

TAMAÑO DE LOS POROS DEL SUELO Y CRECIMIENTO DE RAÍZ Y VÁSTAGO DEL CHILE JALAPEÑO (*Capsicum annuum* L.)

SOIL PORES SIZE AND ROOT AND SHOOT GROWTH OF JALAPEÑO PEPPER (*Capsicum annuum* L.)

Reinaldo Pire* y Aracelys Pereira

Posgrado de Horticultura, Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Apdo. 400. Barquisimeto. Venezuela. (rpire@ucla.edu.ve) (aracelysp@ucla.edu.ve).

RESUMEN

El sistema de raíces de los cultivos es fundamental para la vida de las plantas; su crecimiento se asocia con la resistencia del suelo y tamaño de sus poros. El objetivo de este estudio fue evaluar la relación del grosor de las raíces con el tamaño de los poros del suelo y su efecto en el crecimiento del vástago. La hipótesis fue que hay un tamaño mínimo de poro por debajo del cual las raíces no pueden crecer. Las evaluaciones se hicieron en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en tubos con arena con tamaño de partícula diferente. El diseño experimental fue completamente al azar, con cinco tratamientos, cinco repeticiones, y una planta como unidad experimental. A los 90 d de cultivo en las plantas se determinó el diámetro promedio de las raíces y la biomasa seca del vástago. Esta última fue menor en la arena con partículas gruesas, probablemente debido a su capacidad baja para retener la humedad. Las raíces no penetraron la arena con tamaño de partícula inferior a 0.420 mm y su crecimiento se restringió al espacio anular entre la arena y la maceta. Esto afectó la producción de biomasa aérea y algunas raíces disminuyeron (9 %) su grosor e ingresaron a poros con diámetros menores.

Palabras clave: porosidad del sustrato, diámetro de raíces, biomasa acumulada.

INTRODUCCIÓN

Las raíces son un componente fundamental para los cultivos, pero por ser un órgano subterráneo se han estudiado menos que las estructuras aéreas. El estudio de las raíces requiere

ABSTRACT

Crops root system is fundamental to the plant's life; its growth is associated with soil strength and soil pore size. The objective of this study was to evaluate the relationship between the root thickness regard the pores size of the soil and their effect on the shoot growth. We hypothesized that there is a minimum pore size below which roots cannot grow. Evaluations were performed in Jalapeño peppers (*Capsicum annuum* L.) plants grown in tubes filled with different sand particle sizes. The experimental design was completely randomized with five treatments, five replications, and one plant as an experimental unit. After 90 d of cultivation, the average root diameter and dry biomass of the shoots were determined. The latter was lower in the coarse particle sand, probably due to its low capacity to retain moisture. The roots did not penetrate sand with a particle size of less than 0.420 mm and its growth was restricted to the annular space between the sand and the pot. This affected the aerial biomass production and some roots decreased (9 %) their natural thickness and entered smaller diameter pores.

Key words: substrate porosity, root diameter, total biomass.

INTRODUCTION

Roots are a fundamental component for crops, but being an underground organ, it is less studied than the aboveground structures. The study of roots requires more time and effort than that of the shoots so that the evaluated species are few and most of the studies have focused on monocots, particularly grasses, because of their economic importance (Martino, 2001). This family of plants has thin roots that proliferate through small diameter pores in the soil (Valentine *et al.*, 2012; Glaba and Szewczyk, 2014; 2015). Crop yield is associated with

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: noviembre, 2016. Aprobado: julio, 2017.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 52: 685-693. 2018.

más tiempo y esfuerzo que el de los vástagos, por lo que hay pocas especies evaluadas y la mayoría de los estudios se ha enfocado a monocotiledóneas, en particular a gramíneas, por su importancia económica (Martino, 2001). Esta familia de plantas posee raíces delgadas que proliferan a través de poros del suelo de diámetro pequeño (Valentine *et al.*, 2012; Glaba y Szweczyk, 2014; 2015). El rendimiento de los cultivos está asociado al nivel de exploración que alcanza el sistema radical (Albino-Garduño *et al.*, 2015).

