

ASERRÍN DE PINO COMO SUSTRATO HIDROPÓNICO. I: VARIACIÓN EN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DURANTE CINCO CICLOS DE CULTIVO

Joel Pineda-Pineda¹; Felipe Sánchez del Castillo²; Armando Ramírez-Arias³;
Ana María Castillo-González²; Luis Alonso Valdés-Aguilar⁴; Esaú del Carmen Moreno-Pérez²

¹Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 carretera México- Texcoco. Chapingo Estado de México. C. P. 56230 Correo-e: pinedapjoel@yahoo.com.mx (*Autor para correspondencia).

²Profesor-Investigador. Departamento de Fitotecnía, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 carretera México- Texcoco. Chapingo Estado de México. C.P. 56230.

³Profesor-Investigador. Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 carretera México- Texcoco. Chapingo Estado de México. C. P. 56230.

⁴Profesor-Investigador del Departamento de Horticultura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, MÉXICO. C. P. 25315.

RESUMEN

En agricultura bajo ambiente protegido se ha dado una sustitución gradual del suelo por sustratos, debido a limitantes físicas, químicas y biológicas. La utilización de materiales que son subproductos o desechos agroindustriales posibilita tener sustratos más baratos y un impacto ecológico positivo, como es el caso de la industria maderera que genera grandes volúmenes de aserrín con potencial como sustrato. Las características físicas de los sustratos son las más importantes, ya que una vez establecido el cultivo, difícilmente se pueden modificar y deben permanecer constantes a lo largo del ciclo del cultivo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación de las características físicas del sustrato formado por mezclas aserrín/tezontle durante varios ciclos de cultivo para determinar su factibilidad de uso. Para ello se establecieron 10 tratamientos que se formaron de la combinación de tres tamaños de partícula del tezontle (≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm) con tres relaciones aserrín/tezontle (90/10, 80/20 y 70/30) más un tratamiento de 100 % aserrín. Estos tratamientos se evaluaron durante cinco ciclos continuos de cultivo con jitomate (30 meses). Al sustrato original y al final de cada ciclo se midieron porosidad total, volumen de partículas, capacidad de retención de humedad, capacidad de aireación y densidad aparente. Se encontró poca variación en la densidad aparente, pero la porosidad, la retención de humedad y la capacidad de aireación disminuyeron gradualmente durante los cinco ciclos de cultivo con jitomate. La capacidad de aireación fue la característica física que presentó mayor variación, mostrando valores por debajo del adecuado después de 24 meses de cultivo.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: Porosidad, humedad, aireación, densidad aparente.

PINE SAWDUST AS HYDROPONIC SUBSTRATE. I: VARIATION IN PHYSICAL PROPERTIES DURING FIVE CROP CYCLES

ABSTRACT

In agriculture under controlled environment, soil has been replaced by substrates due to physical, chemical and biological limitations. The use of materials coming from agro industrial wastes or byproducts facilitate the use of low cost substrates and enable a positive ecological impact, which is the case of the forest industry that produce a large volume of pine sawdust with potential as a substrate. Physical properties of the substrates are the most important, because once the crop has been settled, it can hardly be modified and it must remain constant throughout crop cycle.

The objective of this work was to evaluate the variation in physical properties of the substrate formed by a sawdust/volcanic rock mixture during several crop cycles to determine the feasibility of their use. For this purpose, 10 treatments were used, which consisted of the combination of three volcanic rock particle sizes (≤ 3 , 3-6 and 6-12 mm) and three sawdust/volcanic rock ratios (90/10, 80/20 and 70/30) plus a treatment 100 % pine sawdust. These treatments were tested during five continuous tomato crop cycles (thirty months). Total porosity, particle size, moisture retention capacity, air capacity and bulk density were measured at the end of each cycle and also from the original substrate. Little variation in bulk density was observed, but total porosity, moisture retention capacity and air capacity decreased gradually during the five tomato crop cycles. Air capacity was the physical characteristic that showed greater variation, showing values below the appropriate after 24 months of cultivation.

ADDITIONAL KEYWORDS: Porosity, moisture, aeration, bulk density

INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de los sistemas de producción agrícola bajo ambiente protegido y a las limitantes físicas (profundidad, textura, pedregosidad, compactación), químicas (salinidad, alcalinidad, acidez, inmovilización y fijación nutrimental) y biológicas (contaminación con patógenos y nematodos) que presentan muchos suelos, se ha dado una sustitución gradual del suelo por sustratos hidropónicos.

Existe gran variación de materiales que pueden ser adecuados como sustratos de cultivo, pero se deben considerar sus características físicas, químicas y biológicas, las necesidades del cultivo, así como la compleja interacción de procesos y fenómenos que se suscitan en la relación contenedor-sustrato-planta-ambiente.

Fonteno y Bilderback (1993) mencionan que un sustrato debe cumplir cuatro condiciones: 1) proveer agua, 2) suministrar nutrimentos, 3) permitir el intercambio de gases entre la zona radicular y el exterior del sustrato, y 4) dar soporte a las plantas. Además, Raviv y Lieth (2008) indican que debe proporcionar un ambiente que mantenga un balance biológico.

De todas las propiedades del sustrato, las físicas son las más importantes, ya que una vez establecido el cultivo, difícilmente pueden manipularse (Abad *et al.*, 2004; Blok *et al.*, 2008) y deben permanecer estables durante el ciclo del cultivo (Raviv y Lieth, 2008). Para materiales orgánicos, la resistencia o facilidad que ofrecen a la descomposición microbiana (bioestabilidad) es un aspecto muy importante que influirá en el mantenimiento de las propiedades físicas durante el crecimiento de las plantas.

De acuerdo con varios autores (Abad *et al.*, 2004; Burés, 1997; Blok *et al.*, 2008), las consecuencias de la degradación biológica sobre las propiedades físicas del sustrato son las siguientes: 1) pérdida de volumen y disminución de la porosidad debido a la compactación del sustrato, 2) disminución de la capacidad de aireación y aumento de la capacidad de retención de humedad a capacidad contenedor, y 3) alteración del tamaño de partículas.

Además, en el proceso del cultivo se presenta la compresibilidad del sustrato por la acción de fuerzas mecánicas durante la manipulación, compactación durante el transporte o contracción del sustrato cuando se presenta variación en el contenido de humedad (humedecimiento y secado), y segregación de partículas finas al fondo del contenedor durante el riego, lo que hace que se pierda la forma y acomodo original del sustrato y se presente alteración en las relaciones agua/aire del sustrato (Lemaire, 1995; Abad *et al.*, 2004).

El perfeccionamiento del manejo de los sistemas de producción agrícola usando sustratos, requiere una base de conocimientos mayor sobre la variación en las características físicas durante el ciclo de cultivo para poder manejar el suministro de agua y nutrimentos (Medrano *et al.*, 2001;

INTRODUCTION

Soil has gradually been replaced by hydroponic substrates, due to the increase of agricultural production systems under protected environment and physical (depth, texture, stoniness, compaction), chemical (salinity, alkalinity, acidity, immobilization or fixation of nutrients) and biological limitations (pollution with pathogens and nematodes) found in many soils.

There is wide variety of materials, which may be suitable as growth media, but their physical, chemical and biological properties, crop requirements and the complex interaction of processes and phenomena that arise in relation container-substrate-plant-atmosphere must be considered.

Fonteno and Bilderback (1993) said that a substrate must meet four conditions: 1) to provide water, 2) to supply nutrients, 3) to allow gas exchange between the root zone and the exterior of the substrate, and 4) to provide support to the plants. Raviv and Lieth (2008) indicate that it should provide an environment that maintains biological balance.

Physical properties are the most important of all substrate properties, because once the crop is established, they can hardly be manipulated (Abad *et al.*, 2004; Blok *et al.*, 2008) and they must remain stable during the crop cycle (Raviv and Lieth, 2008). In the case of organic materials, resistance or facility offered to the microbial decomposition (biostability) is a very important aspect that will influence the maintenance of physical properties during the growth of plants.

According to several authors (Abad *et al.*, 2004; Burés, 1997; Blok *et al.*, 2008), the consequences of biological degradation on physical characteristics of the substrate are as follows: 1) loss of volume and decrease of the porosity due to compaction of the substrate, 2) reduction of the aeration capacity and increase of the moisture retention capacity to container capacity and 3) variation in particles size.

Furthermore, in the growing process occurs the compressibility of the substrate due to the action of mechanical forces during handling, compaction during transport or contraction of the substrate when there is variation in moisture content (wetting and drying), and segregation of fine particles at the bottom of the container during irrigation, causing the loss of the original form and place of the substrate and generating an alteration in the water/air substrate ratio (Lemaire, 1995; Abad *et al.*, 2004).

Improving the management of agricultural production systems using substrates, requires a greater knowledge base on the variation in physical properties during the crop cycle to manage the distribution of water and nutrients (Medrano *et al.*, 2001; Suay *et al.*, 2003) and improve commercial production systems (Kläring *et al.*, 1999; Roca *et al.*, 2003).

Suay *et al.*, 2003) y mejorar los sistemas de producción comercial (Kläring *et al.*, 1999; Roca *et al.*, 2003).

Actualmente se comercializan sustratos de características y orígenes diversos, de forma pura o en mezclas de dos o más materiales, que buscan satisfacer las necesidades específicas de cada cultivo; sin embargo, sus altos precios (varios de ellos son de importación) limitan su acceso y uso a muchos productores. En las últimas décadas, se ha encontrado aplicación como medios de crecimiento a materiales que son subproductos o residuos de desecho de muy diversas actividades domésticas, urbanas e industriales (Resh, 1998; Sánchez y Escalante, 1988; Maher *et al.*, 2008). La incorporación de estos materiales posibilita tener productos más baratos y, a largo plazo, un impacto ecológico positivo.

