upper middle/Superior central	2,029 a	11.9 a	171 a	184 a
Lower west/Inferior poniente	1,966 a	11.1 a	178 a	180 a
HSD/DMSH	516	2.8	18	38

^zMeans with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

YP: yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, HSD: honest significant difference.

^zMedias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Table 6. Comparison of means per row of plants for yield variables and components in bell pepper, for the stair-like canopy at 8 plants·m⁻².**Cuadro 6. Comparación de medias por hilera de plantas para variables de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón, para el dosel en forma de escalera a 8 plantas·m⁻².**

Row /Hilera	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
Lower east/Inferior oriente	1,142 b ^z	6.9 ab	166 a	116 b
Upper east/Superior oriente	1,658 a	9.9 ab	168 a	161 ab
Upper west/Superior poniente	1,720 a	10.1 a	170 a	175 a
Lower west/Inferior poniente	1,113 b	6.7 b	166 a	115 b
HSD/DMSH	463.9	3.3	37.0	49.0

^zMeans with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

YP: yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, HSD: honest significant difference.

^zMedias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

plant can keep growing (Heuvelink, 1995; Wien, 1999). These results agree with those of McAvoy et al. (1989), in the sense that there is a high relationship between fruit yield, total PAR intercepted by the canopy and its distribution in each plant, particularly during anthesis prior to harvest, which is when the population density pressure is higher because of the greater leaf area that is formed.

The plants that were in the lower level had a greater shade effect; therefore, they were the most affected in their interception of PAR per day, since the lower row oriented towards the West received less PAR in the mornings and the East row in the afternoons. On the other hand, the comparison of rows with a uniform arrangement and 6 plants·m⁻² (Table 7) shows that the three rows of plants had a similar behavior for all variables, which is attributed to fact that the spacing between rows (33 cm) is sufficient to achieve a similar interception and distribution of PAR, including the middle row.

Para profundizar más en estos aspectos se efectuó un análisis del comportamiento de hileras de plantas dentro de cada tratamiento (Cuadros 5, 6, 7 y 8). La comparación de medias para el tratamiento de escalera con 6 plantas·m⁻² (Cuadro 5) muestra que las tres hileras de plantas se comportaron de manera similar en las variables rendimiento, frutos por planta, peso medio de fruto y peso seco por planta al final del ciclo, apoyando el argumento de una intercepción y distribución similar de la RFA en cada hilera.

El comportamiento de las hileras dentro del tratamiento escaleriforme con densidad de 8 plantas·m⁻², al colocar cuatro hileras de plantas en vez de tres (Figura 1B y Cuadro 6), fue diferente. Se observó que el rendimiento por planta fue 33 % menor en las dos hileras que ocupaban el nivel inferior respecto del nivel superior. Esto fue ocasionado por un menor número de frutos por planta, dado que el peso medio de fruto fue similar en todas las hileras. El peso seco por planta también disminuyó en las dos hileras inferiores.

Table 7. Comparison of means per row of plants for yield variables and components in bell pepper, for the uniform canopy at 6 plants·m².

Cuadro 7. Comparación de medias por hilera de plantas para variables de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón, para el dosel uniforme a 6 plantas·m².

Row/Hilera	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
Outer east/Exterior oriente	1,409 a ²	8.0 a	182 a	147 a
Inner middle/Interior central	1,401 a	7.1 a	198 a	138 a
Outer west/Exterior poniente	1,137 a	6.4 a	179 a	116 a
HSD/DMSH	301	2.0	24	40

²Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

YP: yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, HSD: honest significant difference.

²Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Gardner, Pearce, and Mitchell (1990), Heuvelink (1995), and Sánchez-del Castillo et al. (2014) indicate that the more homogeneous distribution of PAR among the leaves of the plants that make up the canopy results in an increase in the rate of photosynthesis. The decrease in yield per plant and number of fruits per unit area with respect to the rows of plants arranged in a stair shape at the same density (Table 1) can be explained because, although in both canopies the interception of PAR per plant might be similar, the arrangement of rows allowed a better distribution of PAR among the canopy leaves compared to the uniform arrangement. This is due to the fact that PAR had more impact on the upper leaves than on the lower ones, making the photosynthetic rate less efficient.

The test of comparison of means of the treatment with a uniform canopy arrangement and density of 8 plants·m⁻² (Table 8) also showed no significant differences between rows for any of the variables studied. Therefore, the lowest interception of PAR per plant due to the increase in density is what prevents increasing the yield per unit area in relation to the uniform arrangement with lower density.

