

RELACIÓN POROSIDAD-RETENCIÓN DE HUMEDAD EN MEZCLAS DE SUSTRATOS Y SU EFECTO SOBRE VARIABLES RESPUESTA EN PLÁNTULAS DE LECHUGA

Ma. Del Carmen Gutiérrez-Castorena¹; Jorge Hernández Escobar; Carlos Alberto Ortiz-Solorio; Rosa Anicua Sánchez; Ma. Encarnación Hernández Lara.

Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230. (¹Autora para correspondencia)
Correo-e: carmen.gutierrez.castorena@gmail.com

RESUMEN

Se estudió la relación entre la porosidad, el tamaño y distribución de partícula (1-2 mm y 2-3.36 mm) con la retención de humedad para diferentes mezclas de materiales: fibra de coco (Fc): piedra (P) o tezontle (T), combinados en proporciones variables (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0 v/v). Además, se analizó el efecto de la combinación Fc:P con un tamaño de partícula (1-2 mm) sobre variables respuesta en plántulas de lechuga var. Summertime. Se determinó la curva de retención de humedad. Los tipos de poros y el patrón de distribución de las partículas de las mezclas, se analizaron a través de secciones delgadas y la porosidad se cuantificó con un analizador de imágenes. Los resultados mostraron que las mezclas Fc:T y Fc:P (75:25 v/v), presentaron la mayor capacidad de retención de humedad gravimétrica (230 %) y volumétrica (98 %). Además, un sistema de poros heterogéneo o anisotrópico (macro y micro), y una distribución en bandas, que permitieron percolación y retención de humedad óptima para el desarrollo de las plántulas de lechuga, expresada en las mejores variables respuesta y calidad del cepellón. En contraste, el resto de las mezclas con un sistema de poros homogéneo o isotrópico, ya sea de poros de empaquetamiento simple o compuesto, y una distribución básica aleatoria de partículas, generaron más percolación o más retención de humedad, que limitaron el crecimiento de las plántulas. La micromorfología puede ser útil para comprender las propiedades físicas de los sustratos al determinar directamente el tipo, tamaño y continuidad de los poros, características que afectan la disponibilidad de agua-aire.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: Fibra de coco, tezontle, pómez, tamaño de partícula, proporción de materiales, micromorfología.

POROSITY-WATER RETENTION RELATIONSHIP IN SUBSTRATE MIXTURES AND ITS EFFECT ON RESPONSE VARIABLES IN LETTUCE SEEDLINGS

ABSTRACT

The relationship among porosity, size and particle distribution (1-2 mm and 2-3.36 mm) with water retention for different mixtures of materials: coir (Fc), stone (P) or volcanic stone (T), combined in variables proportions (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0 v/v) was studied. The effect of the combination Fc:P with a particle size (1-2 mm) on response variables in lettuce seedlings var. Summertime was analyzed. The water retention curve was determined. The types of pores and the particle distribution pattern of the mixtures was analyzed through thin sections. Porosity was quantified using an image analyzer. Results showed that Fc:T and Fc:P mixtures (75:25 v/v), showed the highest volumetric (98 %) and gravimetric (230 %) water retention capacity, as well as an anisotropic or heterogeneous pore system (macro and micro), and a band distribution, that allowed percolation and optimal water retention for the development of lettuce seedlings, represented in the best response variables and quality of root ball. In contrast, the rest of the mixture with an isotropic or homogeneous pore system, either simple or compound packing pores, and a basic random distribution of particles, generating more percolation or more water retention, that limited the growth of seedlings. Micromorphology can be useful for understanding the physical properties of the substrates by directly determining the type, size and continuity of pores, characteristics that affect water-air availability.

ADDITIONAL KEYWORDS: Coir, volcanic stone, pumice, particle size, proportion of materials, micromorphology.

INTRODUCCIÓN

Aunque en varias investigaciones se menciona que las propiedades físicas deben ser óptimas desde el establecimiento del cultivo, debido a que no pueden modificarse una vez establecido (Ansorena, 1994; Cabrera, 1999; Vence, 2008), es evidente que todavía se requiere más investigación básica para entender estas propiedades y su relación con el tamaño, forma, naturaleza y acomodo de las partículas (Verdonck y Demeyer, 2004). En especial es importante la generación de conocimiento entre el espacio poroso y el empaquetamiento de partículas de los sustratos (Verdonck *et al.*, 1984), la relación de los poros internos con el contenido de humedad (Orozco *et al.*, 1995); además, de la distribución (Burés, 1997), naturaleza y acomodo (Beardsell *et al.*, 1979) de las partículas. Este conocimiento no se puede generar de manera directa, con las metodologías de rutina, ya que los poros ni la morfología de las partículas, ni mucho menos su distribución, se cuantifican directamente en un contenedor.

La micromorfología es una disciplina de la ciencia del suelo que utiliza secciones delgadas (menos de 30 μm) para caracterizar el sistema poroso y la distribución de las partículas *in situ* bajo un microscopio petrográfico (Bullock *et al.*, 1985); mientras que, la micromorfometría, cuantifica de manera manual o a través de análisis de imágenes los diferentes componentes de un suelo (Stoops, 2003). El análisis de imágenes ha sido ampliamente usado para cuantificar el sistema poroso en el suelo (Jongerius *et al.*, 1972; Bui, 1990; Marcelino *et al.*, 2007), debido a que cada componente tiene propiedades ópticas bien definidas y límites abruptos (Bullock *et al.*, 1985). En consecuencia, con esta técnica se mide no sólo el espacio poroso total *in situ* de los sustratos o de las mezclas de los materiales, sino también su tamaño, forma y continuidad (Moran *et al.*, 1989; Crawford *et al.*, 1995). Además, se pueden identificar los patrones de distribución de los materiales individuales y las relaciones entre varios individuos (Stoops, 2003).

Anicua *et al.* (2009) demostraron que la micromorfología se puede utilizar para caracterizar materiales individuales (perlita y zeolita) y relacionar sus propiedades morfológicas (forma, tamaño, empaquetamiento y porosidad interna y externa) con sus propiedades físicas (capacidad de aire y retención de humedad). Sin embargo, todavía es necesario determinar lo que ocurre con estas dos propiedades una vez que se mezclan los materiales individuales, ya que se producen interacciones complejas que alteran sus propiedades físicas (Ansorena, 1994).

Por otra parte, la determinación de las propiedades de los sustratos se llevan a cabo generalmente en muestras a granel (Anicua *et al.*, 2008), lo que genera que el sustrato presente un bajo ordenamiento (Brady y Weil, 1999), por la amplia variedad de tamaños y formas de partículas (Vargas *et al.*, 2008). Esto hace que sea difícil su caracterización, por todas las propiedades que se interrelacionan (Verdonck *et al.*, 1984) y se presente una

INTRODUCTION

Although in different research it is mentioned that physical properties have to be optimal from the beginning of crop cycle, because it cannot be changed once it is established (Ansorena, 1994; Cabrera, 1999; Vence, 2008), it is evident that more basic research is still needed to understand these properties and their relation to the size, shape, nature and arrangement of particles (Verdonck and Demeyer, 2004). In particular, it is important the generation of knowledge on the relationship between the pore space and the packing of particles of the substrates (Verdonck *et al.*, 1984), the relationship of the internal pores with the moisture content (Orozco *et al.*, 1995), as well as the particle distribution (Burés, 1997), nature and arrangement (Beardsell *et al.*, 1979). This knowledge cannot be directly generated with routine methodologies, because neither pores nor particle morphology even less its distribution are directly quantified in a container.

Micromorphology is a discipline belonging to the science of soil that uses thin sections (less than 30 μm) to characterize the porous system and particle distribution *in situ* using a petrographic microscope (Bullock *et al.*, 1985); whereas, micromorphology quantifies in a manual manner or via image analysis the different soil components (Stoops, 2003). The image analysis has been widely used to quantify the soil porous system (Jongerius *et al.*, 1972; Bui, 1990; Marcelino *et al.*, 2007), because each component has well-defined optical properties and abrupt boundaries (Bullock *et al.*, 1985). Therefore with this technique not only the total pore space *in situ* of the substrates or mixtures of materials are measured, but also its size, shape and continuity (Moran *et al.*, 1989; Crawford *et al.*, 1995). Moreover, distribution patterns of the individual materials and the relationships among several individuals can be identified (Stoop, 2003).

Anicua *et al.* (2009) showed that micromorphology can be used to characterize individual materials (perlite and zeolite) and relate their morphological properties (shape, size, package and internal and external porosity) with their physical properties (air capacity and water retention). However, it is necessary to determine what happens with these two properties once the individual materials are mixed, because complex interactions altering their physical properties occur (Ansorena, 1994).