Para evaluar el comportamiento del sistema suelo-planta es necesario caracterizar el sistema radical y el patrón estructural del medio poroso (Tsutsumi *et al.*, 2003). La geometría de la red de poros incluye la distribución de tamaño, la topología del espacio poroso y la forma de interconexión de los espacios (Vogel y Roth, 2001). Los poros pequeños en suelos de los campos agrícolas restringen la permeabilidad y el crecimiento de los sistemas radicales (Williams y Weil, 2004). Incluso, los pelos radicales disminuyen su longitud cuando el diámetro de los poros del suelo es muy pequeño (Haling *et al.*, 2014). Por lo tanto, es relevante evaluar la efectividad de las raíces para penetrar el suelo, como un medio que puede representar una barrera física. Cuando la raíz avanza a través del suelo y enfrenta poros menores respecto a su diámetro, deberá ampliarlos para continuar su crecimiento longitudinal. En los suelos arcillosos la tasa de elongación de la raíz se reduce si la presión que ejerce es insuficiente para crear poros mayores; es decir, la resistencia mecánica limitará su crecimiento (Dexter, 2004; Williams y Weil, 2004). Así, el tamaño de los poros se afecta por las raíces. Hallett *et al.* (2009) hallaron un aumento de 11 % del diámetro medio de los poros en suelos con vegetación, al compararlos con los suelos desnudos. Martin *et al.* (2012) señalaron un efecto positivo en el tamaño de los poros por las raíces de las plantas pero no por las hifas de micorrizas.

La impedancia del suelo tiene un efecto inverso en la tasa de elongación y directo en el grosor medio de la raíz (Bennie, 1996). El aumento de la impedancia y disminución de la tasa de elongación a menudo se acompañan con expansión radial de los ejes de la raíz (Bengough y Mullins, 1991; Croser *et al.*, 1999; Gregory, 2006). Apparently, este engrosamiento permite que la raíz desarrolle más presión

the level of exploration reached by the root system (Albino Garduño *et al.*, 2015).

To evaluate the soil-plant system behavior it is necessary to characterize the root system and the medium's porous structural pattern (Tsutsumi *et al.*, 2003). The pore network geometry includes the size distribution, the porous space topology and the form of the interconnection of spaces (Vogel and Roth, 2001). Small pores in soils of agricultural fields restrict the permeability and root systems growth (Williams and Weil, 2004). Radical hairs even decrease their length when soil pores diameter is reduced (Haling *et al.*, 2014). Therefore, it is important to evaluate the roots' effectiveness to penetrate the soil, as a medium means that represent a physical barrier. When the root advances through the soil and faces smaller diameter pores, it has to expand them to continue its longitudinal growth. In clay soils the root elongation rate is reduced if the exerted pressure is insufficient to create larger pores; that is, mechanical resistance will limit its growth (Dexter, 2004, Williams and Weil, 2004). Thus, roots may affect the pores size. Hallett *et al.* (2009) found an 11 % increase in the average pore diameter in soils with vegetation when compared with bare soils. Martin *et al.* (2012) reported a positive effect on the size of the pores by the roots of plants but not by mycorrhizal hyphae.

Soil impedance inversely affects the elongation rate and directly the average root thickness (Bennie, 1996). The increase in impedance and decrease in the elongation rate are often accompanied by a radial expansion of the root's axes (Bengough and Mullins, 1991; Croser *et al.*, 1999; Gregory, 2006). Apparently, thickening allows the root to develop higher pressure and overcome soil resistance (Clark *et al.*, 1999). The maximum pressure that roots can exert to deform pores is 0.5 to 0.6 MPa, slightly higher in monocotyledons than in dicotyledons, and is the result of cell turgor near 0.8 MPa in roots (Clark *et al.*, 2003). This behavior occurs in soils with some plasticity, such as clays; however, in soils with rigid pores, such as the sandy ones, the roots ability to penetrate is not related to the pushing pressure but to its diameter (Bengough *et al.*, 2011; Mikkelsen, 2015).

Jalapeño pepper, so called because its traditional center of production is the Mexican city of Xalapa, is a spicy variety of *Capsicum annuum* cultivated and consumed in America. The root of the adult plant is

de empuje y supere la resistencia del suelo (Clark *et al.*, 1999). La presión máxima que las raíces pueden ejercer para deformar el poro es 0.5 a 0.6 MPa, poco mayor en las monocotiledóneas que en las dicotiledóneas, y resulta de la turgencia celular cercana a 0.8 MPa en las raíces (Clark *et al.*, 2003). Este comportamiento ocurre en suelos con algún nivel de plasticidad, como los arcillosos, pero en suelos con poros rígidos, como los arenosos, la habilidad de la raíz para penetrar no se relaciona con la presión de empuje sino con su diámetro (Bengough *et al.*, 2011; Mikkelsen, 2015).

El chile jalapeño, se conoce así porque su centro tradicional de producción es la ciudad mexicana de Jalapa, es una de las variedades picantes de *Capsicum annuum* más cultivadas y consumidas en América. La raíz de la planta adulta es voluminosa y profunda, y además presenta raíces laterales numerosas con diámetro pequeño (Nuez *et al.*, 2003).