If the rows of the high-density, uniform canopy treatment (Table 8) are compared with those of the same density in the stair-like arrangement (Table 6), it can be seen that the two middle rows of the latter treatment produce a higher yield and number of fruits per plant (approximately 70 % more yield and 85 % more fruits per plant) than the same rows of the uniform arrangement. This result supports the argument that this is due to the greater interception and homogeneous distribution of PAR in the plants located in the upper rows, in relation to the location of the four rows of plants in the same level (uniform canopy).

The results obtained in the present research allow us to deduce that with a stair-like arrangement of plants

Al aumentar la densidad de población en una misma superficie, la RFA interceptada por unidad de área se distribuye entre más plantas, con la correspondiente disminución para cada una de ellas, lo que afecta su producción de materia seca y rendimiento final; además, en el caso particular del pimiento, incide en el número de frutos que cada planta puede mantener creciendo (Heuvelink, 1995; Wien, 1999). Estos resultados concuerdan con lo señalado por McAvoy et al. (1989), en el sentido de que existe una relación alta entre el rendimiento de frutos, la RFA total interceptada por el dosel y su distribución en cada planta; particularmente durante el periodo de antesis a cosecha, que es donde la presión de densidad de población es más alta debido a la mayor área foliar que se forma.

Las plantas que quedaron en el nivel inferior tuvieron mayor efecto de sombra; por lo tanto, fueron las que se vieron más perjudicadas en su intercepción de RFA por día, ya que la hilera inferior orientada hacia el poniente recibía menos RFA por las mañanas y la hilera oriente por las tardes. Por su parte, la comparación de hileras con disposición uniforme y 6 plantas·m⁻² (Cuadro 7) muestra que las tres hileras de plantas tuvieron un comportamiento similar para todas las variables; lo que se atribuye a que la distancia entre hileras (33 cm) es suficiente para lograr una intercepción y distribución similar de la RFA, incluyendo la hilera del centro.

Gardner, Pearce, y Mitchell (1990), Heuvelink (1995), y Sánchez-del Castillo et al. (2014) señalan que la distribución más homogénea de la RFA entre las hojas de las plantas que conforman el dosel trae como consecuencia un aumento de la tasa de fotosíntesis. La disminución en rendimiento por planta y en número de frutos por unidad de área con respecto de las hileras de plantas dispuestas en forma de escalera a la misma densidad (Cuadro 1), se puede explicar debido a que, aunque en ambos doseles la intercepción de RFA por planta pudo ser similar, la disposición de las hileras

Table 8. Comparison of means per row of plants for yield variables and components in bell pepper, for the uniform canopy at 8 plantas·m².**Cuadro 8. Comparación de medias por hilera de plantas para variables de rendimiento y sus componentes en pimiento morrón, para el dosel uniforme a 8 plantas·m².**

Row/Hilera	YP (g·plant ⁻¹)/ RP (g·planta ⁻¹)	NFP	MFW (g)/ PMF (g)	DWP (g)/ PSP (g)
Outer east/Exterior oriente	1,028 a ²	6.3 a	163 a	106 a
Lower east/Inferior oriente	926 a	5.2 a	178 a	99 a
Lower west/Inferior poniente	928 a	5.5 a	169 a	97 a
Outer west/Exterior poniente	1,199 a	7.9 a	152 a	117 a
HSD/DMSH	455	3.6	46	44

²Means with the same letter within each column do not differ statistically (Tukey, $P \leq 0.05$).

YP: yield per plant, NFP: number of fruits per plant, MFW: mean fruit weight, DWP: dry weight per plant, HSD: honest significant difference.

²Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

RP: rendimiento por planta, NFP: número de frutos por planta, PMF: peso medio de fruto, PSP: peso seco por planta, DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

it is possible for pepper producers, in greenhouses with good climate control, to increase their annual yield per unit area. This yield level is even higher than that of producers in North Europe and North America who use the conventional high-tech system and obtain from 200 to 250 t·ha⁻¹, but with very high production costs (Heuvelink, 1995; Wien, 1999). Since 12 kg·m⁻² (equivalent to 120 t·h⁻¹) were obtained in a four-month production period, from transplant to the end of the harvest, it is feasible to obtain three crop cycles per year with annual yields exceeding 300 t·ha⁻¹.

Conclusions

The stair-like system generated a higher fruit yield than the plants in the uniform canopy, due to the increase in the number of fruits per plant and its ability to maintain fruit weight without significant decreases.