On the other hand, the determination of the properties of the substrates are usually held in bulk samples (Anicua *et al.*, 2008), which causes the substrate to have a low order (Brady and Weil, 1999), due to the wide variety of particle size and shape (Vargas *et al.*, 2008). This hinders their characterization, for all properties that are interrelated (Verdonck *et al.*, 1984) and a low isotropic is observed (equality in physical properties in all directions), characteristics that a substratum has to have. Conversely, a single particle size in a mixture of organic and inorganic materials increases the isotropy in the porous system (Brady

baja isotropía (igualdad en las propiedades físicas en todas las direcciones), característica que debe tener un sustrato. Contrariamente, un solo tamaño de partícula en una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos incrementa la isotropía en el sistema poroso (Brady y Weil, 1999), por lo que las variables respuesta de las plántulas de lechuga deben ser estadísticamente similares, independientemente de la proporciones empleadas.

Los objetivos de la presente investigación fueron: 1) Relacionar la porosidad y el tamaño y distribución de partícula (1-2 mm y 2-3.36 mm) con la retención de humedad para diferentes mezclas de materiales: fibra de coco (Fc):pómez (P) o tezontle (T), combinados en proporciones variables (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 y 100:0 v/v); 2) Comparar el espacio poroso calculado a partir de densidades (aparente y de partícula) con el obtenido directamente en análisis de imágenes en secciones delgadas; y 3) Analizar el efecto de la combinación Fc:P con un tamaño de partícula (1-2 mm), sobre variables respuesta en plántulas de lechuga var. Summertime.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales individuales utilizados fueron: Fibra de coco (Fc), Tezontle (T) y Pómez (P), en dos tamaños 1-2 y 2- 3.36 mm, el cual se reporta como 2-3 mm y turba (Tu) a granel como testigo. Las mezclas de los materiales fueron: Fc:T y Fc:P, a diferentes proporciones: 0-100, 75:25, 50:50, 25: 75 y 100:0 v/v.

Propiedades físicas

Se realizaron las siguientes determinaciones: densidad aparente, Dap (Beardsell *et al.*, 1979) y densidad real, Dr (Ansorena, 1994) y el espacio poroso total (EPT) se estimó con base en estas dos últimas propiedades. También se determinó el contenido de agua gravimétrica (peso de agua/peso de sustrato) y volumétrica (volumen de agua/volumen de sustrato) a las tensiones de 0, 10, 50 y 100 cm (De Boodt *et al.*, 1974; Or y Wraih, 2000).

Análisis micromorfológico

Todas las muestras de mezclas de materiales se depositaron en tubos de PVC de 7.5 cm de largo y 5.5 cm de diámetro; después se secaron al aire y se impregnaron con resina poliéster insaturada y monómero de estireno en una relación 7:3. La elaboración de las secciones delgadas de mezclas y materiales individuales se basó en Murphy (1986). Posteriormente, se describieron con base en Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003) utilizando un microscopio petrográfico. Se describió la distribución básica de las partículas (aleatoria, en bandas y agrupada) y el tipo de poros: de empaquetamiento simple (sólo partículas inorgánicas), complejo (partículas orgánicas e inorgánicas) y compuesto (partículas orgánicas); además, de fisuras y vesículas.

and Weil, 1999), therefore the response variables of lettuce seedlings should be statistically similar, regardless of the proportions employed.

The aims of the present study were as follows: 1) to relate porosity and size and particle distribution (1-2 mm and 2-3.36mm) to water retention for different mixtures of materials: coir (Fc), pumice (P) or volcanic stone (T), combined in variables proportions (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0 v/v). 2) To compare the pore space densities calculated from (bulk density and particle density) with the aim in image analysis in thin sections; 3) To analyze the effect of the combination Fc:P with a particle size of 1-2 mm, on response variables in lettuce seedlings var. Summertime.

MATERIALS AND METHODS

The individuals materials used were: coir (Fc), volcanic stone (T), and pumice (P), in two sizes: 1-2 and 2-3.36 mm, which is mentioned as 2-3 mm and bulk peat (Tu) as control. The mixtures of materials were: Fc:T and Fc:P, in different proportions 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0 v/v.

Physical properties

The following determinations were carried out: bulk density, Dap (Beardsell *et al.*, 1979) real density, Dr (Ansorena, 1994) and total pore space (EPT) were estimated based on the last two properties. Gravimetric moisture content (weight of water/weight of substrate) and volumetric (water volume/ substrate volume) was determined at tensions of 0, 10, 50 and 100 cm (De Boodt *et al.*, 1974; Or and Wraih, 2000).

Micromorphological analysis

All samples of mixtures of materials were placed in PVC pipes of 7.5 cm long with a diameter of 5.5 cm; then samples were air dried and permeated with unsaturated polyester resin styrene monomer in the ratio 7:3. The preparation of thin sections of mixtures and individual materials was based on Murphy (1986). Then, described based on Bullock *et al.* (1985) and Stoops (2003) using a petrographic microscope. The basic distribution of particles (random, in bands and clustered) and type of pores: simple packing (only inorganic particles), complex packing (organic and inorganic particles) and compound packing (organic particles); as well as cracks and vesicles were described.

Image analysis

Nine microscopic photographs for each thin section were obtained at 2x (0.6 x 1 cm) in a systematic manner; for this thin section was divided into zones (upper, middle and low) with three photographs per zone. The images obtained were processed using the software Image Pro Plus version 5.0. The steps were the following: the image was segmented to distinguish the white areas of the image, corresponding to pores. Then, range values (X1 and X2) were recorded and the icon of the histogram was activated in or-

Análisis de imágenes

Para cada sección delgada se obtuvieron 9 fotografías microscópicas a 2x (0.6 x 1 cm) de forma sistemática; para ello se dividió la sección delgada en zonas (superior, intermedia y baja) con tres fotografías cada una. Las imágenes obtenidas fueron procesadas en el programa Image Pro Plus versión 5.0. Los pasos fueron los siguientes: se segmentó la imagen para diferenciar el espacio poroso y las partículas; se seleccionó el canal "R" y se activó el tintero para seleccionar las áreas blancas de la imagen, correspondientes a poros. Posteriormente, se registraron los valores del rango (X1 y X2) y se activó el ícono del histograma para obtener el espacio poroso total real, el cual se reporta como EPT_r para diferenciarlo del EPT estimado.

Fase de invernadero

Las mezclas de los materiales se probaron con plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) variedad Summertime, en un invernadero de doble capa de vidrio del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Se usaron cuatro materiales individuales (Fc, P, T y Turba (Tu) como testigo). En el diseño de tratamientos se utilizaron las siguientes proporciones de mezclas (100:0, 25:75, 50:50 y 75:25, 0:100 de Fc:T y Fc:P v/v, respectivamente), y dos tamaños de partícula (1-2 mm y 2-3.36 mm), más la turba empleada como testigo, con un total de 11 tratamientos. La unidad experimental estuvo constituida por 25 plántulas, con cuatro repeticiones (44 unidades experimentales). Se utilizaron charolas de germinación de poliestireno expandido (342 x 70 mm; 23.6 mL de capacidad y de 200 cavidades). Las variables respuestas en plántulas de lechuga fueron: germinación (días y porcentaje), altura, peso de materia fresca aérea (PMFA), peso de la materia seca aérea (PMSA) de la planta, peso de materia fresca de la raíz (PMFR) y peso de la materia seca de raíz (PMSR). El diseño del tratamiento fue en bloques completamente al azar.

La siembra se realizó el 6 de octubre de 2008. Se efectuó un riego de 5 mL por planta por día con un dosificador (dispensette®) para garantizar que cada tratamiento recibiera la misma cantidad de agua. Dos veces por semana se aplicó fertilizante foliar (Bayfoland®), en una dosis de 2 mL por litro de agua.

Al final del experimento (40 días después de la siembra -dds-) se extrajeron las plántulas de las charolas de germinación para observar el desarrollo y distribución de raíces. Además se valoró la consistencia del cepellón al momento de su extracción (suelta, cuando se desmorona; ligeramente firme, cuando una sola parte se conserva; firme, cuando se mantiene la forma del contenedor). Para obtener el peso de materia fresca se seleccionaron 10 plántulas de cada unidad experimental. Las plántulas se secaron en una estufa a 80 °C, hasta peso constante, para obtener el peso de materia seca. Para conocer la distribución de raíces, se extrajeron tres plantas de cada

der to obtain the real total pore space, which was reported as EPT_r to distinguish it from the estimated EPT.

Greenhouse phase

Mixtures of material were tested with lettuce seedlings (*Lactuca sativa*) var. Summertime, in a double layer glass greenhouse at Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Four individual materials were used (Fc, P, T and peat (Tu) as control). The following proportions of mixtures were used in treatments designs (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0 of Fc:T and Fc:P v/v, respectively) and two sizes of particle (1-2 mm and 2-3.36mm), plus peat used as control, with a total of 11 treatments. The experimental unit consisted of 25 seedlings, with four replications (44 experimental units). Germination trays of expanded polystyrene (342 x 70 mm; 23.6 mL of capacity and 200 cavities) were used. Response variables in lettuce seedlings were: germination (days and percentage), height, aerial fresh matter weight (PMFA), aerial dry matter weight (PMSA), root fresh matter weight (PMFR) and root dry matter weight (PMSR). The randomized complete block design was used for this treatment.