El objetivo de este estudio fue evaluar el grosor de las raíces laterales del chile jalapeño en relación con el tamaño de los poros del suelo y su efecto en el crecimiento del vástago y determinar el diámetro mínimo de las galerías que las raíces pueden penetrar en medios con poros rígidos sin afectar la producción de biomasa aérea. La hipótesis fue que existe un tamaño mínimo de poros en el suelo por debajo del cual las raíces limitan su alargamiento y el crecimiento de la planta se restringiría.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se condujo en el Posgrado de Agronomía de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, en Barquisimeto, Venezuela, en un cobertizo con estructura abierta y techo traslúcido, que interceptaba 40 % de la radiación solar. La temperatura diurna dentro de la estructura osciló entre 24 y 32 °C y la humedad relativa entre 70 y 40 %.

Obtención y caracterización de los diferentes tipos de arena

Cinco grupos de arena de río lavada se tamizaron para obtener porciones de cinco tamaños de partícula. Los tamices usados en secuencia permitieron obtener granulometría de 2.0 a 0.150 mm. Estas correspondieron a los tratamientos T1 a T5 (Cuadro 1).

La arena se caracterizó según su densidad aparente y porosidad con la metodología descrita por Pire y Pereira (2003),

deep and voluminous; besides it has numerous lateral roots with small diameter (Nuez *et al.*, 2003).

The objective of this study was to evaluate the thickness of the lateral roots of Jalapeño peppers in relation to the size of the pores of the soil, its effect on the growth of the shoot, and determine the minimum diameter of the galleries that the roots can penetrate in a medium with rigid pores without affecting the biomass production. Our hypothesis was that there is a minimum pores size in the soil, below which, the roots limit their elongation and the growth of the plant is restricted.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in the Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela, in an open shed structure with translucent roof, which intercepts 40 % of the solar radiation. The diurnal temperature within the structure ranged between 24 and 32 °C and relative humidity between 70 and 40 %.

Obtaining and characterization of different sand types

Five groups of river sand were obtained, washed and sifted to obtain five particle sizes portions. The sieves used in sequence allowed obtaining granulometry ranging from 2.0 to 0.150 mm. These corresponded to treatments T1 to T5 (Table 1).

Sand was characterized according to its bulk density and porosity following the methodology described by Pire and Pereira (2003), for 15 cm height containers. As the pores decreased their size the bulk density progressively decreased and its total porosity increased. Likewise, aeration porosity decreased and water retention capacity increased (Table 2).

Plant cultivation containers

We defined the minimum container height before establishing the crop to avoid excess moisture in the smaller particle sands. The air capacity in small containers in treatments T4 and T5 was 4.6 and 1.9 %; so, we increased the height of these to ensure moisture drainage in the upper portion of the container, where most roots grew (Table 2). For this, we determined the humidity moisture curve of the sand, whose average minimum particles diameter was of 0.20 mm; that is, the smallest particle size from T5 (Table 1). Thus, in 60 cm height containers, porosity allowed 21 % aeration in the upper section. This porosity was twice the minimum accepted 10 % air provision for the roots (Brady and Weil, 2008). We used the same height in the other treatments.

Cuadro 1. Tamices y granulometría de la arena en los tratamientos evaluados.
Table 1. Sieves and granulometry of the sand in the evaluated treatments.

Tratamiento	Número ASTM del tamiz utilizado	Tamaño del orificio (mm)	Diámetro promedio de las partículas (mm)
T1	10	2.0	1.700
T2	14	1.4	1.125
T3	20	0.85	0.635
T4	40	0.42	0.335
T5	60	0.25	0.200
	100	0.15	

en recipientes de 15 cm de altura. A medida que los poros fueron de menor tamaño disminuyó progresivamente la densidad aparente y aumentó su porosidad total. Además, la porosidad de aireación disminuyó y la capacidad de retención de agua aumentó (Cuadro 2).

Recipientes para el cultivo de las plantas

La altura mínima de los recipientes se definió antes de establecer el cultivo, para evitar excesos de humedad en las arenas de tamaños menores. La capacidad de aireación en recipientes pequeños en los tratamientos T4 y T5 fue 4.6 y 1.9 %; por lo que, la altura de éstos debía aumentar para asegurar el drenaje de la humedad donde estuvieran las raíces de las plantas (Cuadro 2). Para esto se determinó la curva de retención de humedad de la arena, cuyo diámetro mínimo promedio de partículas fue 0.20 mm, y este fue el tamaño menor de partícula de T5 (Cuadro 1). Así, en recipientes de 60 cm de altura la porosidad permitió aireación de 21 % en la sección superior. Esta porosidad fue el doble de la mínima de 10 % aceptada para la provisión de aire para las raíces (Brady y Weil, 2008). En los otros tratamientos se utilizó la misma altura.

