

EFFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL TEZONTLE DE GUANAJUATO, MÉXICO*

EFFECT OF PARTICLE SIZE ON SOME PHYSICAL PROPERTIES OF TEZONTLE (VOLCANIC ROCK) FROM THE STATE OF GUANAJUATO

Patricia Vargas-Tapia¹, Javier Zaragoza Castellanos-Ramos^{2§}, José de Jesús Muñoz-Ramos², Prometeo Sánchez-García¹, Leonardo Tijerina-Chávez³, Rosa María López-Romero¹, Cinthia Martínez-Sánchez² y José Luis Ojodeagua-Arredondo²

¹Posgrado en Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México. ²Unidad de Horticultura Protegida. Campo Experimental Bajío, INIFAP. km 6.5 carretera Celaya-San Miguel de Allende. Celaya, Guanajuato, México. ³Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México. [§]Autor para correspondencia: castellanos@intagri.com.mx

RESUMEN

El tamaño de partícula del sustrato tiene un importante efecto sobre sus características físicas, principalmente sobre la proporción humedad-aire. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del tamaño de la partícula sobre las propiedades físicas del tezontle. En junio de 2005 se colectaron muestras de seis yacimientos de tezontle de Guanajuato, México. Se tamizaron en fracciones de <0.125, 0.125-0.25, 0.25-0.50, 0.50-0.71, 0.71-1.0, 1.0-2.0, 2.0-4.0, 4.0-6.5, 6.5-8.5 y 8.5-12.6 mm de diámetro. A cada fracción granulométrica se le determinó: densidad aparente, densidad real, espacio poroso total, porosidad ocluida, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad en el laboratorio de sustratos de la unidad de horticultura protegida del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el Campo Experimental Bajío, en Celaya, Guanajuato, México. Los valores de densidad aparente y densidad real aumentaron a medida que disminuyó el tamaño de partícula. La capacidad de aireación se redujo significativamente a medida que el diámetro de partícula disminuyó de 0.50 a 0.25 mm. La capacidad de retención de humedad aumentó a partir de la fracción 0.71-0.50 mm, con valor máximo entre 0.25-0.50 mm de diámetro y el espacio poroso total y porosidad ocluida se incrementaron a medida que aumentó el tamaño de partícula. Se observó una relación inversa significativa

($p < 0.01$) entre la capacidad de aireación y la capacidad de retención de agua.

Palabras clave: capacidad de aireación, capacidad de retención de humedad, densidad aparente, granulometría, sustrato.

ABSTRACT

The particle size in the substrate has an important effect on its physical characteristics, mainly on the proportion moisture:air. The objective of the present study was to determine the effect of particle size on the physical properties of 'tezontle' (volcanic rock). In June 2005, samples were collected from six mines of tezontle in Guanajuato, Mexico. Material of each source was separated in fractions of 0 to 0.125, 0.125-0.25, 0.25-0.50, 0.50-0.71, 0.71-1.0, 1.0-2.0, 2.0-4.0, 4.0-6.5, 6.5-8.5 and 8.5-12.6 mm in diameter. Bulk density, particle density, total porous space, occluded porosity, air capacity and moisture-retention capacity were determined to each fraction at the laboratory of substrates of the unit of protected horticulture of the National Research Institute for Agriculture, Forest and Livestock (INIFAP), located at Celaya, Guanajuato, Mexico. Bulk density and

* Recibido: Noviembre de 2007
Aceptado: Agosto de 2008

particle density increased as the particle diameter decreased. The air capacity decreased significantly as particle size diminished from fraction 0.50-0.25 mm; moisture-retention capacity increased from the fraction 0.50-0.71 mm to a maximum in 0.25-0.50 mm. Total porous space and occluded porosity increased as particle size increased. A highly significant ($p < 0.01$) inverse relationship was observed between moisture retention capacity and air capacity.

Key words: bulk density, granulometry, particle capacity, substrate, moisture-retention capacity.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de sustratos de buena calidad se debe a que son un factor clave en los sistemas de producción de horticultura protegida. Las características físicas del sustrato determinan el tipo y tamaño de contenedor a utilizar y el programa de riego del cultivo (Prasad y Ni Chualáin, 2004; Raviv *et al.*, 2004). La granulometría del sustrato determina el tamaño y distribución de los poros y la proporción agua-aire y en consecuencia el régimen de riego y el desarrollo de las plantas (Handreck, 1983; Burés *et al.*, 1997; Carmona *et al.*, 2003; Noguera *et al.*, 2003; Prasad y Ni Chualáin, 2004), es por ello, que el análisis granulométrico se ha considerado como una práctica importante en la caracterización de sustratos (Martínez, 1993; Burés *et al.*, 1997; Carmona *et al.*, 2003). En trabajos previos, Handreck (1983) estudió el efecto del tamaño de partícula sobre la capacidad de aireación y el agua total disponible en sustrato de corteza de pino y arena; concluyó, que el tamaño de partícula en el intervalo de 0.25 a 0.5 mm de diámetro modificó estas características. Recientemente, Noguera *et al.* (2003) reportaron el efecto del tamaño de partícula sobre las características físicas del polvo de coco; observaron que las partículas de 0.5 mm modificaron en forma significativa la relación agua-aire. Por su parte, Prasad y Ni Chualáin (2004) estudiaron sustratos preparados con turba y mezclas de turba, polvo de coco, corteza, composta de desecho de plantas y piedra pómez, con diferentes proporciones de partículas menores a 1 mm de diámetro, concluyeron que a medida que el porcentaje de partículas < 1 mm aumenta, la capacidad de aireación disminuye.