El aserrín de pino (*Pinus* sp), que proviene de la industria maderera, es un material que tiene potencial como sustrato. En México se procesan anualmente poco más de 8 millones de metros cúbicos de madera, de la cual 70 % se destina a la industria maderera, donde el principal producto de desecho es el aserrín y virutas, con una producción estimada de 2.8 millones de metros cúbicos (SEMARNAT, 2007). Las propiedades físicas del aserrín dependen del tamaño de sus partículas y se recomienda que del 20-40 % sean inferiores a 0.8 mm. Es un sustrato ligero, con una densidad aparente de 0.1 a 0.45 g·cm⁻³. La porosidad total es superior al 80 %, la capacidad de retención de agua es de baja a media, pero su capacidad de aireación suele ser adecuada (Maher *et al.*, 2008). La ventaja principal del aserrín es su bajo costo, pero al ser un material orgánico entra en descomposición, lo que reduce su vida útil como sustrato. Es posible que mezclando el aserrín con materiales inorgánicos como el tezontle (arena volcánica), los cambios en sus propiedades físicas sean más lentos, proporcionando un sustrato más durable sin incrementar los costos.

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue determinar la variación en las características físicas del aserrín de pino solo y mezclado con distintas proporciones de tezontle durante cinco ciclos de cultivo, para determinar el tiempo que se mantienen las características principales que definen la calidad de un sustrato hidropónico, como son la retención de humedad, la capacidad de aireación, la densidad aparente y la porosidad total.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

Éste se llevó a cabo en un invernadero de cristal con ventilación lateral y cenital ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo. El control del microclima se realizó con extractores de aire húmedo para evitar temperaturas mayores a 35 °C en verano, mientras que en invierno se utilizan calentadores eléctricos que suministran aire caliente para mantener temperaturas arriba de 10 °C.

Today, substrates from different origins and with different properties are sold in pure form or in mixtures of two or more materials, seeking to meet the specific needs of each crop; however, their high prices (some of them are imported) limit their access and use to many producers. In the last decades, materials coming from byproducts or waste residues of very different domestic, urban and industrial activities have been found as substrates (Resh, 1998; Sánchez and Escalante, 1988; Maher *et al.*, 2008). The use of these materials enable to have cheaper products and in the long term a positive ecological impact.

Pine sawdust (*Pinus* sp), which comes from the timber industry, is a material that has potential as substrate. In Mexico, just over 8 million cubic meters of wood are processed annually, of which 70 % goes to the timber industry, where the main waste product is sawdust and shavings, with an estimated production of 2.8 million cubic meters (SEMARNAT, 2007). Physical properties depend on the size of sawdust particles and it is recommended that 20-40 % of these particles have a size lower than 0.8 mm. It is a light substrate with a bulk density of 0.1 a 0.45 g·cm⁻³. Total porosity is greater than 80 %, moisture retention capacity is low to medium, but their aeration capacity is usually adequate (Maher *et al.*, 2008). The main advantage of sawdust is its low cost, but being an organic matter it decomposes, reducing its useful life as a substrate. It is possible that when mixing the sawdust with inorganic materials such as volcanic rock (volcanic sand), the variation of physical properties are slower, providing a more durable substrate without increasing costs.

Based on the foregoing, the objective of this work was to determine the variation in physical properties of pine sawdust alone and mixed with different proportions of volcanic rock during five crop cycles, to determine the time of preserving the main properties that define the quality of an hydroponic substrate, such as moisture retention, aeration capacity, bulk density and total porosity.

MATERIALS AND METHODS

Study location

This study was carried out in a glass greenhouse with lateral and zenithal ventilation located at the Universidad Autónoma Chapingo. The control of the microclimate was carried out using humid air extractors to avoid temperatures above 35 °C in summer, while in winter; electric heaters supplying hot air were used to keep temperatures above 10 °C.

Treatments and experimental design

Treatments were formed using a 3 x 3 factorial arrangement. One factor corresponded to the particle size of volcanic rock. The particle sizes were ≤3, 3-6 and 6-12

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos se formaron utilizando un arreglo factorial 3 x 3. Uno de los factores correspondió al tamaño de partícula del tezontle y los tres niveles fueron diámetros ≤ 3 , 3-6 y 6-12 mm, mientras que el segundo factor correspondió a relaciones aserrín/tezontle y los niveles fueron 90/10, 80/20 y 70/30. En todos los casos se usó aserrín de pino con diámetro de partícula ≤ 6 mm. La combinación de factores y niveles dio los siguientes tratamientos: T1: 90/10 (6-12 mm), T2: 80/20 (6-12 mm), T3: 70/30 (6-12 mm), T4: 90/10 (3-6 mm), T5: 80/20 (3-6 mm), T6: 70/30 (3-6 mm), T7: 90/10 (≤ 3 mm), T8: 80/20 (≤ 3 mm) y T9: 70/30 (≤ 3 mm); se incluyó además un T10 que consistió en 100 % aserrín de pino. Se usaron bolsas de plástico bicolor (blanco-negro) de 15 L, de las cuales se llenaron 10 con cada tratamiento de sustrato y se trasplantaron dos plántulas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* L.) variedad Tequila F1 en cada una. Las unidades experimentales se distribuyeron de acuerdo a un diseño completamente al azar, con un total de 10 tratamientos y 10 repeticiones.

Instalación y desarrollo experimental

El experimento se instaló en dos camas, cada una con dos hileras de bolsas y dos plantas por bolsa. Se establecieron cinco ciclos de cultivo con duración en promedio de seis meses cada uno. Al final de cada ciclo se removían los tallos junto con las raíces más gruesas, se tomaban las muestras para el análisis físico del sustrato y se acondicionaba el sistema para establecer el siguiente ciclo, periodo que duraba una semana. El fertirriego consistió en ocho riegos diarios con un sistema de goteo, colocando una estaca por planta. Durante los diferentes ciclos de cultivo, se aplicó la solución nutritiva de Steiner (1984) con una carga iónica de $20.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, incrementando la concentración de P a 1.5 y la de K a $7.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, para lograr el equilibrio entre cationes y aniones en la solución nutritiva.

Para el control del riego diario se consideró un drenaje de 15-25 %. Los cuidados principales consistieron en control preventivo de mosquita blanca (*Bemisia tabaci*) y de enfermedades producidas por *Phytophthora* sp, *Phytophthora* sp, y *Rhizoctonia* sp, así como las labores de manejo de la planta (eliminación de brotes laterales, tutorado, deshojado, polinización) para conducir el cultivo hasta formar seis a siete racimos.

VARIABLES MEDIDAS

Al inicio del experimento y al final de cada ciclo de cultivo se determinaron en los sustratos las propiedades físicas aplicando la metodología del porómetro propuesta por Fonteno y Bilderback (1993), Drzal *et al.* (1999) y Handreck y Black (2005), que en términos generales consistió en saturar el sustrato y posteriormente poner los contenedores a libre drenaje hasta el punto en que las fuerzas de retención del sustrato ya no permitieron la pérdida de agua. En este momento se midió el agua

mm diámetros, while the second factor corresponded to the sawdust/volcanic rock ratio (90/10, 80/20 and 70/30). In all cases, pine sawdust with particle diameter ≤ 6 mm was used. The combination of factors and levels provided the following treatments: T1: 90/10 (6-12 mm), T2: 80/20 (6-12 mm), T3: 70/30 (6-12 mm), T4: 90/10 (3-6 mm), T5: 80/20 (3-6 mm), T6: 70/30 (3-6 mm), T7: 90/10 (≤ 3 mm), T8: 80/20 (≤ 3 mm) and T9: 70/30 (≤ 3 mm); T10 was also included which consisted of 100 % pine sawdust. Two-color (black inside and white outside) bags of 15 L were used, 10 were filled with each substrate treatment and 2 with tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum* L.) Tequila F1 variety. The experimental units were distributed according to a completely randomized design, with a total of 10 treatments and 10 replications.

Installation and experimental development

The experiment was place in two beds, each one with two rows of bags and two plants per bag. Five crop cycles were established with an average duration of six months each. At the end of each cycle, stems were removed together with thicker roots; samples were taken for physical analysis of the substrate and then the system was prepared for the next cycle, a period that lasted a week. Fertigation consisted of eight daily irrigation using a drip system, placing a stake per plant. During the different crop cycles, the nutrient solution of Steiner (1984) was applied with an ionic charge of $20.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, increasing the concentration of P to 1.5 and K to $7.5 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, in order to achieve balance between cations and anions in the nutrient solution.

To control the daily irrigation a 15-25 % drain was used. Main care consisted of preventive control of whitefly (*Bemisia tabaci*) and diseases caused by *Phytophthora* sp, *Phytophthora* sp, y *Rhizoctonia* sp, and plant management tasks (removal of side shoots, tutoring, leafless, pollination) to conduct the crop to form six to seven clusters.

VARIABLES MEASURED

At the start of the experiment and after each crop cycle, physical properties in substrates were determined using the methodology of the porometer proposed by Fonteno and Bilderback (1993), Drzal *et al.* (1999) and Handreck and Black (2005), which consisted of saturating the substrate and then putting the containers to drain freely until the point at which the restraining forces of the substrate not allowed water loss. At this moment drain water was measured, the wet substrate was weighted, and dried at 105°C ; weight of the dry substrate was also determined. Physical properties: total porosity, particle volume, aeration capacity, moisture retention and bulk density were determined with the data obtained.