Twenty-five plastic tubes of 7.62 cm diameter and 60 cm in length were filled with sand; five for each granulometry. The filling was gradually done by pressing material layer by layer to avoid empty spaces. To facilitate the plant extraction with intact roots at the end of the test, before filling the tubes, we internally upholstered them with cylindrical bags prepared with thin polyethylene sheets. We kept the tubes in vertical position, by passing them through the holes of two sections fixed at different ground heights.

Treatments and evaluated variables

We planted seeds in propagation 128 cells trays and 5 cm depth, with peat as substrate. When the seedlings developed two true leaves and were 10 cm tall, the most vigorous and uniform were selected and then individually transplanted into the sand-filled tubes altogether with their root ball. We maintained it around the roots to ensure their survival and favor initial growth in the sand.

Irrigations were applied with higher frequency in thicker sand treatments due to its lower moisture retention capacity at the beginning of the trial, there were on average three daily irrigations

Cuadro 2. Propiedades físicas de la arena, en los tratamientos, en recipientes de 15 cm de altura.
Table 2. Physical properties of the sand, in the treatments, in containers of 15 cm in height.

Tratamiento	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Porosidad total (%)	Porosidad de aireación (%)	Capacidad de retención de agua (%)
T1	1.55	38.4	29.0	10.7
T2	1.50	38.6	20.2	18.4
T3	1.49	39.3	11.4	27.0
T4	1.30	42.4	4.6	37.8
T5	1.25	44.4	1.9	42.5

Veinticinco tubos de material plástico, de 7.62 cm de diámetro y 60 cm de longitud, se llenaron con arena; de ellos, cinco se utilizaron para cada granulometría. El llenado se realizó gradualmente, presionando el material capa por capa para evitar la permanencia de espacios vacíos. Para facilitar la extracción de la planta con sus raíces al final del experimento, antes de llenar los tubos se tapizaron internamente con bolsas cilíndricas preparadas con láminas delgadas de polietileno. Los tubos se mantuvieron verticales, a través de los orificios de dos secciones de malla fijadas a alturas diferentes del suelo.

Tratamientos y variables evaluadas

Las semillas se sembraron en bandejas para propagar, con 128 celdas de 5 cm de profundidad, en turba como sustrato. Cuando las plántulas desarrollaron dos hojas verdaderas y tenían 10 cm de altura las más vigorosas y uniformes se seleccionaron y se trasplantaron, cada una, en los tubos con arena junto con su cepellón. Este se mantuvo alrededor de las raíces para asegurar la supervivencia y favorecer el crecimiento inicial en la arena.

Los riegos se aplicaron con frecuencia mayor en los tratamientos con arenas más gruesas debido la capacidad de retención de humedad diferente entre las granulometrías. Al inicio del experimento hubo tres riegos diarios en promedio en T1 y T2, dos riegos diarios en T3 y un riego diario en T4 y T5. Cuando las plantas estuvieron totalmente establecidas la frecuencia de los riegos se redujo a la mitad. El agua se aplicó a mano hasta permitir su drenaje libre por el fondo del cilindro.

Las plantas se fertilizaron cada dos riegos con 1.25 mL L⁻¹ del fertilizante líquido comercial BiOmex20 (20-20-20 N-P-K+micronutrientes). Los deshierbes fueron manuales y no hubo controles fitosanitarios porque no se presentaron plagas o enfermedades.

Las evaluaciones se realizaron 75 d después del trasplante, cuando la etapa de fructificación de las plantas inicia. El vástago se separó a la altura del cuello de la raíz. La bolsa cilíndrica en el interior de los tubos se extrajo, la arena se eliminó mediante remojo en agua, se recuperaron todas las raíces, se dividieron en segmentos cortos y los diámetros se midieron en cinco submuestras.

Cada submuestra se colocó al azar en cinco placas de vidrio de 5×5 cm bajo una lupa estereoscópica con un micrómetro, y se obtuvieron 12 lecturas del diámetro de las raíces después de mover uniformemente la muestra, siempre en la misma dirección. Las lecturas por planta fueron 60, por tratamiento 300 y 1500 en el experimento.

La biomasa seca del vástago se obtuvo después de deshidratarlo a 75 °C y ventilación forzada, por 48 h.

in T1 and T2, two daily irrigations in T3 and one daily watering in T4 and T5. When plants were fully established the irrigation frequency was half reduced. We manually applied the water to allow free drainage at the bottom of the tubes.

The plants were fertilized every two irrigations with 1.25 mL L⁻¹ commercial liquid fertilizer BiOmex20 (20-20-20 NPK+micronutrients). The weeding was done manually. Phytosanitary controls were not carried out because there were no pests or diseases.