Sowing occurred on October 6, 2008. An irrigation of 5 mL per plant per day was carried out, using a dispenser (Dispensette®) to ensure that each treatment received the same amount of water. Twice per week foliar fertilizer (Bayfoland®) at a dose of 2 mL per liter of water was applied.

At the end of the experiment (40 days after sowing) seedlings were extracted from the germination trays to observe the development and distribution of roots. The consistency of the root ball at the time of extraction (loose, when it crumbles; slightly firm, when it is preserved in one piece; firm, when it has the shape of the container) was assessed. 10 seedlings from each experimental unit were selected in order to obtain the fresh matter weight. Seedlings were dried in an oven at 80 °C to constant weight, to obtain the dry matter weight. In order to know the roots distribution, three plants from each experimental unit were extracted. Root ball was divided into 3 parts; roots of each section were separated. Fresh and dry matter weights were obtained.

Data statistical analysis was conducted using the R software version 2.8.0 (2008-10-20) Copyright© 2008. The R Foundation for Statistical Computing.

RESULTS

Morphological/physical properties

Table 1 shows that Fc (1-2 mm) reached up to 960 % gravimetric moisture, which drastically decreased when it was mixed with the inorganic materials, such as P with humidity up to 140 %. Table 1 also shows that FC in mixture shows direct relationship with EPT and with water retention and indirect relationship with Dap, regardless of the particle size. Fc showed greater total pore space when it was mixed with P (up to 88 %). Water retention also varied with

unidad experimental y se dividió el cepellón en tres partes; se separaron las raíces de cada sección y se obtuvieron los pesos de materia fresca y materia seca.

El análisis estadístico de los datos se realizó con el paquete R versión 2.8.0 (2008-10-20) Copyright (C) 2008. The R Foundation for Statistical Computing.

RESULTADOS

Propiedades físicas/morfológicas

En el Cuadro 1 se puede observar que la Fc (1-2 mm) alcanzó hasta 960 % de humedad gravimétrica, la cual disminuyó drásticamente cuando se mezcló con materiales inorgánicos, como la P con una humedad hasta 140 %. También se puede apreciar que la Fc en mezcla, presenta relaciones directas con EPT y con la retención de humedad e indirectas con Dap, independientemente del tamaño de partícula. Además, la Fc presentó mayor espacio poroso total cuando se mezcló con P (hasta 88 %). La retención de humedad también varió con el tamaño de partícula; por ejemplo, cuando la Fc se mezcló con P, su contenido gravimétrico fue hasta 20 % más en partículas

the particle size; for example when Fc was mixed with P, its gravimetric content was up to 20 % greater in particles of 2-3 mm, in comparison to particles of 1-2 mm.

Regarding the estimated EPT, it was found that values can be up to 22 % higher than the EPT_r, obtained from the images analysis (average values). EPT values generally correspond to the maximum values of the porous space directly determined in thin section.

The image analysis also showed that the porous space can vary in the different mixtures, therefore the standard deviation (Ds), between the maximum and minimum values of porosity percentage, was analyzed. In relationships of Fc lower than 50, either P or T v/v, a Ds below 10 was observed; whereas in a rate of 75:25 v/v it increased up to 14.8.

With the micromorphological analysis it was observed that Fc has compound packing pores (Figure 1a and 2a) and intra-particle pores of different size. In particles of Fc of 1-2 mm, pores between 1-100 μm (66 %) predominate; whereas, in particles of Fc of 2-3 mm, pores between 100-300 μm (72 %), were predominant.

CUADRO 1. Propiedades físicas de mezclas de materiales a diferentes relaciones y con diferente tamaño de partícula.

TABLE 1. Physical properties of mixtures of materials with different relationships and different particle size.

Mezcla (mm)	Porosidad en sección delgada (%)				Densidad real (g·cm ⁻³)	Densidad aparente (g·cm ⁻³)	Espacio Poroso Total* (%)	Retención de Humedad gravimétrica (%)
	Mínima	Máxima	Ds	Media				
Fc:Pp	-	-	-	-	0.68	1.90	64	54
0:100 1-2								
25:75	61	72	4.6	66	2.29	0.53	77	64
50:50	40	73	9.7	61	2.22	0.41	81	89
75:25	54	83	8.9	72	2.11	0.25	88	140
100:0	-	-	-	-	1.41	0.08	94	910
0:100 2-3								
25:75	53	78	8.1	62	2.29	0.46	80	84
50:50	58	75	5.5	66	2.22	0.37	83	105
75:25	49	87	12.2	66	2.11	0.23	89	146
100:0	-	-	-	-	1.25	0.08	94	980
Fc:T								
0:100 1-2								
25:75	64	75	4.3	68	2.7	0.81	70	77
50:50	57	74	5.1	68	2.68	0.65	76	132
75:25	55	80	7.6	69	2.07	0.40	80	230
100:0	-	-	-	-	1.41	0.08	94	910
0:100 2-3								
25:75	57	75	5.7	65	2.7	0.70	74	76
50:50	58	80	6.2	68	2.68	0.55	79	130
75:25	41	88	14.8	69	2.07	0.34	84	227
100:0	-	-	-	-	1.25	0.08	94	980

Fc: fibra de coco; Pp: piedra pómez; T: tezontle; Ds: desviación estándar.

Fc: coir; Pp, pumice; T: volcanic stone; Ds: standard deviation.

de 2-3 mm, en comparación con las partículas de 1-2 mm.

En cuanto al EPT estimado, se encontró que los valores pueden ser hasta 22 % más altos que el EPT_r, obtenido a partir del análisis de imágenes (valores promedio). Además, los valores de EPT generalmente corresponden a los valores máximos del espacio poroso determinado directamente en sección delgada.

También en el análisis de imágenes se observó que el espacio poroso puede variar en las diferentes mezclas, por lo que se analizó la desviación estándar (Ds) entre los valores máximos y mínimos del porcentaje de porosidad. En relaciones de Fc menores de 50, ya sea con P o T v/v, se presenta una Ds menor de 10; en tanto que, en relaciones de presentó de 75:25 v/v se incrementó hasta 14.8.

Con el análisis micromorfológico se apreció que la Fc presenta poros de empaquetamiento compuesto (Figuras 1a y 2a) y poros intra-partícula de diferente tamaño. En partículas de Fc de 1-2 mm, dominan los poros entre 1-100 μm (66 %); mientras que en partículas de 2-3 mm, predominan los poros entre 100-300 μm (72 %).

Cuando la Fc se mezcló con materiales inorgánicos se formaron macroporos de empaquetamiento complejo (Bullock *et al.*, 1985) (Figuras 1bcd y 2bcd) y las partículas se distribuyeron de manera aleatoria (sobre todo en las relaciones menores de 50). La desviación estándar del EPT obtenido en sección delgada fue menor de 5, lo que significa que el espacio poroso entre partícula es similar. Cuando se incrementó la relación de Fc (hasta 75) en cualquiera de los materiales inorgánicos, el sistema poroso es más complejo ya que las partículas se distribuyeron en bandas como resultado de sus diferencias en densidad (Figuras 1d y 2d). Esas mezclas se identificaron poros de empaquetamiento compuesto (cuando domina Fc; Figuras 1d y 2d), poros de empaquetamiento complejo (cuando se presenta la Fc con el T o P; Figuras 1 y 2 b,c y d) y fisuras (entre las capas de los diferentes materiales). Esta heterogeneidad en el sistema poroso de la sección delgada coincide con incrementos de la desviación estándar (hasta 14.8) y del porcentaje de poros; por ejemplo, en la mezcla Fc:P de 1-2 mm, puede presentar espacio poroso de 41 % hasta 88 % (Cuadro 1).

Los poros de los materiales inorgánicos son de empaquetamiento simple, aunque también ocurren poros vesículas intra-partícula. En el tezontle, las vesículas son esféricas no conectadas; mientras que, en la piedra pómez son alargadas interconectadas. Los poros vesícula son característicos de los materiales volcánicos con alto contenido de gases y vapor de agua, por lo que se indica que son poros ocluidos (Pape y Lager, 1994).

En la Figura 3, se reportan las curvas de retención de agua de las diferentes mezclas de los materiales estudiados. En términos generales, estas curvas muestran un comportamiento parecido cuando se comparan las distintas proporciones para las mezclas y los materiales

When Fc was mixed with inorganic materials, complex packing macropores were formed (Bullock *et al.*, 1985) (Figures 1bcd and 2bcd) and particles were randomly distributed (especially relationships under 50). The standard deviation of EPT obtained in thin section was under 5, which means that the pore space between particles is similar. When the relationship of Fc increased (up to 75), in any of the inorganic materials, the porous system became more complex because particles were distributed in bands as a result of differences in density (Figure 1d and 2d). These mixtures were identified as compound packing pores (when Fc dominates; Figures 1d and 2d), complex packing pores (when Fc is presented with T or P; Figures 1 and 2 b, c and d) and cracks (among layers of different materials). This heterogeneity in the porous system of the thin section coincides with increases of the standard deviation (up to 14.8) and of the percentage of pores, for example, in the mixture Fc:P of 1-2 mm, pore space of 41 % up to 88 % can be observed (Table 1).