An analysis of variance with the obtained data was performed to determine the interaction among factors, also

drenada, se pesó el sustrato húmedo, se secó el sustrato (105 °C) y se obtuvo el peso del sustrato seco. Con la información obtenida se calcularon las propiedades físicas: porosidad total, volumen de partículas, capacidad de aireación, retención de humedad y densidad aparente.

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza para determinar la interacción entre factores, así como pruebas de medias por factor, de las diferentes variables, mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Para lo anterior se utilizó el programa estadístico SAS (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se observan diferencias altamente significativas para casi todas las variables y para todas las fechas de muestreo estudiadas con respecto a la relación aserrín/tezontle, y también para casi todas las fechas estudiadas se encuentran diferencias significativas en porosidad total, capacidad de retención de humedad y capacidad de aireación para el tamaño de partícula de tezontle empleado en la mezcla con aserrín; la densidad aparente fue la característica menos afectada por este factor, presentando diferencia estadística sólo al inicio y a los 18 y 30 meses de cultivo.

mean test per factor from the different variables were conducted using the Tukey test ($P \leq 0.05$), SAS statistical program (SAS Institute, 2002).

RESULTS AND DISCUSSION

In Table 1, highly significant differences for almost all variables and all sampling dates studied were observed regarding the sawdust/volcanic rock ratio; for almost all dates studied significant differences were observed in total porosity, moisture retention capacity and aeration capacity for the particle size of volcanic rock mixed with sawdust; bulk density was less affected by this factor, showing statistical difference only at the start and at 18 and 30 months of cultivation.

The interaction between the proportion of volcanic rock mixed with sawdust and the particle size of volcanic rock was also highly significant for total porosity (in all dates studied), moisture retention capacity and aeration capacity and at 0, 18, 24 and 30 months for the bulk density.

CUADRO 1. Niveles de significancia de las variables físicas medidas en los tratamientos formados por la combinación de diferente diámetro de partícula y relaciones aserrín/tezontle, durante 30 meses de cultivo con jitomate.

Fac-tor	Pt (%)						CRH (%)						CA (%)						Dap (g·cm ⁻³)					
	Meses de cultivo																							
	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30
R	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
P	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	ns	**
RxP	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	**	**
CV	.67	1.1	1.2	1.2	1.0	1.1	1.2	2.3	1.3	1.1	1.0	1.1	2.4	8.9	7.4	6.5	4.7	7.2	2.6	1.9	5.7	3.9	5.4	4.9

R: factor relación aserrín/tezontle, P: factor diámetro de partícula del tezontle, CV: coeficiente de variación, Pt: porosidad total, CRH: capacidad de retención de humedad, CA: capacidad de aireación, Dap: densidad aparente, **Efecto altamente significativo, ns: efecto no significativo.

TABLE 1. Levels of significance of the physical variables measured in treatments formed by the combination of different particle diameter and sawdust/volcanic rock ratio during 30 months of tomato crop.

Fac-tor	Pt (%)						CRH (%)						CA (%)						Dap (g·cm ⁻³)					
	Months of cultivation																							
	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30	0	6	12	18	24	30
R	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
P	**	**	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	ns	**
RxP	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	ns	**	**	**
CV	.67	1.1	1.2	1.2	1.0	1.1	1.2	2.3	1.3	1.1	1.0	1.1	2.4	8.9	7.4	6.5	4.7	7.2	2.6	1.9	5.7	3.9	5.4	4.9

R: factor sawdust/volcanic rock ratio, P: factor volcanic rock particle diameter, CV: coefficient of variation, Pt: Total porosity, CRH: moisture retention capacity, CA: aeration capacity, Dap: bulk density, ** highly significant effect, ns: no significant effect.

La interacción entre la proporción de tezontle en la mezcla con aserrín y el tamaño de partícula del tezontle usado también fue altamente significativa en todas las fechas estudiadas para la porosidad total, capacidad de retención de humedad y capacidad de aireación y a los 0, 18, 24 y 30 meses de cultivo para la densidad aparente.

Efecto del tamaño de partícula y de la relación aserrín/tezontle

En el Cuadro 1 se observa que para la mayoría de las variables físicas en todos los ciclos de cultivo (0, 1, 6, 12, 18, 24 y 30 meses), hubo efecto altamente significativo de la interacción entre los factores diámetro de partícula del aserrín y relación aserrín/tezontle.

Porosidad total

En la Figura 1 se presenta el comportamiento de la porosidad total del sustrato antes de establecer el cultivo y al final de cada ciclo de cultivo (6, 12, 18, 24, 30) durante 30 meses. La tendencia general que se observa es que la porosidad se redujo conforme disminuyó la proporción de aserrín y aumentó la proporción de tezontle en la mezcla aserrín/tezontle. Los valores más bajos son inferiores a 70 %, lo que, según algunos autores (Abad y Noguera, 2005; Blok *et al.*, 2008), los ubica fuera del intervalo adecuado, que debe estar entre 85-95 %, si se trata de un sustrato hidropónico. También se observa que la disminución en la porosidad del sustrato aserrín/tezontle fue menor cuando se usó tezontle con diámetro menor a 3 mm, lo que se atribuye a una mayor similitud entre tamaños de partículas del aserrín y del tezontle, ya que cuando se mezclan partículas con diámetros muy diferentes se da un mayor empaquetamiento entre ellas, disminuyendo la porosidad (Ansorena, 1994; Burés, 1997), lo que explica la menor porosidad en las mezclas aserrín/tezontle con mayor diferencia en diámetro (3-6 y 6-12 mm) de partículas. Adicionalmente, debido a la degradación biológica, las partículas del aserrín se fueron fraccionando al pasar los ciclos de cultivo (Lemaire, 1995), lo que influyó también en el comportamiento observado. La variación en la porosidad afectará la distribución del tamaño de macro y microporos, además de que se modificarán las fuerzas de adhesión a la superficie sólida del sustrato (potencial matricial) y con ello la capacidad de retención y disponibilidad de humedad, así como la capacidad de drenaje y aireación del sustrato (Lemaire, 1995).

Capacidad de retención de humedad

Con relación a la capacidad de retención de humedad, en la Figura 2 se observa una tendencia similar a la porosidad (Figura 1); es decir, la retención de humedad disminuyó conforme se redujo la proporción de aserrín y aumentó la proporción de tezontle en la mezcla aserrín/tezontle. De manera general, en los diferentes ciclos de cultivo (Figura 2a, b, c, d, e, f), también se presentaron mayores valores de retención de humedad en las mezclas

Particle size effect and sawdust/volcanic rock ratio

Table 1 shows that for most of the physical variables in all crop cycles (0, 1, 6, 12, 18, 24 and 30 months), there was highly significant effect on the interaction between the factors 'sawdust particle diameter' and 'sawdust/volcanic rock ratio'.

Total porosity

Figure 1 shows the behavior of the total porosity of the substrate prior to establishing the crop and after each crop cycles (6, 12, 18, 24, 30) during 30 months. The general trend observed was that porosity was reduced when the proportion of sawdust decreased and the proportion in sawdust/volcanic rock mixture increased. The lowest values are below 70 %, which, according to some authors (Abad y Noguera, 2005; Blok *et al.*, 2008), located them outside the proper range, which should be between 85 to 95 % if it is a hydroponic substrate. It is also observed that the decrease in the porosity of the substrate sawdust/volcanic rock was lower by using volcanic rock with diameter less than 3 mm, which is attributed to a higher similarity between particle size of sawdust and volcanic rock, because when particles with very different diameters are mixed a higher packing between them is produced, decreasing porosity (Ansorena, 1994, Bures, 1997), which explains the lower porosity in sawdust /volcanic rock mixture with larger difference in particle diameter (3 to 6 and 6 to 12 mm). Additionally, sawdust particles were splitting when passing crop cycles, due to biological degradation, (Lemaire, 1995), which also influenced the behavior observed. The variation in porosity affects the size distribution of macro and micropores, and will change the forces of adhesion to the solid surface of the substrate (matrix potential) and thereby the retention capacity and moisture availability, and the drainage capacity and the aeration of the substrate (Lemaire, 1995).

Moisture retention capacity

In relation to moisture retention capacity, Figure 2 shows a similar trend of porosity (Figure 1), in other words, moisture retention decreased when the proportion of sawdust decreased and the proportion in sawdust/volcanic rock mixture increased. In general, the different crop cycles (Figure 2a, b, c, d, e, f), also had higher values of moisture retention in sawdust/volcanic rock mixture with particle diameter less than 3 mm, situation that has been linked with a greater amount of micropores formed in mixtures of substrates with fine particles (Bunt, 1988; Handreck and Black, 2005).

According to Abad and Noguera (2005), Bunt (1988) and Handreck and Black (2005), substrates with more than 90 % porosity, should have moisture retention above 70 %, whereas substrates with porosity between 70 to 85 % (as in this case) should have minimum moisture retention between

aserrín/tezontle con diámetro de partícula menor a 3 mm, situación que se ha relacionado con una mayor cantidad de microporos formados en mezclas de sustratos con partículas finas (Bunt, 1988; Handreck y Black, 2005).

De acuerdo con Abad y Noguera (2005), Bunt (1988)

55 to 70 %, values can be seen in Figure 2. It is important to note that at the initial substrate stage (Figure 2a) moisture retention is low, but it increased with the crop cycles, this is explained by the formation of more micropores when biological degradation of sawdust occurred (Lemaire, 1995).