Seventy-five days after the transplant, when the plants started fructification stage, we carried out the evaluations. For it, the shoots were separated at the height of the neck of the root in all the plants. The cylindrical bag inside the tubes was then removed, the sand removed by soaking in water, and the whole root recovered. These then sectioned into short segments and in five subsamples, diameter measurements were taken. Each subsample was randomly placed in five 5×5 cm glass plates, under a stereoscopic magnifying glass with a micrometer. Twelve readings of the roots' diameters were obtained after uniformly moving the sample, always in the same direction. The total plant readings were 60, 300 per treatment and 1500 in the whole trial. The final dry shoot biomass was obtained after dehydrating it at 75 °C in a ventilated oven, for 48 h.

Experimental design and data processing

The experimental design was completely randomized with five treatments, granulometry (Table 1) five repetitions and a plant as an experimental unit. The results were evaluated using ANOVA and Tukey test ($p \leq 0.05$) using SAS 9.1 statistical software (SAS Institute, 2004).

RESULTS AND DISCUSSION

The average roots diameter ranged between 0.292 and 0.327 mm (Table 3). The difference was noticeable in the morphological pattern of the root system between treatments (Figure 1).

The roots in T1, T2 and T3 showed extensive and uniform growth, while in T4 and T5 the tap root showed lower growth; the lateral roots extended horizontally close to the substrate surface. Once these roots reached the container walls, their growth continued vertically downward, thus originating a tubular configuration, with total roots absence at the substrate interior (Figure 1, Table 3). This indicated that the roots did not penetrate the finer sand with small pores. The above shows that the root thickness made it impossible to access through pores

Cuadro 3. Localización y diámetro promedio de las raíces y biomasa del vástago de chile jalapeño en arena con diferente granulometría. Las raíces de los tratamientos T4 y T5 crecieron solo en el borde exterior de la arena.

Table 3. Location and average diameter of roots of Jalapeño pepper grown in sand with different granulometry. The roots in treatments T4 and T5 grew only on the outer edge of the sand.

Tratamiento	Ubicación de las raíces	Diámetro medio (mm)	Intervalo medio (mm)	Biomasa del vástago (g)
T1	Dentro de la arena	0.319 a	0.265 - 0.345	6.52 b
T2	Dentro de la arena	0.327 a	0.279 - 0.362	9.84 ab
T3	Dentro de la arena	0.292 b	0.259 - 0.347	10.84 a
T4	Fuera de la arena	0.314 a	0.270 - 0.354	6.92 b
T5	Fuera de la arena	0.319 a	0.288 - 0.353	5.98 b

Diámetros con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$). ❖ Diameters with different letters are statistically significant (Tukey; $p \leq 0.05$).



Figura 1. Morfología radical del chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) cultivado en arena con granulometría diferente (círculos corresponden a T1: 1.700 mm; T2: 1.125 mm; T3: 0.635 mm; T4: 0.335 mm; T5: 0.200 mm).

Figure 1. Root morphology of Jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivated in sand with different granulometry (circles correspond to T1: 1.700 mm; T2: 1.125 mm; T3: 0.635 mm; T4: 0.335 mm; T5: 0.200 mm).

Diseño experimental y procesamiento de la información

El diseño experimental fue completamente al azar con cinco tratamientos, granulometría (Cuadro 1), cinco repeticiones y una planta como unidad experimental. Los resultados se evaluaron mediante ANDEVA y prueba de medias (Tukey; $p \leq 0.05$) con el programa SAS 9.1 (SAS Institute, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diámetro promedio de las raíces varió de 0.292 a 0.327 mm (Cuadro 3). La diferencia fue notoria

between particles whose diameter was between 0.25 and 0.42 mm. Limitations imposed by soil porosity on roots growth in maize plants were reported by Bushamuka and Zobel (1998) and Osuna-Ceja *et al.* (2006).

The average roots diameter in the T4 and T5 treatments was similar to that of the roots in T1 and T2 (Table 3), so that the roots that did not penetrate the sand pores grew out of it and their thickness was not modified. However, these proliferate less.

The diameters of the roots that entered substrates T1 and T2 were not different, but in T3 they were thinner

en el patrón morfológico del sistema radical entre los tratamientos (Figura 1).

El crecimiento de las raíces en T1, T2 y T3 fue extenso y uniforme y en T4 y T5 fue pivotante y menor; las raíces laterales se extendieron horizontalmente cerca de la superficie del sustrato. Este desarrollo continuó vertical y descendente, alrededor del recipiente después que alcanzaron su pared, con ausencia total de raíces en el interior del sustrato (Figura 1, Cuadro 3). Esto indicó que las raíces no penetraron los poros pequeños de la arena más fina, y que el grosor de las raíces imposibilitó el acceso a través de los poros entre las partículas cuyo diámetro fue 0.25 y 0.42 mm. Las limitaciones que la porosidad del suelo impone al crecimiento de las raíces en plantas de maíz se ha demostrado (Bushamuka y Zobel, 1998; Osuna-Ceja *et al.*, 2006).