The pores of the inorganic materials correspond to simple packaging, but there are also vesicles intra-particle pores. In volcanic stone, spherical vesicles are not connected; whereas, in pumice vesicles are elongated interconnected. Vesicle pores are characteristic of volcanic materials with high gas and water vapor content, thus indicating that they are occluded pores (Pape and Lager, 1994).

Water retention curves of different mixtures of the studied materials are reported in Figure 3. These curves show a similar behavior, when the various proportions for the mixtures and the individual materials are compared, regardless of their diameters. Mixtures retaining the highest volumetric moisture are 75:25 (up to 98 %), followed by 50:50 (60-82 %) of Fc:P or Fc:T. Those that retain less moisture are the pure inorganic materials (between 55 and 70 %; T and P respectively); although materials and mixtures with diameters of 2-3 mm retain a slight higher moisture.

The shape of the water retention curve presented in mixtures with higher amounts of inorganic material and pure inorganic materials draws attention. Pure mixtures (organic and inorganic) and the materials whose relationship is less than 50, especially in particles of 2-3 mm, are those that retain less water (between 55 and 70) at tensions of 0-10 cm of water column. In the case of mixtures 75:25, water retention decreases from 3 to 11 % (tensions of 0-10 cm), which is seen by the slope; then there is a slight fall, almost a horizontal line, this means that moisture retention is maintained until the tension of 100 cm.

When percentage and pores size were related to water retained at different tensions of water column, it was found that mixtures with the highest number of pores inside and between particles and interconnected (mixtures of 75 and 25 Fc: T or P, particles of 2-3 mm), retain more water; contrary to mixtures where macropores occur (simple and compound packing), as in pure inorganic materials, where water retention was lower.

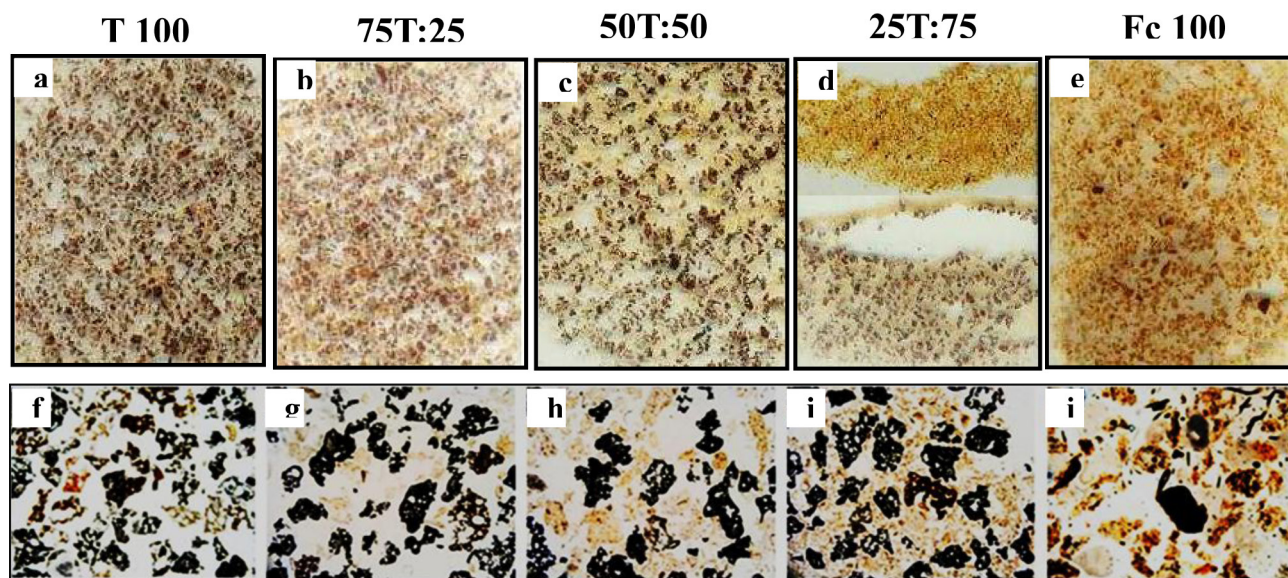


FIGURA 1. Secciones delgadas (a-e) y microfotografías (f-j) de mezcla de materiales a diferentes proporciones en partículas de 2-3 mm. Poros de empaquetamiento simple (a y f), poros de empaquetamiento compuesto (b-d; g-i) y poros de empaquetamiento compuesto (e y j). Distribución en bandas (d) y distribución aleatoria de las partículas, el resto de las imágenes. Partículas negras son de tezontle (T), partículas pardo amarillento son de fibra de coco (Fc); espacio poroso es blanco.

FIGURE 1. Thin sections (a-e) and microphotographs (f-j) of mixtures of materials at different proportions in particles of 2-3 mm. Simple packing pores (a and f), compound packing pores (b-d; g-i) and composed packing pores (e and j). Distribution in bands (d) and random distribution of particles, the rest of the images. Black particles correspond to volcanic stone (T), yellowish-brown particles correspond to coir (Fc); porous space is white.

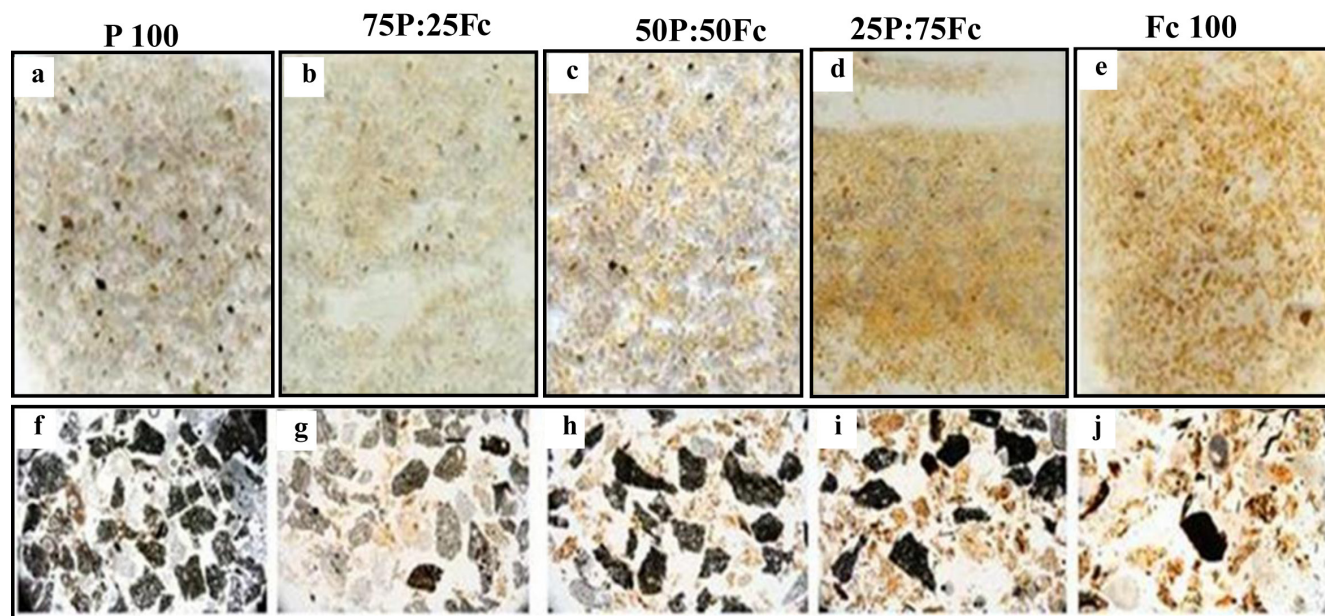


FIGURA 2. Secciones delgadas (a-e) y microfotografías (f-j) de mezcla de materiales a diferentes proporciones en partículas de 2-3 mm. Poros de empaquetamiento simple (a y f), poros de empaquetamiento compuesto (b-d; g-i) y poros de empaquetamiento compuesto (e y j). Distribución en bandas (d) y distribución aleatoria de las partículas, el resto de las imágenes. Partículas negras son de pómez (P), partículas pardo amarillento son de fibra de coco (Fc); espacio poroso es blanco.

FIGURE 2. Thin sections (a-e) and microphotographs (f-j) of mixtures of materials at different proportions in particles of 2-3 mm. Simple packing pores (a and f), compound packing pores (b-d; g-i) and composed packing pores (e and j). Distribution in bands (d) and random distribution of particles correspond to the rest of the images. Black particles correspond to pumice (P), yellowish-brown particles correspond to coir (Fc); porous space is white.