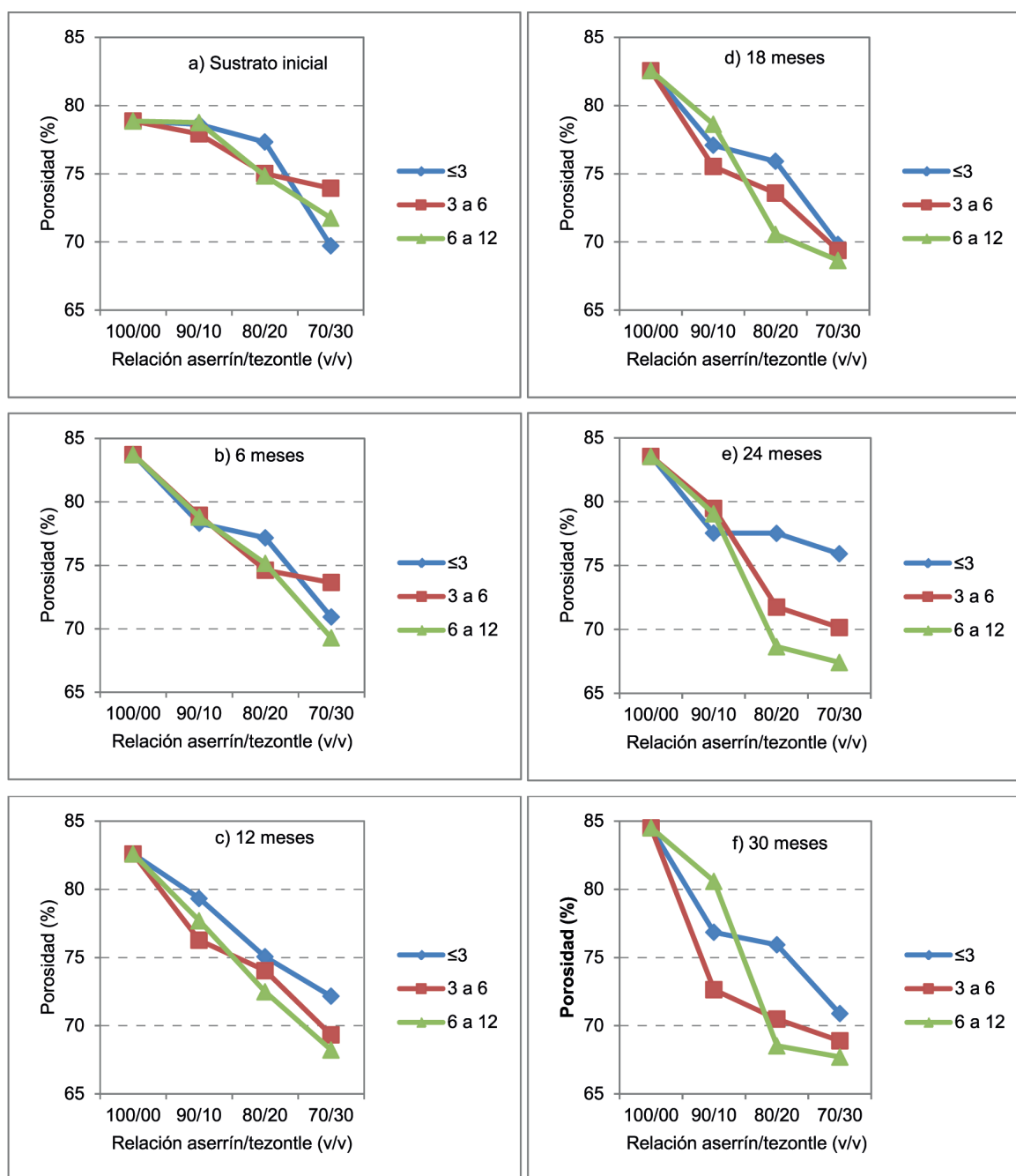


FIGURA 1. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la porosidad del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

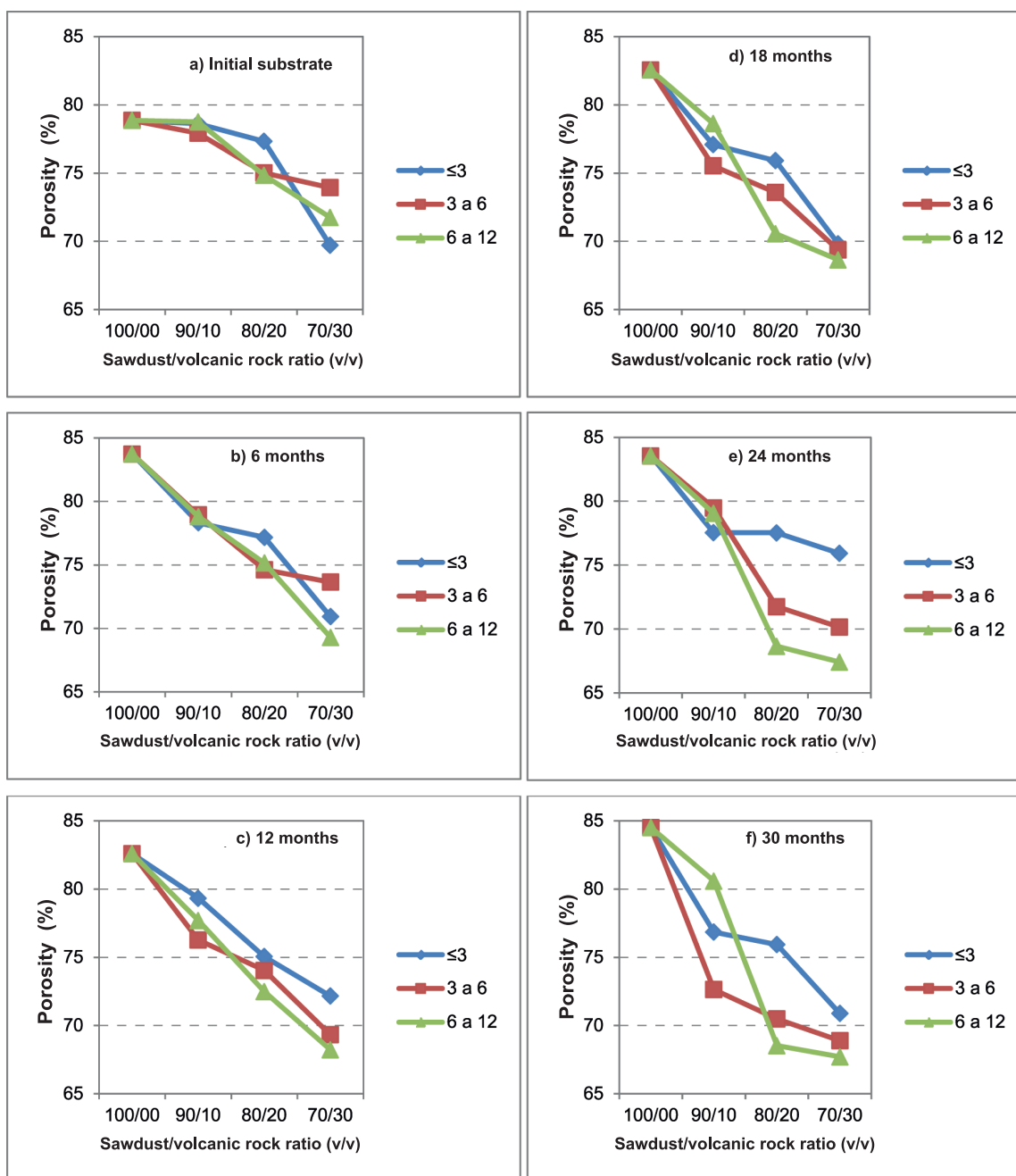


FIGURE 1. Particle size effect of volcanic rock and sawdust/volcanic rock ratio (v/v) on porosity of the substrate during 30 months of tomato crop.

y Handreck y Black (2005), en sustratos con más de 90 % de porosidad, la retención de humedad mínima debe estar por arriba de 70 %, mientras que en sustratos con porosidad entre 70-85 % (como en este caso) la retención de humedad mínima debe estar entre 55-70 %, valores que pueden observarse en la Figura 2. Es importante notar que en el sustrato inicial (Figura 2a) la retención de humedad era más baja, pero aumentó conforme se desarrollaron los ciclos de cultivo, situación que se explica por la formación de mayor cantidad de microporos al darse la degradación biológica del aserrín (Lemaire, 1995).

Aeration capacity

As for aeration capacity or air porosity, Figure 3 shows its behavior during 30 months of cultivation. It is observed that the reduction of sawdust and the increment of volcanic rock in mixture of sawdust/volcanic rock, similarly to the porosity and moisture retention, (Figure 1 and 2) also produce a decrease in aeration capacity, which was more evident in mixtures with volcanic particles smaller than 3 mm.