By increasing the density from 6 to 8 plantas·m⁻² in the stair-like canopy treatments, the yield per unit area was not increased, so for commercial management it is considered more appropriate to establish three rows of plants blunted at the fourth bifurcation in a stair-like arrangement with 6 plantas·m⁻².

End of English version

References / Referencias

Cruz-Huerta, N., Ortiz-Cereceres, J., Sánchez-del Castillo, F., & Mendoza-Castillo, M. C. (2005). Biomasa e índices fisiológicos en chile morrón cultivados en altas densidades. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(3), 287-293. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61028313>

permitió una distribución mejor de la RFA entre las hojas del dosel respecto del arreglo uniforme. Lo anterior debido a que la RFA incidió más en las hojas superiores que en las inferiores, haciendo menos eficiente la tasa fotosintética.

La prueba de comparación de medias del tratamiento con arreglo de dosel uniforme y densidad de 8 plantas·m⁻² (Cuadro 8) tampoco muestra diferencias significativas entre hileras para ninguna de las variables estudiadas. De tal manera que la menor intercepción de RFA por planta debida al aumento de la densidad es lo que impide incrementar el rendimiento por unidad de superficie en relación con el arreglo uniforme con menor densidad.

Si se comparan las hileras del tratamiento de alta densidad y dosel uniforme (Cuadro 8) con las de la misma densidad en disposición escaleriforme (Cuadro 6), se observa que las dos hileras centrales de este último tratamiento producen mayor rendimiento y número de frutos por planta (aproximadamente 70 % más rendimiento y 85 % más frutos por planta) que las mismas hileras del arreglo uniforme. Este resultado apoya el argumento a favor de que esto se debe a la mayor intercepción y distribución homogénea de la RFA en las plantas ubicadas en las hileras superiores, en relación con la ubicación de las cuatro hileras de plantas en un mismo nivel (dosel uniforme).

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten deducir que con la disposición escalonada de las plantas es posible para productores de pimiento, en invernaderos con un buen control climático, incrementar el rendimiento anual por unidad de superficie. Esto incluso a niveles superiores al de productores del Norte de Europa y América que manejan el sistema

- Cruz-Huerta, N., Sánchez-del Castillo, F., Ortiz-Cereceres, J., & Mendoza-Castillo, M. C. (2009). Altas densidades con despunte temprano en rendimiento y período de cosecha en chile pimiento. *Agricultura Técnica en México*, 35(1), 70-77. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60835107>
- Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal (FUMIAF). (2005). *Cultivo de pimiento en invernaderos de alta tecnología en México*. México: Author. Retrieved from www.fumiaf.sagarpa.com.mx
- Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. (1990). *Physiology of crop plants*. Iowa, USA: State University Press.
- Heuvelink, E. (1995). Effect of plant density on biomass allocation to the fruits in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae*, 64(3), 193-201. doi: 10.1016/0304-4238(95)00839-X
- Jolliffe, P. A., & Gaye, M. M. (1995). Dynamics of growth and yield component responses of bell peppers (*Capsicum annuum* L.) to row covers and population density. *Scientia Horticulturae*, 62(3), 153-164. doi: 10.1016/0304-4238(95)00766-M
- Jovicich, E., Cantliffe, D. J., & Stoffella, P. J. (2004a). Fruit yield and quality of greenhouse-grown bell pepper as influenced by density, container and trellis system. *HorTechnology*, 14(4), 507-513. Retrieved from <http://horttech.ashspublications.org/content/14/4/507.full.pdf+html>
- Jovicich, E., Cantliffe, D. J., & Vansickle, J. J. (2004b). U.S. imports of colored bell peppers and the opportunity for greenhouse production of peppers in Florida. *Acta Horticulturae*, 659, 81-85. doi: 10.17660/ActaHortic.2004.659.9
- Jurado, R., & Nieto, N. M. (2003). El cultivo de pimiento bajo invernadero. In: Camacho, F. (Ed.), *Técnicas de producción en cultivos protegidos* (pp. 541-568). Almería, España: Caja Rural Mediterránea.
- Marcelis, L. F. M., Heuvelink, E., Hofman-Eijer, L. R. B., Bakker, J. D., & Xue, L. B. (2004). Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. *Journal of Experimental Botany*, 55(406), 2261-2268. doi: 10.1093/jxb/erh245
- McAvoy, R. J., Janes, H. W., Godfriaux, B. L., Secks, M., Duchai, D., & Wittman, W. K. (1989). The effect of total available photosynthetic photon flux on single truss tomato growth and production. *Journal of Horticultural Science*, 64(3), 331-338. doi: 10.1080/14620316.1989.11515961
- Méndez-Galicia, T., Sánchez-del Castillo, F., Sahagún-Castellanos, J., & Contreras-Magaña, E. (2005). Doseles escaleriformes con hileras de plantas de jitomate orientadas en dirección este-oeste. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(1), 185-192. doi: [dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2004.01.010](https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2004.01.010)
- Papadopoulos, A. P., & Pararajasingham, S. (1997). The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientia Horticulturae*, 69(1-2), 1-29. doi: 10.1016/S0304-4238(96)00983-1
- convencional de alta tecnología y que obtienen de 200 a 250 t·ha⁻¹, pero con costos de producción muy altos (Heuvelink, 1995; Wien, 1999). Dado que se obtuvieron 12 kg·m⁻² (equivalente a 120 t·h⁻¹) en un periodo de producción de cuatro meses, de trasplante al final de la cosecha, se ve factible obtener tres ciclos de cultivo por año con rendimientos anuales que pueden rebasar las 300 t·ha⁻¹.