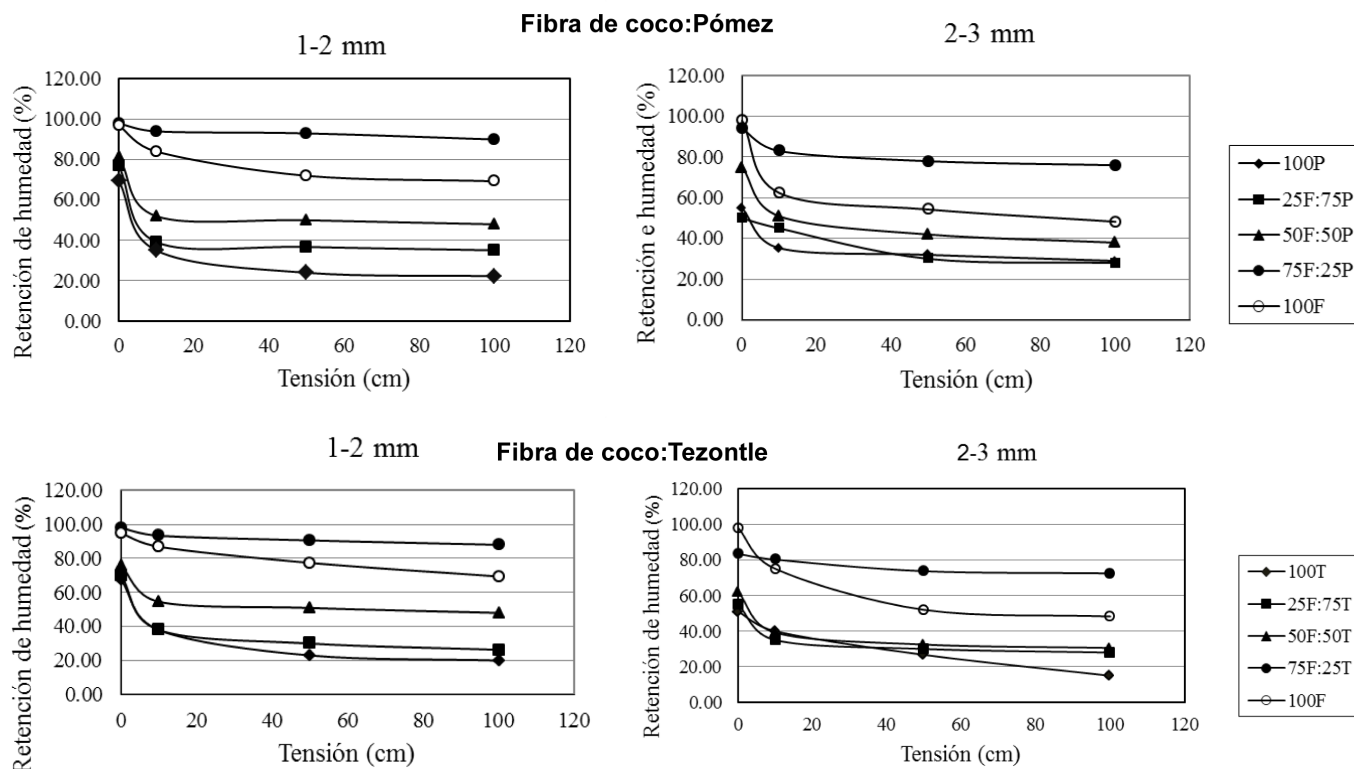


FIGURA 3. Curvas de liberación de agua en mezclas de materiales a dos tamaños de partícula.

FIGURE 3. Water release curves in mixtures of materials at two particle sizes.

individuales, sin importar sus diámetros. Las mezclas que retienen la mayor cantidad de humedad volumétrica son las 75:25 (hasta 98 %), seguido por las de 50:50 (60-82 %) de Fc:P o Fc:T. Las que retienen menor cantidad de humedad son los materiales inorgánicos puros (entre 55 y 70 %; T y P respectivamente); aunque los materiales y mezclas con diámetros de 2-3 mm retienen una cantidad de humedad ligeramente mayor.

Llama la atención la forma de la curva de retención de agua que se presenta en las mezclas con las mayores cantidades de material inorgánico y en los materiales inorgánicos puros. Las mezclas puras (orgánicas e inorgánicas) y los materiales cuya relación es menor de 50, sobre todo en partículas de 2-3 mm, son los que retienen menos agua (entre 55 y 70) a tensiones de 0-10 cm de columna de agua. En el caso de las mezclas 75:25, la retención de humedad disminuye de 3 a 11 % (tensiones de 0-10 cm), la cual se aprecia por la pendiente; después tiene una ligera caída, prácticamente una recta horizontal, lo que significa que se mantiene la retención de humedad hasta la tensión de 100 cm.

Cuando se relacionó el porcentaje y tamaño de los poros con el agua retenida a diferentes tensiones de columna de agua, se encontró que las mezclas con mayor número de poros dentro y entre partículas e interconectados (mezclas de 75 y 25 Fc: T o P, partículas 2-3 mm), retienen más agua; contrariamente a las mezclas donde ocurren

Greenhouse assay

The results of the response variables in lettuce seedlings are presented in Table 2. Statistical differences were observed in mixtures with higher organic material content (75:25 or 100 %), especially with the peat which emergence drastically decreased (up to 11 %). In the other proportions, no significant differences were found.

The mixtures 75:25 of Fc, with any of the inorganic materials, showed the highest values in PMFA, PMFR, PMSA and PMSR, except for plant height, which were statistically different to the control. In peat, lettuce seedlings showed a higher height; however, these beat down because the stems and leaves grew thin and elongated.

T presented the lowest values in PMFA, PMFR and PMSR variables; whereas, P showed the lowest height with an average of 5.06 cm. Treatments Fc:P 75:25 and Fc:T (50:50 and 75:25), showed the highest values of leaf fresh matter weight; whereas, T had the lowest ones. Finally, the best treatments regarding the PMSA, corresponded to Fc-P 25:75 and Fc:T 75:25 (with mean values of 0.060 and 0.059 g·plant⁻¹, respectively); whereas, PMFR and PMSR variables occurred in the Fc:T or Fc:P treatments with a 75:25 ratio.

In Figure 4, the effect of mixtures (Fc:P) is shown, at different proportions of organic / inorganic materials of 1-2

macroporos (empaquetamiento simple y compuesto), como en los materiales inorgánicos puros, donde la retención de agua fue menor.

Ensayo en invernadero

Los resultados de las variables respuesta en plántulas de lechuga se presentan en el Cuadro 2. Se encontraron diferencias estadísticas en las mezclas con mayor contenido de material orgánico (75:25 o 100 %), sobre todo con la turba cuya emergencia disminuyó drásticamente (hasta 11%). En las otras proporciones, no se encontraron diferencias significativas.

Las mezclas 75:25 de Fc, con cualquiera de los materiales inorgánicos, presentaron los más altos valores en PMFA, PMFR y PMSA y PMSR, a excepción de la altura de la planta, mismos que fueron estadísticamente diferentes al testigo. En la turba, las plántulas de lechuga presentaron la mayor altura; sin embargo, éstas acamaron debido a que los tallos y las hojas crecieron delgados y alargados.

En T se presentaron los valores más bajos en las variables PMFA, PMFR y PMSR; mientras que, en la P pura ocurrió la menor altura con una media de 5.06 cm. Los tratamientos Fc:P 75:25 y Fc:T (50:50 y 75:25), mostraron los valores más altos de peso de materia fresca de hoja; mientras que, en T puro los valores fueron los más bajos. Finalmente, los mejores tratamientos en cuanto al PMSA, correspondieron a Fc-P 25:75 y Fc:T 75:25 (con medias de 0.060 y 0.059 g/planta⁻¹, respectivamente); en tanto que, las variables PMFR y PMSR ocurrieron en los tratamientos Fc:T o Fc:P con proporción 75:25.

En la Figura 4, se ejemplifica el efecto de las mezclas (Fc:P), a diferentes proporciones de materiales orgánicos/inorgánicos de 1-2 mm de diámetro, sobre el crecimiento de las raíces y calidad de cepellón. La mezcla 75Fc:25T

mm diameter, on root growth and root ball quality. The mixture 75Fc:25T showed the best root ball quality (Figure 4a), reflected in a firm consistency and homogeneous radical distribution, but with abundant radical hairs on the surface (Figure 4d). In the rest of the combinations or pure materials, root ball showed loose or slightly firm consistency, with few thick roots and absence of radical hairs (Figures 4b and c). In the case of the peat, roots were concentrated on the surface.

DISCUSSION

The variation in particle size generates different physical properties (Verdonck and Demeyer, 2004; Anicua *et al.*, 2009) and when materials of different nature are mixed, their physical and micromorphological properties are even more complex. This is due to the fact that organic and inorganic materials show different pore types with different functions (Pape and Lager, 1994), and so their properties vary depending on the proportion in which were mixed.