El diámetro promedio de las raíces en los tratamientos T4 y T5 fue similar al de las raíces en T1 y T2 (Cuadro 3). Así, las raíces que no penetraron los poros en la arena crecieron fuera de ella y su grosor no cambió, pero su proliferación fue menor.

Los diámetros de las raíces que atravesaron los sustratos T1 y T2 no fueron diferentes, y en T3 fueron más delgadas (Cuadro 3). Esto permite suponer que el crecimiento radial disminuyó y permitió su acceso a los poros entre las partículas con diámetros entre 0.42 y 0.85 mm; es decir, la reducción del grosor de la raíz en el T3 fue 9 %. Esta constricción es menor a la de 2.8 veces en una monocotiledónea (*Lolium perenne*) (Scholefield y Hall, 1985). El chile jalapeño es una dicotiledónea que mostró cierto grado de contracción en la raíz suficiente para ingresar a los poros menores que su diámetro nominal.

Scholefield y Hall (1985) demostraron que las raíces de *L. perenne* pueden crecer a velocidad menor a través de poros rígidos menores cuando están suficientemente aireadas. Ellos observaron que las raíces cuyo diámetro era de 0.88 mm podían penetrar poros rígidos de 0.315 mm; además, en gramíneas esta capacidad de reducción de su diámetro exterior limitó el grosor de la caliptra y la estela de la raíz. En contraste, Bengough y Mullins (1991) reportaron que incluso en el maíz la estela de las raíces se estrecha en respuesta a la constricción radial.

La mayoría de los suelos con poros pequeños, como los arcillosos, permite que los ápices de las raíces penetren grietas del medio y continúen creciendo. En contraste, en nuestro estudio el tamaño de

(Table 3). This supposes that radial growth decreased and allowed access to pores between particles with diameters from 0.42 to 0.85 mm. That is, the thickness reduction in T3 roots was 9 %. This constriction is smaller than that reported by Scholefield and Hall (1985), of 2.8 times constriction in monocotyledons (*Lolium perenne*). Jalapeño pepper is a dicotyledonous that showed a certain degree of contraction to allow roots entering smaller pores than its nominal diameter.

Scholefield and Hall (1985) showed that roots of *L. perenne* could grow through smaller rigid pores, although at slower rate, when they are sufficiently aerated. These authors observed that roots whose diameter was of 0.88 mm could penetrate rigid pores of 0.315 mm; in addition, in graminean this capacity of reduction of the external diameter was limited by the thickness of the caliptra and stele of their roots. In contrast, Bengough and Mullins (1991) reported that even in maize the stele of the roots narrow in response to radial constriction.

Most soils with small pores, such as clayey soils, allow the apices of roots to penetrate the middle cracks and continue to grow. In contrast, in our study, the size of the sand particles in each treatment, was established in narrow intervals, and relatively homogeneous pores without cracks.

Tsegaye and Mullins (1994) observed that mechanical impediments promote the production of lateral roots thinner than those of the main axis and, therefore, were able to penetrate smaller pores. This would optimize the overall exploration capacity of the root system and compensate for the smaller growth of the thicker roots. Siegel *et al.* (2005) noted that compact soils with small pores affected root growth in *C. annuum*. Bosland and Votava (2000) pointed out that the roots of adult plants of this species have a main axis from which numerous laterals develop. It seems the case in roots from T3 treatment that grew through pores of particles with diameters between 0.42 to 0.85 mm. Zwieniecki and Newton (1995) reported woody shrubs whose roots entered rocks fissures by changing their morphology, in which the outer cortex flattened, and the stele remained cylindrical. They concluded that the smallest pore size the roots penetrate could be estimated by the diameter of the stele (approximately 100 μ m in those studied bushes).

In sandy soils with rigid pores, growth occurs through large pores; however, when roots found

las partículas de la arena en cada tratamiento se estableció en intervalos estrechos, poros relativamente homogéneos y sin grietas.