The initial substrate (Figure 3a) and after 6 months (Figure 3b) and 12 months (Figure 3c) of cultivation maintained the aeration capacity within the proper range, which

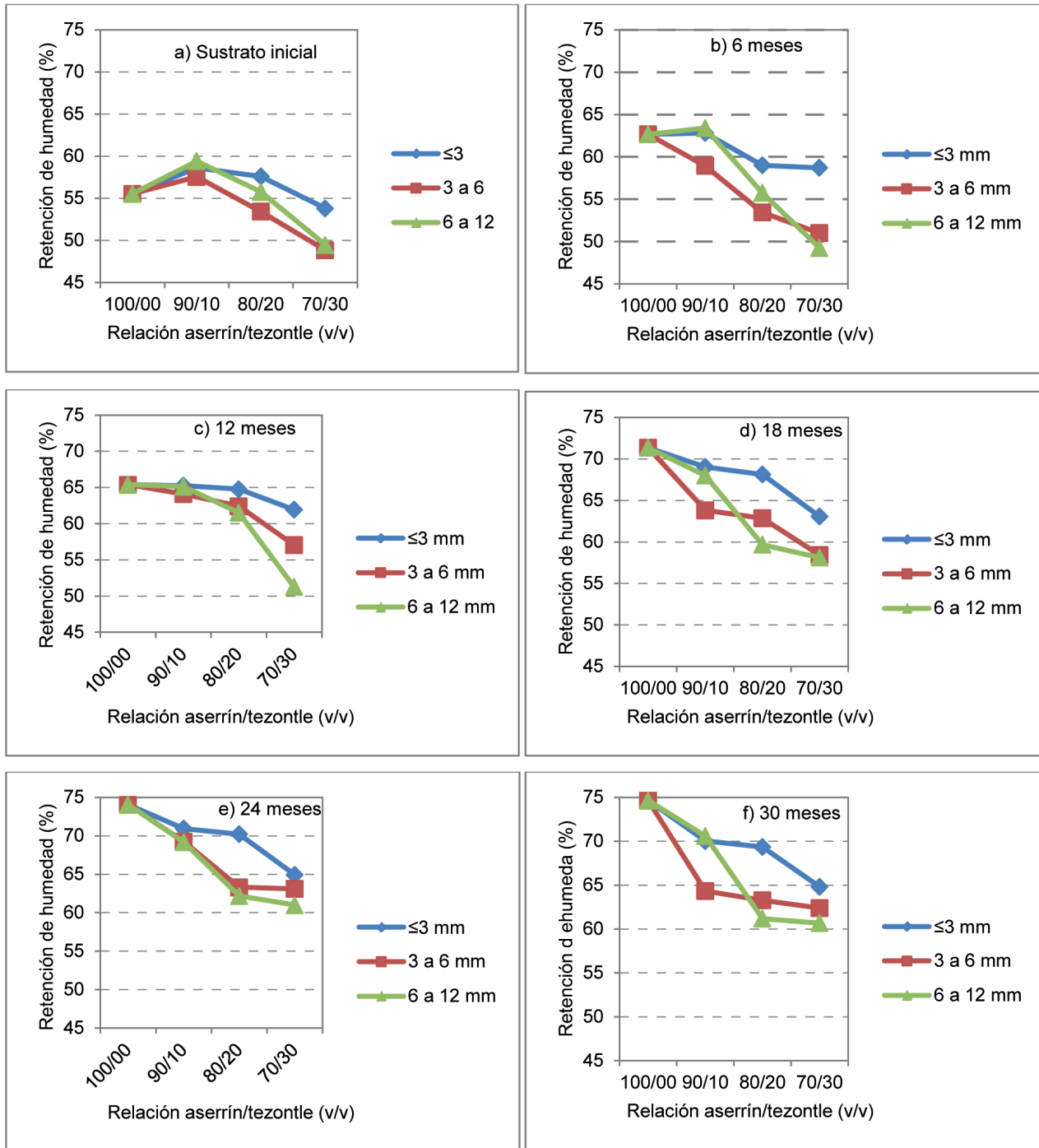


FIGURA 2. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de retención de humedad del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

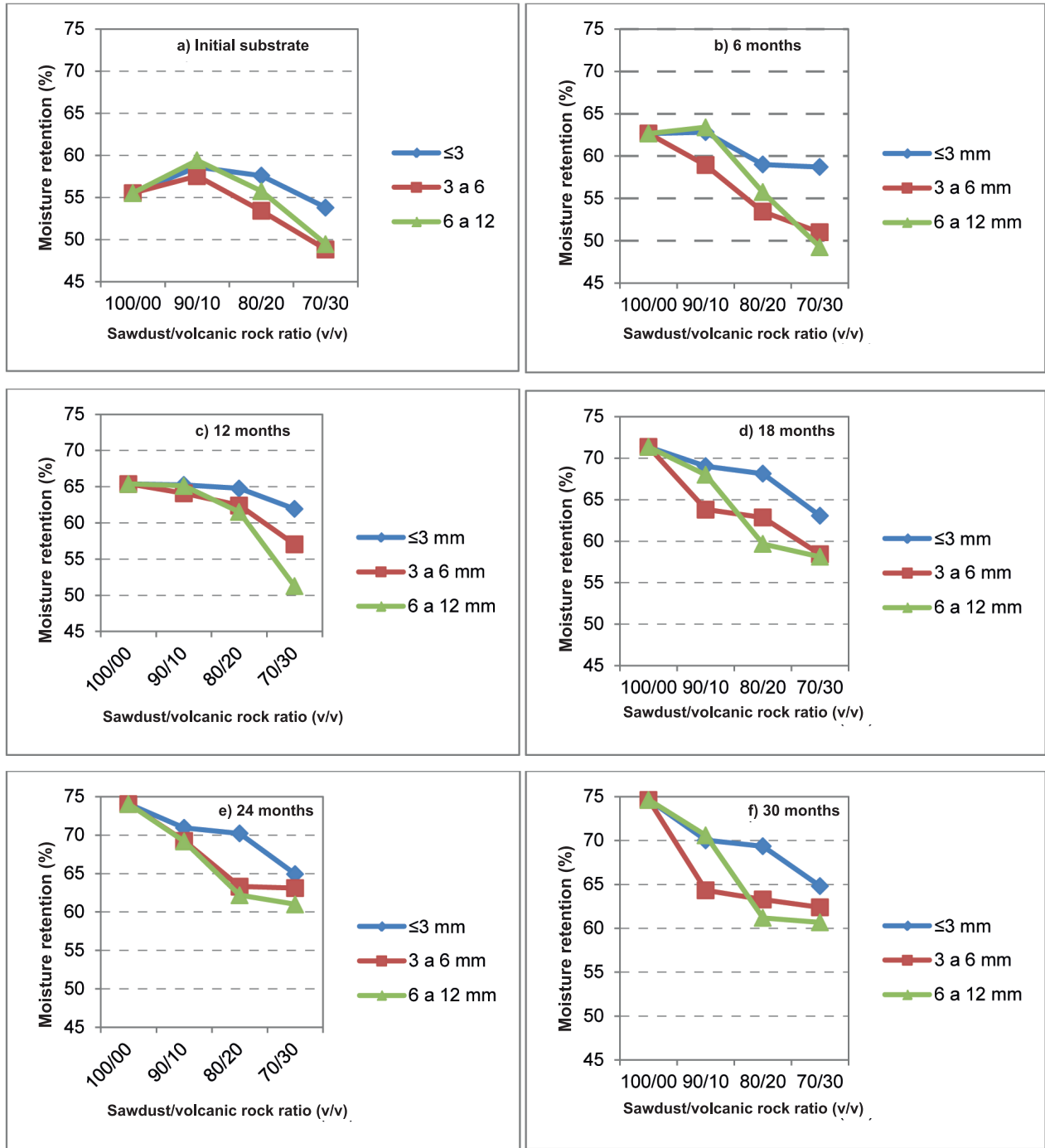


FIGURE 2. Particle size effect of volcanic rock and sawdust/volcanic ratio (v/v) on moisture retention capacity of the substrate during 30 months of tomato crop.

Capacidad de aireación

En cuanto a la capacidad de aireación o porosidad de aire, la Figura 3 muestra su comportamiento durante los 30 meses de cultivo. Se observa que la reducción de aserrín e incremento de tezontle en la mezcla aserrín/tezontle, de manera similar a la porosidad y retención de humedad (Figuras 1 y 2), también produjo una disminución en la capacidad de aireación, la cual fue más notoria en las mezclas con tezontle de partículas menores a 3 mm.

is considered between 15-30 % (Abad y Noguera, 2005; Burés, 1997; Raviv *et al.*, 2005), or above the minimum value, which is 10 % (Bunt, 1988; Lemaire, 1995). It is not recommended to have an aeration capacity lower than 10 %, especially in organic substrates that require two or three times more oxygen than inorganic substrates, to prevent oxygen deficiency in plants by competing with the microorganisms (Ansorena, 1994; Bunt, 1988). At 24 (Figure 3e)