Pure coir fiber of 2-3 mm reaches high capacity of gravimetric moisture retention (up to 960 %), due to its high inter-particle pore content (Vence, 2008), but it easily releases it because it has compound packing macro-pores (Hillel, 1998). In the case of inorganic particles (T or P), pores consist of simple packing and vesicles; the simple packing pores being continuous and permanent, contribute to the adequate material drainage (Or and Weaigh, 2000); whereas, vesicles being occluded, have no fluids exchange (Lemaire, 1995). However, vesicle pores both in the P and in T retained between 55 and 70 % gravimetric moisture, this means that they have interconnection (Segura *et al.* 2008, 2011; Tamari *et al.*, 2005).

Regarding to the volumetric moisture, the decrease in size particle (1-2 mm), in both organic and inorganic mate-

CUADRO 2. Variables respuesta de plantas de lechuga en diferentes sustratos (mezclas y materiales individuales).

TABLE 2. Response variables of lettuce plants in different substrates (mixtures and individual materials).

Tratamientos	G (%)	Altura (cm)	PMFA (g)	PMFR (g)	PMSA (g)	PMSR (g)
T1 Fc-Pp 25:75	96 a	6.37 b ²	0.73 abc	0.14 abc	0.060 a	0.021 ab
T2 Fc-Pp 50:50	95 a	6.31 bc	0.76 ab	0.15 abc	0.055 ab	0.020 ab
T3 Fc-Pp 75:25	88 a	6.29 bc	0.85 a	0.20 ab	0.049 abc	0.020 ab
T4 Fc-T 25:75	97 a	6.50 b	0.76 ab	0.13 bc	0.058 ab	0.021 ab
T5 Fc-T 50:50	97 a	6.38 b	0.86 a	0.16 abc	0.057 ab	0.022 ab
T6 Fc-T 75:25	82 a	6.18 bc	0.85 a	0.22 a	0.059 a	0.025 a
T7 Fc 100	40 b	5.91 bc	0.68 abc	0.15 abc	0.039 c	0.014 ab
T8 Pp 0:100	94 a	5.06 c	0.62 bc	0.12 bc	0.048 abc	0.016 ab
T9 T 0:100	94 a	5.42 bc	0.56 c	0.09 c	0.043 bc	0.013 b
T10 Pm 100	11 c	8.55 a	0.81 ab	0.11 c	0.052 abc	0.019 ab

²Medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes en cada columna (DMS, p<0.05). G: % de germinación. PMFA: peso de materia fresca de la parte aérea (g), PMFR: peso de materia fresca de raíz (g), PMSA: peso de materia seca de parte aérea (g), PMSR: peso de materia seca de raíz.

²Means with the same letter are not statistically different in each column (DMS, p<0.05). G: % of germination. PMFA: fresh matter weight of the aerial part (g), PMFR: root fresh matter weight (g), PMSA dry matter weight of the aerial part (g), PMSR: root dry matter weight.

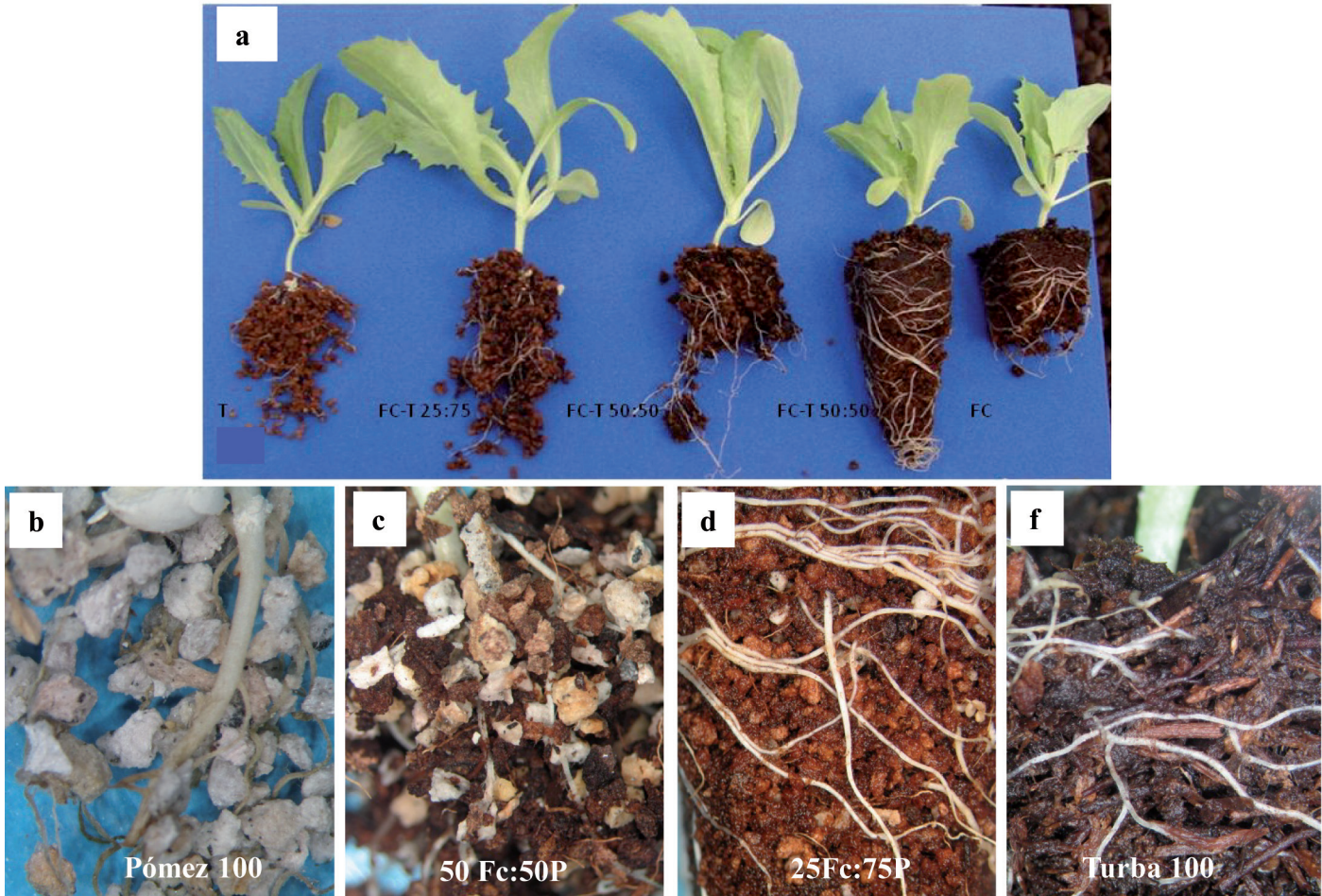


FIGURA 4. a) Cepellones de plántulas de lechuga en diferentes proporciones de mezclas de fibra de coco (Fc): tezontle (T) en partículas de 1-2 mm de diámetro; b,c,d) Distribución de raíces en la mezcla Fc:P de 2-3 mm de diámetro; e) distribución de raíces en turba. La fibra de coco son las partículas pardo amarillento y las pómez son las partículas blancas.

FIGURE 4. a) Root balls of lettuce seedlings in different proportions of mixtures of coir fiber (Fc): volcanic stone (T) in particles with a diameter of 1-2 mm; b, c, d). Roots distribution in mixture Fc:P of 2-3 mm diameter; e) roots distribution in peat. The yellowish-brown particles correspond to coir fiber and the white particles correspond to pumice.

presentó la mejor calidad del cepellón (Figura 4a), reflejada en una consistencia firme y distribución radical homogénea, pero con abundantes pelos radicales en la superficie (Figura 4d). En las demás combinaciones o materiales puros, el cepellón presentó consistencia suelta o ligeramente firme, con pocas raíces gruesas y ausencia de pelos radicales (Figuras 4b y c). En el caso de la turba, las raíces se concentraron en la superficie.

DISCUSIÓN

La variación en tamaño de partícula genera propiedades físicas diferentes (Verdonck y Demeyer, 2004; Anicua *et al.*, 2009) y cuando se mezclan materiales de naturaleza diferente, sus propiedades físicas y micromorfológicas se hacen aún más complejas. Esto se debe a que los materiales orgánicos e inorgánicos presentan diferentes tipos de poros con diferentes funciones (Pape y Lager, 1994), por lo que sus propiedades varían en función de la proporción en la que se mezclen.

La fibra de coco pura de 2-3 mm alcanza alta capacidad

relacionada con su estructura esponjosa, reduce su capacidad de retención de agua, ya que su espacio poroso total también disminuye (Anicua *et al.*, 2009).