Tsegaye y Mullins (1994) observaron que los impedimentos mecánicos promueven la producción de raíces laterales más delgadas que las del eje principal y, por tanto, pueden penetrar poros más pequeños. Esto optimizaría la capacidad general de exploración del sistema radical y compensaría el crecimiento menor de las raíces más gruesas. Siegel *et al.* (2005) señalaron que los suelos compactos con poros pequeños afectan el crecimiento de la raíz en *C. annuum*. Según Bosland y Votava (2000), las raíces de plantas adultas de esta especie presentan un eje principal del cual se desarrollan laterales numerosas. Parece que éstas son las raíces de T3 que crecieron a través de los poros de las partículas con diámetro de 0.42 a 0.85 mm. Zwieniecki y Newton (1995) observaron en arbustos leñosos que las raíces ingresaban en fisuras de las rocas por cambios en su morfología, en la que la corteza exterior se aplanaba y la estela permanecía cilíndrica. Ellos concluyeron que el tamaño del poro más pequeño que la raíz penetra puede estimarse con el diámetro de la estela (aproximadamente 100 μm en los arbustos estudiados).

En los suelos arenosos, con poros rígidos, el crecimiento ocurre a través de los poros grandes; sin embargo, cuando las raíces se encuentran con poros rígidos de tamaño pequeño algunas especies pueden disminuir su diámetro y atravesar el poro (Kolb *et al.*, 2012). En nuestro estudio las raíces de la planta redujeron su diámetro cuando las partículas del medio tenían diámetro promedio de 0.635 mm (T3); pero no pudieron ingresar en arena con diámetro de partículas inferior a 0.420 mm (T4 y T5).

La biomasa aérea de T3 (con poros medianos) superó a T4 y T5 (con poros pequeños) y a T1 (con poros grandes) (Cuadro 3). En el primer caso las raíces no pudieron penetrar los poros pequeños y se desarrollaron en el espacio anular entre la arena y el recipiente; esto restringió la absorción de agua y nutrientes y el crecimiento se restringió. En T1 la respuesta se atribuye a la retención limitada de agua en la arena, aún con frecuencia alta de riego. Esto se muestra con la tendencia descendente de la biomasa de T3 hasta T1. Esto permitió confirmar que el tamaño de los poros del suelo es un factor que influye en el crecimiento de las plantas, porque afectaría el abastecimiento de oxígeno, agua y nutrimentos (Vaz

small size rigid pores, some species can decrease their diameter and cross the pore (Kolb *et al.*, 2012). In our study, plant roots reduced their diameter when the particles had an average diameter of 0.635 mm (T3); but, they were unable to enter sand with particle diameters of less than 0.420 mm (T4 and T5).

The aboveground biomass of T3 (with medium pores) exceeded T4 and T5 (with small pores) and T1 (with large pores) (Table 3). In the first case, roots could not penetrate the small pores and grew in the annular space between the sand and the container; this restricted the water and nutrients absorption; and plant growth was restricted. In T1, the response is attributable to the limited water retention of the coarse sand, even with the highly frequent irrigation. This is evident with the downward trend on the biomass from T3 to T1 treatments. This allowed to confirm that the soil pore size of is a factor that influences plants growth because it would affects oxygen, water, and nutrients supply (Vaz *et al.*, 2001). The adequate amount of continuous macropores in which the roots can freely penetrate is a requirement for their growth (De Freitas *et al.*, 1999; Dexter, 2004).

CONCLUSIONS

The roots of Jalapeño peppers do not penetrate the pores formed by particles smaller than 0.420 mm, which affects the production of aboveground plant biomass. Some roots enter pores smaller than their average diameter by reducing their thickness.

—End of the English version—



et al., 2001). La cantidad adecuada de macroporos continuos, en los que las raíces puedan penetrar libremente, es un requerimiento para su crecimiento (De Freitas *et al.*, 1999; Dexter, 2004).

CONCLUSIONES

Las raíces del chile jalapeño no penetran los poros formados por partículas menores a 0.420 mm, lo cual afecta la producción de biomasa aérea de la planta. Algunas raíces ingresan a poros menores que su diámetro promedio mediante reducción de su grosor.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado por el registro del proyecto 03-RAG-2012 que generó la presente publicación.