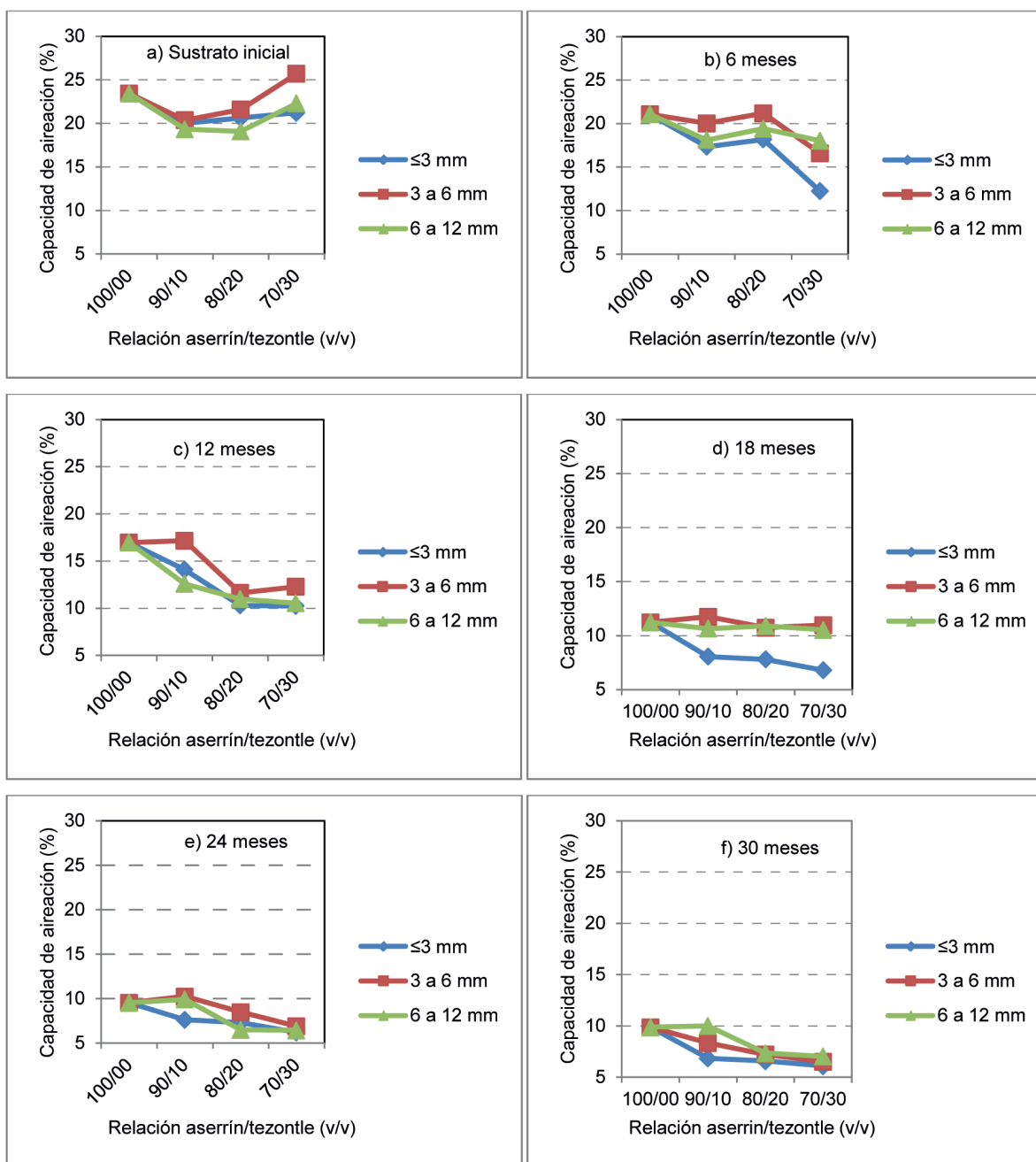


FIGURA 3. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la capacidad de aireación del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

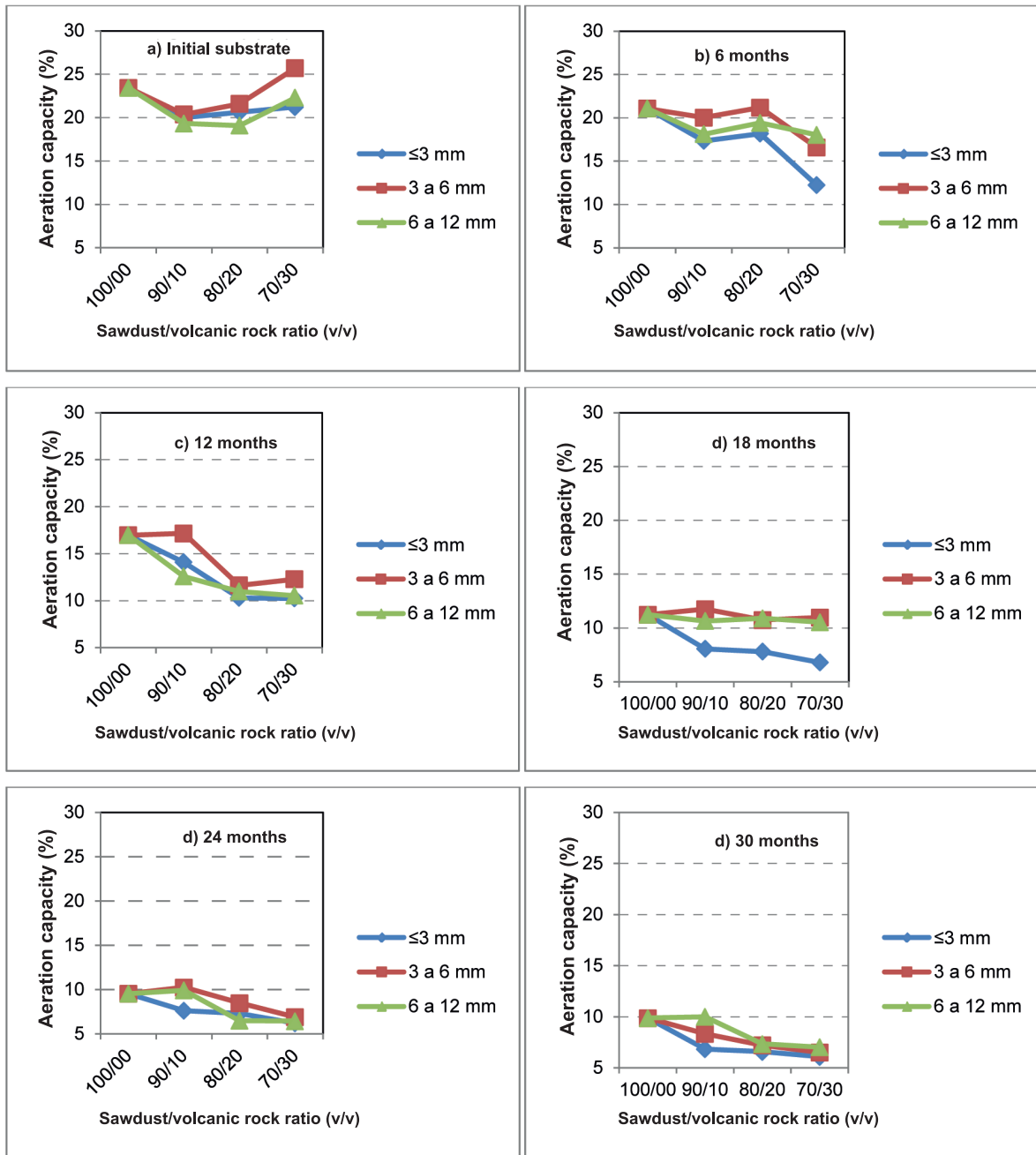


FIGURE 3. Particle size effect of volcanic rock and sawdust/volcanic ratio (v/v) on aeration capacity of the substrate during 30 months of tomato crop.

El sustrato inicial (Figura 3a) y los de después de seis (Figura 3b) y 12 (Figura 3c) meses de cultivo mantuvieron la capacidad de aireación dentro del intervalo adecuado, que se considera entre 15-30 % (Abad y Noguera, 2005; Burés, 1997; Raviv *et al.*, 2005), o bien por arriba del valor mínimo, que es 10 % (Bunt, 1988; Lemaire, 1995). No es recomendable una capacidad de aireación menor a 10 %, sobre todo en sustratos orgánicos que requieren de dos a tres veces más oxígeno que sustratos inorgánicos, para evitar deficiencia de oxígeno en las plantas por competencia con los microorganismos (Ansorena, 1994; Bunt, 1988). A los 24 (Figura 3e) y 30 (Figura 3f) meses todos los tratamientos estuvieron por debajo de la capacidad de aireación mínima exigida a un buen sustrato hidropónico. La disminución en la capacidad de aireación es un fenómeno normal en sustratos orgánicos después de estar sometidos a degradación biológica (Lemaire, 1995; Bunt, 1988).

Estos resultados concuerdan con Abad y Noguera (2005) y Burés (1997), quienes señalan que entre las características físicas más importantes de los sustratos está la porosidad total o espacio poroso total y su relación con la distribución de agua y aire dentro de esa porosidad.

Densidad aparente

Finalmente, aunque en el Cuadro 1 se indica significancia para la interacción entre diámetro de partícula y mezcla aserrín/tezontle para los ciclos de cultivo de 6 y 12 meses, la densidad aparente tuvo un incremento muy marcado en función de la relación aserrín/tezontle (Figura 4).

Con excepción de la mezcla 70/30, que presenta valores por arriba de $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, los demás tratamientos están por debajo de este valor, que es considerado como óptimo (Abad y Noguera, 2005; Blok *et al.*, 2008). Es importante notar que la densidad aparente presentó muy poca variación durante los 30 meses de cultivo, lo que significa que aun cuando la porosidad disminuyó y aumentó el volumen de partículas, la relación masa del sustrato/volumen total fue ligeramente afectada.

En resumen, se observó que solo la densidad aparente tuvo poca variación durante los 30 meses de cultivo, mientras que la porosidad total, volumen de partícula, retención de humedad y capacidad de aireación variaron significativamente. Considerando el balance entre estas características para definir el sustrato ideal, se observa que las características físicas iniciales del aserrín y mezclas aserrín/tezontle mejoraron al final de los 6, 12 y 18 meses de cultivo, pero a los 24 y 30 meses el balance quedó fuera de los intervalos normales, principalmente la capacidad de aireación, que se redujo a valores por debajo de los adecuados.

La capacidad de aireación es una característica muy importante, ya que tiene influencia en diversos procesos que afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas, para las que en condiciones de contenedor el efecto podría ser

and 30 (Figure 3f) months all treatments were below the minimum aeration capacity required to a good hydroponic substrate. The decrease in the aeration capacity is common phenomenon in organic substrates after being submitted to biological degradation (Lemaire, 1995; Bunt, 1988).

These results agree with Abad and Noguera (2005) and Burés (1997), who point out that among the most important physical properties of substrates, are found the total porosity or total pore space and its relationship with water and air distribution within porosity.