When the organic and inorganic particles, having the same diameter, are combined complex packing pores are formed (Bullock *et al.*, 1985). Consequently, the physical properties are related to the proportion of each particle type (higher water storage is related to higher Fc content, and higher percolation to higher content of T or P), because of that there is a direct relationship with the gravimetric moisture in anyone of the analyzed sizes. Bunt (1984) mentions that if the air capacity in a substrate wants to be increased, thick inorganic materials should be added to the mixture; however, this author did not consider that inorganic particles can also store moisture. Regarding to the non-direct relationship between water retention and the proportion of organic / inorganic materials is due to the amount of unclosed pores are not always fully occupied with water (Vence, 2008). Mixtures 75:25 of Fc with P and T retained the greatest amount of water (98 %), even greater than Fc pure, caused by the presence of materials bands, an hete-

de retención de humedad gravimétrica (hasta 960 %), por su alto contenido de poros inter-partícula (Vence, 2008), pero la libera fácilmente ya que presentan macroporos de empaquetamiento compuesto (Hillel, 1998). En el caso de las partículas inorgánicas (T o P), los poros que ocurren son de empaquetamiento simple y vesículas; los primeros al ser continuos y permanentes, contribuyen al buen drenaje del material (Or y Weaigh, 2000); mientras que los segundos, al estar ocluidos no tienen intercambio de fluidos (Lemaire, 1995). Sin embargo, los poros vesícula tanto en la P como el T retienen entre 55 y 70 % de humedad gravimétrica, lo que significa que tienen interconexión (Segura *et al.* 2008, 2011; Tamari *et al.*, 2005).

En cuanto a la humedad volumétrica, la disminución en el tamaño de partícula (1-2 mm), tanto los materiales orgánicos como inorgánicos, reducen su capacidad de retención de agua, ya que su espacio poroso total también disminuye (Anicua *et al.*, 2009).

Cuando se combinan las partículas orgánicas e inorgánicas de un mismo diámetro, se forman poros de empaquetamiento complejo (Bullock *et al.*, 1985), y las propiedades físicas se relacionan con la proporción de cada tipo de partícula (más almacenamiento de agua a mayor contenido de Fc y mayor percolación a mayor contenido de T o P), de ahí que se presente una relación directa con la humedad gravimétrica en cualquiera de los tamaños analizados. Bunt (1984) menciona que si se desea incrementar la capacidad de aire de un sustrato se deben agregar en la mezcla materiales inorgánicos gruesos; sin embargo, este autor no consideró que las partículas inorgánicas también pueden almacenar humedad. En cuanto a la relación no directa entre la retención de agua y la proporción de materiales orgánicos/inorgánicos, se debe a que la cantidad de poros cerrados no siempre están totalmente ocupados por agua (Vence, 2008). Las mezclas 75:25 de Fc con P y T retienen la mayor cantidad de agua (98 %), incluso mayor que la Fc pura, ocasionada por la presencia de bandas de materiales, un sistema heterogéneo de poros y empaquetamiento cerrado de partículas (Figura 1i). Este tipo de relaciones de partículas y poros disminuyen el flujo del agua (Stoops, 2010). Caso contrario ocurrió cuando sólo se presenta un tipo de macroporo (ya sea simple o compuesto) donde la percolación de agua fue mayor (hasta 45 % P), como en el caso de las mezclas con proporciones menores de 50, de cualquier material y en materiales puros. La distribución aleatoria de las partículas y la continuidad de los poros generaron condiciones para mayor percolación de agua (Pape y Lager, 1994).

En cuanto al espacio poroso, el EPT_r, medido directamente en sección delgada, fue 20 % menor que la EPT estimada. Esta diferencia puede ser importante para la interpretación de la retención y liberación de agua en un sustrato. En la mayoría de las investigaciones de las propiedades físicas de los sustratos, la porosidad no se obtiene de manera directa, sino que se calcula

rogeneous system of pores and close packing of particles (Figure 1i). This kind of relationships of particles and pores decreases the flow of water (Stoops, 2010). The opposite occurred when only one type of macropore was present (either simple or compound) where water percolation was greater (up to 45 % P), as in the case of mixtures with proportions under 50, from any material and in pure materials. Random distribution of the particles and the continuity of the pores created conditions for greater water percolation (Pape and Lager, 1994).

Regarding the porous space, EPT_r, measured directly in thin section, was 20 % lower than the estimated EPT. This difference may be important for the interpretation of water release and retention in a substrate. Porosity is not obtained directly; porosity is calculated, in most research on physical properties of substrates (Horn and Baumgartl, 2000). For example, in the case of the water release curve proposed by De Boodt *et al.*, (1974), it begins with a calculated value and if the value is overestimated or underestimated, it will have an impact on all projected and percentages of readily available water. Moisture retention values do not indicate anything about pore size (Vence, 2008), which is obtained with the analysis of the thin sections. The image analysis allows to determine the shape and connectivity of pores, as well as to quantify them and have a better understanding of the physical properties of the materials (Stoops, 2010), regarding to the relationship water/air. Nonetheless more analyses are needed (more images) in greater number of thin sections, in order to obtain a more complete knowledge of materials mixtures in the formulation of substrates.

Finally, the best response variables in lettuce seedlings were observed in the mixtures 75:25 of Fc with T or P, where high holding capacity of gravimetric moisture (240 %) and volumetric moisture (98 %), and a total porous space of 88 % occur (Table 1). According to Ansorena (1994), these are the optimal conditions for crop development. The presence of heterogeneous pores (of storage and percolation), generated conditions that favored root development, maintaining the integrity of the root ball and allowing an easy removal from the container (Landis, 1990; Quesada y Méndez, 2005). Root differentiation, fine roots and radicals hairs on the root ball surface (where Fc dominates) and mean roots at the base (when T or P dominates; Figure 4b), may have been due to differences in moisture retention of each one of them. It is recommended to study in greater detail this phenomenon, because moisture retention and percolation conditions in each one of the bands provoked the expression of different roots types.

The response variables of lettuce seedlings varied in peat and in coir mixtures with a 50 or less ratio and pure inorganic materials (P or T), with a particle size of 1-2 mm. As mentioned above, this may be due to the dominance of a single type of pores (micro or macro), which have different function (Pape and Lager, 1994). The isotropy of the porous space and the basic random distribution of particles generated greater percolation. These traits constituted a

(Horn y Baumgartl, 2000). Por ejemplo, en la curva de liberación de agua propuesto por De Boodt *et al.* (1974), se inicia con un valor calculado y si éste está sobre o subestimado, repercutirá en todo lo proyectado y en los porcentajes de agua fácilmente disponible. Además, los valores de la retención de humedad no dicen nada con respecto al tamaño de los poros (Vence, 2008), lo que si se obtiene con el análisis de las secciones delgadas. El análisis de imágenes permite no sólo determinar la forma y conectividad de los poros, sino además, cuantificarlos y tener un mejor entendimiento de las propiedades físicas de los materiales (Stoops, 2010), en cuanto a la relación agua/aire. No obstante, es necesario que se lleven a cabo un mayor número de análisis (más imágenes) en un mayor número de secciones delgadas, con el propósito de lograr un conocimiento más completo de las mezclas de materiales en la formulación de sustratos.

Finalmente, las mejores variables respuesta en plántulas de lechuga se presentaron en las mezclas 75:25 de Fc con T o P, en donde ocurren alta capacidad de retención de humedad gravimétrica (240 %) y volumétrica (98 %), y un espacio poroso total de 88 % (Cuadro 1). De acuerdo con Ansorena (1994), estas son las condiciones óptimas para el desarrollo de los cultivos. Asimismo, la presencia de poros heterogéneos (de almacenamiento y percolación), generaron condiciones que favorecieron el desarrollo radicular, lo que permitió mantener la integridad del cepellón y su fácil extracción del contenedor (Landis, 1990; Quesada y Méndez, 2005). Además, la diferenciación de raíces, raíces finas y pelos radicales en la superficie del cepellón (donde domina la Fc) y raíces medias en la base (cuando domina el T o P; Figura 4b), pudo deberse a las diferencias en retención de humedad de cada una de ellas. Se recomienda estudiar más a detalle este fenómeno, ya que las condiciones de retención de humedad y percolación en cada una de las bandas, provocaron la expresión de los diferentes tipos de raíces.

En la turba y en las mezclas de fibra de coco con una relación de 50 o menos y materiales inorgánicos puros (P o T), con un tamaño de partícula (1-2 mm), las variables respuestas de las plántulas de lechuga variaron. Como se mencionó anteriormente, esto puede deberse a la dominancia de un solo tipo de poros (micro o macro), los cuales tienen diferente función (Pape y Lager, 1994); además, la isotropía del espacio poroso y la distribución básica aleatoria de las partículas generaron mayor percolación. Estos rasgos constituyeron una limitante en el desarrollo de las plántulas de lechuga, debido a que presentaban o mayor saturación (donde limita la respiración de la planta), o percolación (que originó déficit de agua), ya que los riegos de 5 mm que se aplicaron diariamente a cada tratamiento fue insuficiente.

constraint in the development of lettuces seedlings because they showed higher saturation (where plant respiration is limited), or percolation (water deficit was caused), because the 5 mm daily watering applied to each treatment were insufficient.

CONCLUSIONS

Each particle size and proportion of mixture (organic/inorganic) shows different kinds of pores (simple packing, compound packing, complex packing, cracks and vesicles), sizes (macro and micro), and pores frequency; its particles are in bands or randomly distributed. These traits are directly related to the moisture retention of the different mixtures: greater retention to higher coir content, greater percolation in inorganic materials. In the case of materials mixtures, the arrangement of particles determines the water storage or percolation.