Conclusiones

El sistema en forma de escalera generó mayor rendimiento de fruto que las plantas en dosel uniforme, debido al incremento del número de frutos por planta y a su capacidad de mantener el peso de fruto sin disminuciones significativas.

Al aumentar la densidad de 6 a 8 plantas·m⁻² en los tratamientos de dosel en forma de escalera, no se incrementó el rendimiento por unidad de superficie, por lo que para manejo comercial se considera más adecuado el establecimiento de tres hileras de plantas despuntadas a la cuarta bifurcación en disposición escaleriforme con 6 plantas·m⁻².

Fin de la versión en español

- Paschold, P., & Zengerle, K. H. (2000). Sweet pepper production in a closed system in mound culture with special consideration to irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 554, 329-333. doi: 10.17660/ActaHortic.1998.458.42
- Reséndiz-Melgar, R. C., Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-del Castillo, F., Rodríguez-Pérez, J. E., & Peña-Lomelí, A. (2010). Variedades de pimiento morrón manejadas con despunte temprano en dos densidades de población. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16(3), 223-229. doi: 10.5154/r.rchsh.2010.16.028
- Resh, M. H. (2001). *Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción*. Madrid, España: Editorial Mundi-Prensa.
- Sánchez-del Castillo, F., Bastida-Cañada, O. A., Moreno-Pérez, E. C., Contreras-Magaña, E., & Sahagún-Castellanos, J. (2014). Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(3), 239-251. doi: 10.5154/r.rchsh.2013.10.037
- Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Coatzín-Ramírez, R., Colinas-León, M. T., & Peña-Lomelí, A. (2010). Evaluación agronómica y fisiotécnica de cuatro sistemas de producción en dos híbridos de jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16(3), 207-214. doi: 10.5154/r.rchsh.2010.16.026
- 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.

- Sánchez-del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., & Cruz-Arellanes, E. (2009). Producción de jitomate hidropónica bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(1), 67-73. doi: dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.15.009
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2012). *Agricultura protegida 2012*. Retrieved from <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/AgriculturaProtegida2012.aspx>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2016). *Cierre de la producción agrícola por cultivo*. Retrieved from <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Statistical Analysis System (SAS Institute). (2002). *SAS/STAT 9.1 user's guide*. Cary, NC, USA: Author. Retrieved from <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug-introduction/61750/PDF/default/statugintrroduction.pdf>
- Steel, R. G., Torrie, J. H., & Dickey, D. A. (1997). *Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach*. New York: McGraw Hill Co., Inc. Retrieved from <https://www.amazon.com/Principles-Procedures-Statistics-Biometrical-Approach/dp/0070610282>
- Vázquez-Rodríguez, J. C., Sánchez-del Castillo, F., & Moreno-Pérez, E. C. (2007). Producción de jitomate en doseles escaleriformes bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 55-62. doi: dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2005.04.027
- Villegas-Cota, R. J., González-Hernández, V. A., Carrillo-Salazar, J. A., Livera-Muñoz, M., Sánchez-del Castillo, F., & Osuna-Enciso, T. (2004). Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a densidades de población en dos sistemas de producción. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(4), 333-338.
- Wien, H. C. (1999). Peppers. In: Wien, H. C. (Ed.), *The Physiology of vegetable crops* (pp. 259-293). New York, USA: CABI Publishing.