Bulk density

Finally, although Table 1 shows significance for the interaction between particle diameter and the sawdust/volcanic rock mixture for the cycle 6 and 12 months, bulk density had a very marked increase in function of the sawdust/volcanic rock ratio (Figure 4).

With the exception of the mixture 70/30, with values above $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, all other treatments are below this value, which is considered optimal (Abad y Noguera, 2005; Blok *et al.*, 2008). It is important to say that bulk density showed very little variation during the 30 months of cultivation, which means that even when porosity decreased and the volume of particles increased, the ratio substrate mass/total volume was slightly affected.

In short, it was observed that only bulk density had little variation during 30 months of cultivation, whereas total porosity, particle volume, moisture retention and aeration capacity varied significantly. Regarding the balance of those properties to define the ideal substrate, it appears that the initial physical properties of sawdust and sawdust/volcanic rock mixture improved at the end of the 6, 12 and 18 months of cultivation, but at 24 and 30 months, the balance was outside the normal range, mainly the aeration capacity, which was reduced to values below adequate.

Aeration capacity is a very important feature, because it has an influence on several processes that affect growth and development of plants, for those under container conditions the effect could be more important. Aeration capacity determines the gas exchange (CO_2 and O_2) between the interior and exterior of the substrate (Fonteno y Bilderback, 1993). Oxygen plays a critical role, because it determines the root orientation and root metabolic status. *Oxitropismo* permits the roots to avoid the substrate areas with low oxygen levels, and it could also be a physiological mechanism developed to reduce competition for water, nutrients and oxygen between roots (Morard *et al.*, 2000; Porterfield and Musgrave, 1998).

Plants growing in containers especially those that last confined for long periods, usually develop more roots at the bottom and in the space between the substrate and on the container walls. This is due to compaction, produced by oxygen deficiency and root death in the center of the container (Asady *et al.*, 1985). This phenomenon may be more noticeable when the growth medium contains organic matter that decomposes by means of oxygen consuming microorganisms.

más importante. La capacidad de aireación determina el intercambio gaseoso (CO_2 y O_2) entre el interior del sustrato y el exterior (Fonteno y Bilderback, 1993). El oxígeno en el medio de crecimiento desempeña un papel crítico, ya que determina la orientación radicular así como el estado metabólico de la raíz. El oxitropismo permite a las raíces evitar las zonas del sustrato con bajos niveles de oxígeno, y podría ser también un mecanismo fisiológico desarrollado para reducir la competencia entre las raíces por agua, nutrientes y oxígeno (Morard *et al.*, 2000; Porterfield and Musgrave, 1998).

The downward vertical growth is a natural response to gravitropism and hydrotropism, typical of all active roots. However, in the case of containers, this often results in a tangle of roots growing in the bottom of the tank, where they can be exposed to oxygen deficiency, due to the competition between roots for oxygen associated with the frequent accumulations of water at the bottom of the container. It has been shown that even with 10-minute interruption in the supply of oxygen, root growth can be stopped, and with a 30-minute interruption, death occurs in the elongation zone above the root tip (Huck *et al.*, 1999).

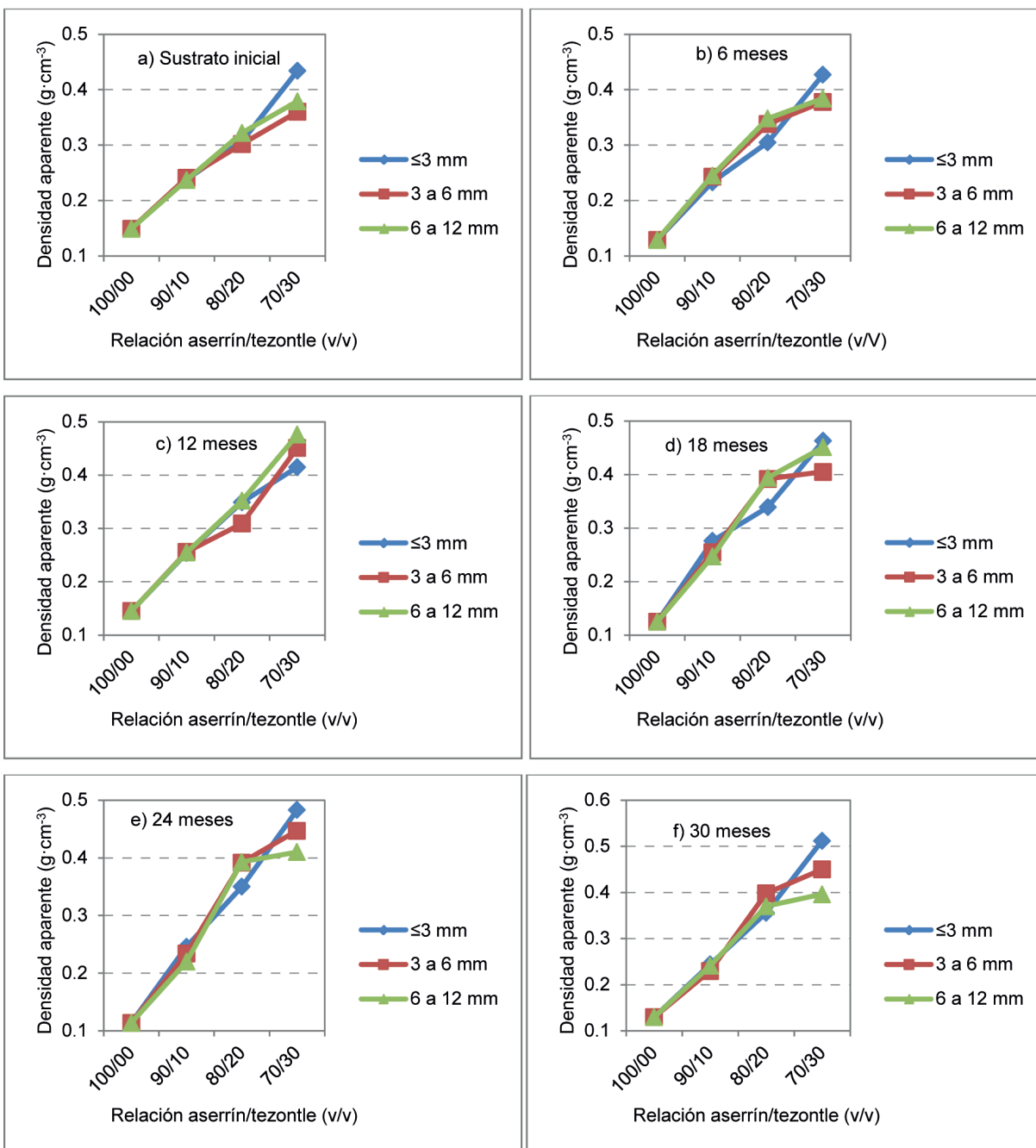


FIGURA 4. Efecto del tamaño de partícula del tezontle y de la relación aserrín/tezontle (v/v) sobre la densidad aparente del sustrato durante 30 meses de cultivo con jitomate.

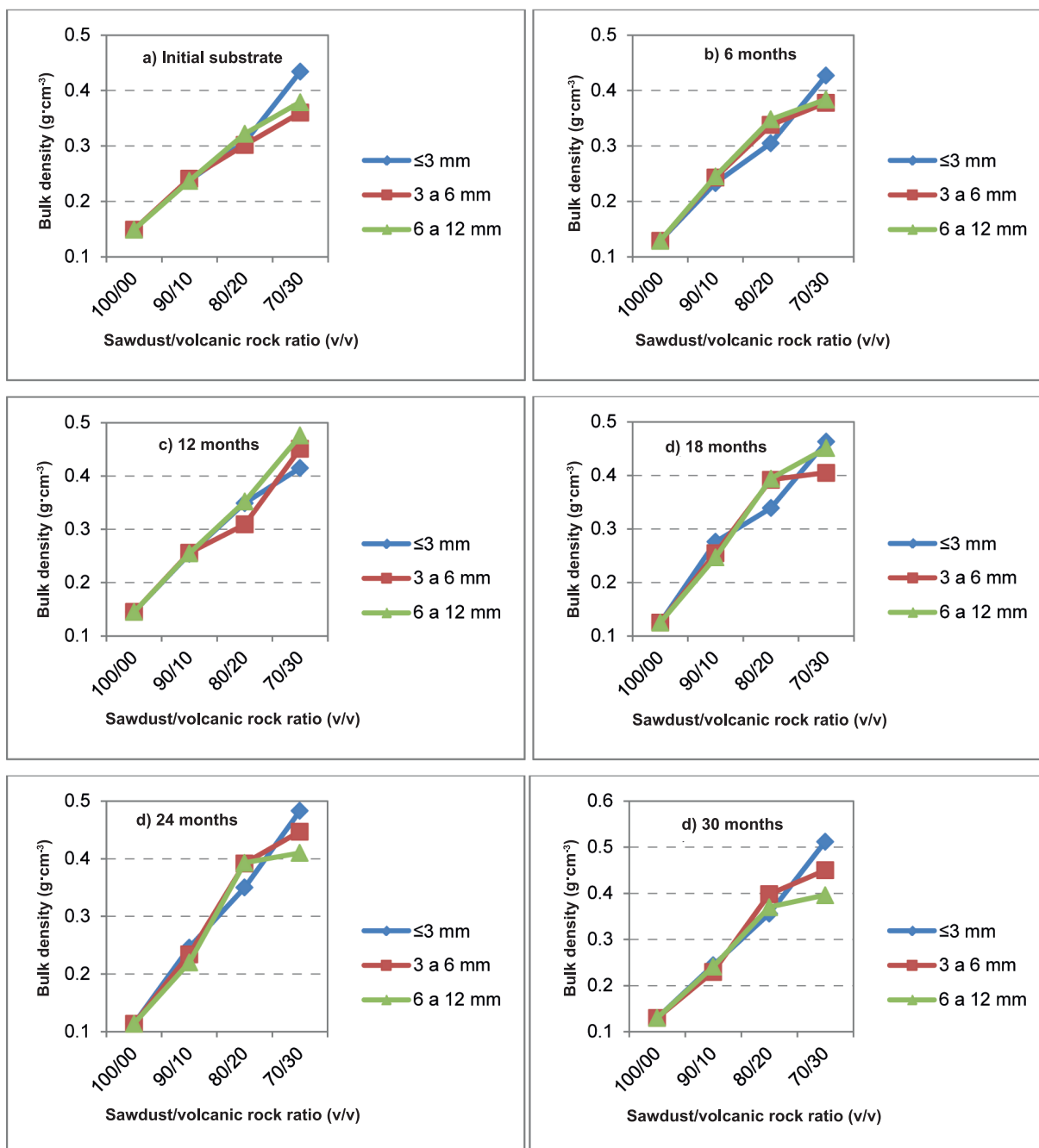


FIGURE 4. Particle size effect of volcanic rock and sawdust/volcanic ratio (v/v) on bulk density of the substrate during 30 months of tomato crop.