The best lettuce response variables were obtained with the mixtures 75:25, Fc:T or Fc:P, with the same particle size (1-2 mm), which generated greater moisture holding capacity, a heterogeneous or anisotropic pore system (complex packing pores) and a band distribution pattern that allowed water storage and percolation. In contrast, the rest of mixtures with a heterogeneous or anisotropic pore system, either of simple or compound packing pores and a random basic distribution of particles, showed either greater moisture retention or percolation, these conditions limit the growth of seedlings.

There is an underestimation of the total pore percentage (20 %) when determined through an image analysis in thin sections with those calculated from densities (real and bulk), therefore it is necessary to carry out more studies where both methodologies can be compared.

Micromorphology can be useful to understand the behavior of substrates physical properties determining the type, size and continuity of pores, characteristics that affect the availability of water-air.

End of Version English

CONCLUSIONES

Cada tamaño de partícula y proporción de mezcla (orgánica/inorgánica) presenta diferentes tipo de poros (empaquetamiento simple, compuesto, complejo, fisuras y vesículas), tamaños (macro y micros) y frecuencia de poros; sus partículas se distribuyen de manera aleatoria y en bandas. Estos rasgos están directamente relacionados con la retención de humedad de las diferentes mezclas: mayor retención a mayor contenido de fibra de coco, mayor percolación en materiales inorgánicos. En mezclas de materiales, es el arreglo de las partículas que determina el almacenamiento o percolación de agua.

Las mejores variables respuesta de lechuga se obtuvieron con la mezcla 75:25, Fc:T o Fc:P, con un mismo tamaño de partícula (1-2 mm), la cual favoreció una mayor capacidad de retención de humedad, un sistema de poros heterogéneo o anisotrópico (poros de empaquetamiento complejo) y un patrón de distribución en bandas que permitieron almacenamiento y percolación de agua. En contraste, el resto de las mezclas con sistema de poros homogéneo o isotrópico, ya sea de poros de empaquetamiento simple o compuesto y una distribución básica aleatoria de partículas, presentaron o mayor retención de humedad o percolación, condiciones que limitaron el crecimiento de las plántulas.

Hay una subestimación del porcentaje de poros totales (20 %) cuando se determinan a través de un análisis de imágenes en secciones delgadas con los calculados a partir de densidades (real y aparente), por lo que es necesario llevar a cabo más estudios en donde se comparen ambas metodologías,

La micromorfología puede ser útil para comprender el comportamiento de las propiedades físicas de los sustratos al determinar directamente el tipo, tamaño y continuidad de los poros, características que afectan la disponibilidad de agua-aire.

LITERATURA CITADA

- ANICUA, S. R.; GUTIÉRREZ C., M.C.; SÁNCHEZ G., P.; ORTIZ S., C.; VOLKE H., V. H.; RUBIÑOS P., J. E. 2009. Tamaño de partícula y relación micromorfológica en propiedades físicas de perlita y zeolita. *Agricultura Técnica en México* 35(2): 147-156.
- ANICUA, S. R.; GUTIÉRREZ, C. M. C.; SÁNCHEZ, G. P. 2008. Physical and micromorphological properties of organic and inorganic materials for preparing growing media. *Acta Hort.* 779: 577-582.
- ANSORENA, M. J. 1994. *Sustratos, propiedades y caracterización*. Mundi Prensa. Madrid, España. 172 p.
- BEARDSELL, D. V.; NICHOLS, D. G.; JONES, D. L. 1979. Physical properties of nursery potting-mixtures. *Scientia Horticulturae* 11: 1-8.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. 1999. *The nature and properties of soil*. Ed. Prentice Hall. New Jersey. United States of America. 881 p.
- BUI, E. N. 1990. Applications of image analysis to soil micromorphology. USDA-ARS, Southern Piedmont Conservation Research Center, P.O. Box 555, Watkinsville, GA 30677 U.S.A.
- BULLOCK, P.; FEDEROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. 1985. *Handbook for soils thin section description*. Wayne Research Publications, England. 152 pp.
- BUNT, A. C. 1984. Physical properties of mixtures of peat and minerals of different particle size and bulk density for potting substrates. *Acta Hort.* 150:143-154.
- BURÉS, S. 1997. *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España. 342 p.
- CABRERA, R. I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 5: 5-12.
- CRAWFORD, J. W.; MATSUI, N.; YOUNG, I. M. 1995. The relation between the moisture release curve and the structure of soil. *Europ. J. Soil Science* 46:369-375.
- DE BOODT, M.; VERDONCK, O.; CAPAERT, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37: 2054-2062.
- HILLER, D.; 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego, C.A. 771 pp.
- HORN, R.; BAUMGARTL, T. 2000. Dynamic properties of soils. A19-A46. In: *Handbook of Soil Science* (Summer, M. E. Ed. In Chief). CRC Press. Washington, D. C.
- JONGERIUS, A.; SCHOONDERBEEK, S.; JAGER, A. 1972. The application of the Quantimet 720 in soil micromorphology. *The Microscope* 20:243-254.
- LANDIS, T. D. 1990. Growing media. In LANDIS, T.D.; TINUS, R. W.; McDONAL, S. E.; BARNETT, J. P. *The container tree nursery manual, Volume 2. Agric. Handbook*. 674. Washington, DC; U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 41-87.
- LEMAIRE, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Hort.* 39: 273-284.
- MARCELINO, V.; CNUUDE, V. VAN STEELAND, S.; CARO, F. 2007. An evaluation of 2d-imagen analysis techniques for measuring soil microporosity. *European Journal of Soil Science* 58:133-140.
- MORAN, C. J.; MCBRADNEY, A. B.; KOPPI, A. J. 1989. A rapid method or analysis of macropores structure. I. Specimen preparation and digital binary image production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:921-928.
- MURPHY, C. P., 1986. *Thin sections preparation of soil and sediments*. AB Academic Publishers Berkhamsted. Great Britain.
- OR, D.; WRAITH, J. M. 2000. Soil water content and water potential relationships. A-53 – A83 pp. In *Handbook of soil Science*. SUMMER, M.E. (ed). CRC press. Wastington, D.C.
- OROZCO, R.; MARFA, O.; BURÉS, S. 1995. Water status of graded perlites. *Acta Hort.* 401: 137-144.
- PAPE, TH.; LAGGER, D. 1994. *Manual for soil description and classification*. Department of Soil Science and Geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- PAPE, TH.; LAGGER, D. 1994. *Manual for soil descriptions and classification*. Department of Soil Science and geology. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- QUESADA, R. G.; MÉNDEZ, S. C. 2005. Evaluación de sustratos para almácigos de hortalizas. *Agronomía Mesoamericana* 16 (002): 171-183.
- SEGURA-CASTRUITA., M. A.; PRECIADO-RANGEL, P.; GONZÁLEZ-CERVANTES, G.; FRÍAS-RAMÍREZ, J. E.; GAR-

- CÍA-LEGASPI, G.; OROZCO-VIDAL, J. A.; ENRÍQUEZ-SÁNCHEZ, M. 2008. Adición de material pomáceo a sustratos de arena para incrementar la capacidad de retención de humedad. *INTERCIENCIA*. 33: 923-928.
- SEGURA C., M. A.; RAMIREZ S., A. R.; GARCIA L., G.; PRECIADO R., P.; GARCIA H., J. I.; YESCAS C., P.; FORTIZ H., M.; OROZCO V., J. A.; MONTEMAYOR T., J. A. 2011. Desarrollo de plantas de tomate en un sustrato de arena-pómez con tres diferentes frecuencias de riego. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 17(Especial 1): 25-31, 2011.
- STOOPS, G. 2003. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 183 p.
- STOOPS, G. 2010. Micromorphology as a tool in soil and regolith studies 1-8 p. *In* Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. G. Stoops, V. Marcelino and F. Mees (eds). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- THE R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING. 2008. R. Versión 2.8.0. ISBN 3-900051-07-0.
- VARGAS T., P.; CASTELLANOS R., J. Z.; MUÑOZ J., J.; SANCHEZ, P.; TIJERINA CH., L.; LOPEZ R., R. MA.; MARTINEZ S., C; OJODEAGUA A., J.L. 2008. Efecto del tamaño de partícula del tomate sobre algunas propiedades del tezontle en Guanajuato, México *Agricultura Técnica en México* 34: 323-331.
- VENCE, I. B. 2008. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 26:105-114.
- VERDONCK, O. R.; PENINCK, R.; DE BOODT M. 1984. The physical properties of different horticultural substrates. *Acta Hort.* 150:155-167.
- VERDONCK, O.; DEMEYER, P. 2004. The Influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Hort.* 644: 99-101.
- TAMARI, S.; SAMANIEGO M., D.; BANDAL, E. R.; ORDAZ CH., V. M. 2005. Particle density of volcanic scoria determined by water pycnometry. *Geotechnical Testing Journal* 28:1-6.