LITERATURA CITADA

- Albino-Garduño, R., A. Turrent-Fernández, J. I. Cortés-Flores, M. Livera-Muñoz, y M. C. Mendoza-Castillo. 2015. Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia* 49: 513-531.
- Bengough, A. G., and C. E. Mullins. 1991. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant Soil* 131: 59-66.
- Bengough, A. G., B. M. McKenzie, P. D. Hallett, and T. A. Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62: 59-68.
- Bennie, A. T. 1996. Growth and mechanical impedance. In: Y. Waisel, A. Eshel, and U. Kafkafi (eds). *Plants Roots. The Hidden Half*. Marcel Dekker. New York, NY, USA. pp: 453-470.
- Bosland, P., and E. Votava. 2000. *Peppers: Vegetable and Spice Capsicums* CABI. Wallingford, UK. 204 p.
- Brady, N. C., and R. R. Weil. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA. 965 p.
- Bushamuka, V. N., and R. W. Zobel. 1998. Differential genotypic and root type penetration of compacted soil layers. *Crop Sci.* 38: 776-781.
- Clark, L. J., A. G. Bengough, W. R. Whalley, A. R. Dexter, and P. B. Barraclough. 1999. Maximum axial root growth pressure in pea seedlings: effects of measurement techniques and cultivars. *Plant Soil* 209: 101-109.
- Clark, L. J., W. R. Whalley, and P. B. Barraclough. 2003. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil* 255: 93-104.
- Croser, C., A. G. Bengough, and J. Pritchard. 1999. The effect of mechanical impedance on root growth in pea (*Pisum sativum*) I. Rates of cell flux, mitosis, and strain during recovery. *Physiol. Plant.* 107: 277-286.
- De Freitas, P. L., R. W. Zobel, and V. A. Snyder. 1999. Corn root growth in soil columns with artificially constructed aggregates. *Crop Sci.* 39: 725-730.
- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Glab, T., and W. Szewczyk. 2014. Influence of simulated traffic and roots of turfgrass species on soil pore characteristics. *Geoderma* 230-231: 221-228.
- Glab, T., and W. Szewczyk. 2015. The effect of traffic on turfgrass root morphological features. *Sci. Hort.* 197: 542-554.
- Gregory, P. J. 2006. *Plant Roots: Growth, Activity and Interaction with Soils*. Blackwell Publishing. Oxford, England. 318 p.
- Haling, R. E., L. K. Brown, A. G. Bengough, T. A. Valentine, P. J. White, I. M. Young, and T. S. George. 2014. Root hair length and rhizosheath mass depend on soil porosity, strength and water content in barley genotypes. *Planta* 239: 643-651.
- Hallett, P. D., D. S. Feeney, A. G. Bengough, M. C. Rillig, C. M. Scrimgeour, and I. M. Young. 2009. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport. *Plant Soil* 314: 183-196.
- Kolb, E., C. Hartmann, and P. Genet. 2012. Radial force development during root growth measured by photoelasticity. *Plant Soil* 360: 19-35.
- Martin, S. L., S. J. Mooney, M. J. Dickinson, and H. M. West. 2012. The effects of simultaneous root colonisation by three *Glomus* species on soil pore characteristics. *Soil Biol. Biochem.* 49: 167-173.
- Martino, D. L. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Díaz-Rossello R. (coord). *Siembra Directa en el Cono Sur*. Programa Cooperativo de Investigación Agrícola del Cono Sur (PROCISUR). Montevideo. pp: 225-257.
- Mikkelsen, R. 2015. Soils and plant roots. *Better Crops* 99: 21-22.
- Nuez, F., R. Gil-Ortega, y J. Costa. 2003. *El Cultivo de Pimientos, Chiles y Ajíes*. Mundi-Prensa. Madrid. 608 p.
- Osuna-Ceja, E., B. Figueroa-Sandoval, K. Oleschko, M. Flores-Delgadillo, M. Martínez-Menes, y F. González-Cossio. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40: 27-38.
- Pire, R., y A. Pereira. 2003. Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del Estado Lara, Venezuela. *Propuesta metodológica*. *Bioagro* 15: 55-64.
- SAS Institute. 2004. *User's Guide*. Version 9.1 Cary, NC, USA.
- Scholefield, D., and D. M. Hall. 1985. Constricted growth of grass roots through rigid pores. *Plant Soil* 85: 153-162.
- Siegel, C., J. Burger, R. Powers, F. Ponder, and S. Patterson. 2005. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 215-226.
- Tsegaye, T., and C. E. Mullins. 1994. Effect of mechanical impedance on root growth and morphology of two varieties of pea (*Pisum sativum* L.). *New Phytol.* 126: 707-713.
- Tsutsumi, D., K. Kosugi, and T. Mizuyama. 2003. Root-system development and water-extraction model considering hydrotropism. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 387-401.
- Valentine, T. A., P. D. Hallett, K. Binnie, M. W. Young, G. R. Squire, C. Hawes, and A. G. Bengough. 2012. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Ann. Bot.* 110: 259-270.
- Vaz, C. M., L. H. Bassoi, and J. W. Hopmans. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil Till. Res.* 60: 35-42.
- Vogel, H. J., and K. Roth. 2001. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. *Adv. Water Resour.* 24: 233-242.
- Williams, S. M., and R. R. Weil. 2004. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 68: 1403-1409.
- Zwieniecki, M. A., and M. Newton. 1995. Roots growing in rock fissures: their morphological adaptation. *Plant Soil* 172: 181-187.