Las plantas que crecen en contenedores, especialmente las que duran confinadas por largos periodos, normalmente desarrollan mayor cantidad de raíces en el fondo y en el espacio entre el sustrato y las paredes del contenedor. Esto se debe a la compactación del medio de crecimiento, el cual produce deficiencia de oxígeno y muerte de las raíces en el centro del contenedor (Asady *et al.*, 1985). Este fenómeno puede ser más acentuado cuando el medio de crecimiento contiene materia orgánica que entra en descomposición por microorganismos consumidores de oxígeno.

In containers, substrates tend to compact due to lack of care in handling, physical impacts on the substrate surface when moving the containers, and due to the excessive supply of water. Once the substrate is compacted in the container, the process is irreversible and root growth is reduced (Kafkafi, 2008).

According to the results of this study, the use of sawdust mixed with volcanic rock in proportions 80/20 and 70/30 for a period of 24 months of continuous growth can be recommended, without risk of negative effects (variation in physical properties) on tomato's growth and development.

El crecimiento vertical hacia abajo es una respuesta natural al gravitropismo e hidrotropismo, típico de todas las raíces activas. Sin embargo, en contenedores esto resulta frecuentemente en una maraña de raíces desarrollándose en el fondo del depósito, donde pueden ser expuestas a deficiencia de oxígeno debido a la competencia entre raíces por el oxígeno asociado a las frecuentes acumulaciones de agua en el fondo del contenedor. Se ha demostrado que aun con 10 min de interrupción en el suministro de oxígeno, el crecimiento de las raíces puede detenerse, y con ausencia de oxígeno de 30 min se produce la muerte de la zona de elongación arriba de la punta de la raíz (Huck *et al.*, 1999).

En contenedores, los sustratos tienden a compactarse debido a la falta de cuidado en la manipulación, los impactos físicos en la superficie del sustrato cuando se mueven los contenedores y por la sobreirrigación. Una vez compactado el sustrato en el contenedor, el proceso es irreversible y el crecimiento de la raíz se reduce (Kafkafi, 2008).

De acuerdo con los resultados de este trabajo, se puede recomendar el uso del aserrín mezclado con tezontle en proporciones 80/20 y 70/30 por un periodo de 24 meses de cultivo continuo, sin riesgo de producir efectos negativos sobre el crecimiento y desarrollo del jitomate por variación en las características físicas.

CONCLUSIONES

Tanto en el aserrín como en las mezclas aserrín/tezontle, la densidad aparente presentó poca variación después de 30 meses de cultivo con jitomate.

La disminución de la proporción de aserrín y el aumento en la de tezontle disminuyeron la porosidad, la retención de humedad y la capacidad de aireación del sustrato durante 30 meses de cultivo continuo con jitomate.

El balance adecuado en las propiedades físicas porosidad total (>70 %), retención de humedad (50-70 %), capacidad de aireación (>10 %) y densidad aparente (<0.5 g·cm⁻³) del sustrato se mantuvo hasta los 18-24 meses de cultivo con jitomate.

La capacidad de aireación fue la característica física que presentó mayor variación, mostrando valores por debajo del adecuado (10 %) a los 24 y 30 meses de cultivo continuo con jitomate.

LITERATURA CITADA

- ABAD, B. M.; NOGUERA M. P. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En CADAHIA C. (Ed). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- ABAD, B. M.; NOGUERA P.; CARRIÓN B. C. 2004. Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. URRESTARAZU (Ed). Tratado de cultivo sin suelo. 2nd ed. Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113-158.
- ANSORENA, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.

CONCLUSIONS

Both in sawdust and in the mixture of sawdust/volcanic rock, bulk density showed little variation after 30 months of tomato crop.

The decrease in the proportion of sawdust and the increase in volcanic rock decreased porosity, moisture retention, aeration capacity of the substrate after 30 months of tomato crop.

The proper balance in total porosity (>70 %), moisture retention (50-70 %), aeration capacity (>10 %) and bulk density (<0.5 g·cm⁻³) of the substrate was maintained until 18-24 months of tomato crop.

Aeration capacity was the physical properties that showed greater variation, showing values below the right (10 %) at 24 and 30 months of continuous tomato crop.

End of English Version

- ASADY, G. H.; SMUCKER, A. J. M.; ADAMS M.W. 1985. Seedling test for the quantitative measurement of root tolerances to compacted soil. *Crop Sci.* 25: 802-806.
- BLOK, C.; DE KREIJ C.; BAAS, R.; WEVER, G. 2008. Chapter 7. Analytical Methods Used in Soilless Cultivation. In *Soilless Culture: Theory and Practice*. RAVIV, M.; LIETH J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United States of America. p.p. 245-290.
- BUNT, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hayman Ltd London, England. 309 p.
- BURÉS, S. 1997. Sustratos. Ed. Agrotecnias. Madrid, España. 341 p.
- DRZAL, M. S.; FONTENO, W. C.; CASSEL D. K. 1999. Pore fraction analysis: a new tool for substrate testing. *Acta Hort.* 481.
- FONTENO, W. C.; BILDERBACK T. E. 1993. Impact of hydrogel on physical properties of coarse-structured horticultural substrates. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118(2): 217-222.
- HANDRECK, K. A.; BLACK, N. 2005. Growing media for ornamental plant and turf. Revised edition. New South Wales University Press. Kensington, Australia. 544.
- HUCK, M. G.; KLEPPER, B.; TAYLOR, H. M. 1999. Cotton Root Growth & Time Lapse Photography of Root Growth (VHS), VHS, ASA, CSSA, and SSSA. Item number: B30463. Wisconsin USA.
- KAFKAFI, U. 2008. Functions of the root system. In: MICHAEL RAVIV J. R.; L. HEINRICH. (eds). *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier 84 Theobald's Road, London WC1X 8RR, UK. 587 p.
- KLÄRING, H. P.; SCHWARZ, D.; CIERPINSKI, W. 1999. Control of concentration of nutrient solution in soilless growing systems, depending on greenhouse climate. Advantages and limitations. *Acta Horticulturae* 507: 133-139.
- LEMAIRE, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae* 396: 273-284.
- MAHER, M.; PRASAD, M.; RAVIV, M. 2008. Organic Soilless Me-

- dia Components. In *Soiless Culture: Theory and Practice*. RAVIV, M.; LIETH J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United States of America 459-504 pp.
- MEDRANO, E.; LORENZO, P.; SÁNCHEZ, M. C. 2001. Evaluation of a greenhouse crop transpiration model with cucumber under high radiation conditions. *Acta Horticulturae*. 559: 465-470.
- MORARD, P.; LACOSTE, L.; J. SILVESTRE. 2000. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and nutrients by tomato plants in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 23(8): 1063-1078.
- PORTERFIELD, D. M.; MUSGRAVE, M. E. 1998. The tropic response of plant root to oxygen: oxitropism in *Pisum sativum* L. *Planta* 206: 1-6.
- RAVIV, M.; LIETH, J. H. 2008. *Soiless Culture: Theory and Practice*. Editorial Elsevier. United States of America. 625 p.
- RESH, H. 1998. *Cultivos Hidropónicos*. Editorial Mundi-Prensa. España. 369 p.
- ROCA, D.; MARTÍNEZ, P. F.; SUAY, R.; MARTÍNEZ, S. 2003. Nitrate and water uptake rates on a short term basis by a rose soilless crop under greenhouse. *Acta Horticulturae*. 614: 181-187.
- SÁNCHEZ DEL C. F.; ESCALANTE R. E. 1988. *Hidroponia. Un sistema de producción de plantas*. Universidad Autónoma Chapingo.
- SAS INSTITUTE INC, 2002. *Statistical Analysis System. User's guide Statistics. Version 9*. Cary NC. USA 595 p.
- SEMARNAT. 2007. *Anuario Forestal. Estadísticas de Recursos Naturales*. México.
- STEINER, A. 1984. *The Universal Nutrient Solution*. ISOC. Netherlands.
- SUAY, R. P. F.; ROCA D.; MARTÍNEZ, M.; HERRERO, J. M.; RAMOS, C. 2003. Measurement and estimation of transpiration of a soilless rose crop and application to irrigation management. *Acta Horticulturae* 614: 625-630.