En México, la roca volcánica conocida como tezontle es ampliamente utilizado como sustrato para la producción de hortalizas y flores en cultivos sin suelo; sin embargo, no se ha determinado el efecto del tamaño de partícula sobre las propiedades físicas. El tezontle tiene una proporción variable

de porosidad ocluida, la cual se define como el volumen de poros cerrados que no tienen conexión con los poros externos y son los espacios que no pueden ser ocupados por agua y por lo tanto no interviene en la relación agua-aire del sustrato. El beneficio de este tipo de porosidad es que disminuye la densidad aparente del tezontle y facilita su manejo (Lemaire *et al.*, 2003). Al respecto, Burés *et al.* (1997) reportaron que en algunos casos se complica correlacionar el tamaño de partícula con algunas propiedades hídricas de los sustratos debido a la presencia de porosidad interna (porosidad ocluida) ya que ésta no permanece constante en los diferentes tamaños de partícula.

Teniendo en cuenta que la granulometría del sustrato determina las propiedades físicas del mismo, el objetivo del presente estudio fue determinar la influencia del tamaño de partícula sobre las características físicas que influyen en la relación agua-aire de seis muestras de tezontle colectadas en diferentes yacimientos en el estado de Guanajuato.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en junio de 2005 en el laboratorio de sustratos de la unidad de horticultura protegida del INIFAP, ubicado en el Campo Experimental Bajío, en Celaya, Guanajuato. Se evaluaron seis muestras de tezontle colectadas en diferentes yacimientos: en la zona norte, San Juan (tezontle rojo); en la zona centro, Vista Hermosa (tezontle rojo); en la zona sur Mina (tezontle negro); Emenguaro (tezontle rojo) y Tepame (tezontle negro), y en la zona suroeste Peñitas (tezontle rojo) (Figura 1).

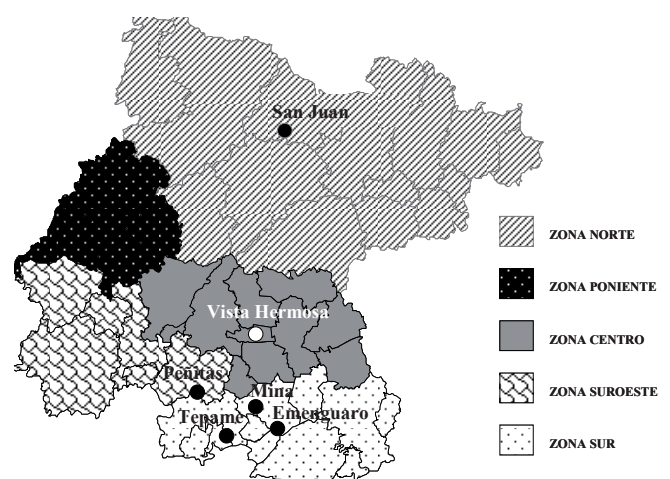


Figura 1. Ubicación de los yacimientos de tezontle muestreados en el estado de Guanajuato, 2005.

Las muestras se colectaron después de cribadas en malla de 2 cm ($\frac{3}{4}$ pulgada). En cada sitio se tomaron diez submuestras en forma aleatoria de la pila comercial de producción, las cuales fueron mezcladas y el volumen final fue reducido a 30 L por el método de cuarteo.

El contenido de humedad en las muestras fue muy variable, debido a que el material estaba a la intemperie, por lo que todas las muestras fueron secadas a 35 °C durante 5 días en una estufa con circulación de aire forzado. Una vez secas, se tamizaron de acuerdo con la metodología descrita por Martínez (1993). Para la separación granulométrica se emplearon tamices de 0.125, 0.25, 0.50, 0.71, 1.0, 2.0, 4.0, 6.5, 8.5 y 12.6 mm y un tamizador Tyler (Rotap).

A cada una de las fracciones obtenidas se determinó: 1) densidad aparente (D_a) mediante el método descrito en la Norma Europea UNE-EN 13040:1999, 2) densidad real (D_r) por el método del picnómetro de agua (Blake y Hartge, 1986) en muestras inalteradas y pulverizadas y, 3) espacio poroso total (EPT) en muestras pulverizadas y porosidad efectiva (P_e) en muestras inalterada por la Norma Europea UNE EN 13041:1999. La porosidad ocluida (P_o) se determinó de la diferencia entre el EPT y la P_e ; 4) capacidad de aireación (CA) y capacidad de retención de humedad (CRH), por el método descrito por Ansorena (1994).

Debido a que la mas alta variación de la capacidad de aireación y la retención de humedad se ha observado en el rango de 0.5 a 1 mm de diámetro de partícula, se incluyó un valor intermedio 0.71 mm con la finalidad de reducir el rango y determinar el efecto con precisión. Las partículas mayores de 12.6 mm no se analizaron debido a que las muestras presentaron un porcentaje menor de 2% en peso.

Todas las determinaciones se realizaron con cuatro repeticiones y los resultados fueron sujetos a un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias se realizó por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) mediante el paquete estadístico SAS v 8.2. (SAS, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad aparente

Se observó diferencia significativa entre tamaños de partícula y entre muestras para un mismo tamaño para densidad aparente (D_a). De manera general, las muestras de

Mina, Emenguero y San Juan, fueron las de menor valor medio (0.67, 0.62 y 0.73 g cm⁻³, respectivamente) (Cuadro 1). Estos tezontles son más ligeros y porosos lo que facilita su manejo (llenado y acarreo de macetas), cualidad destacada por Baca *et al.* (1990) en tezontle rojo y negro. Por otra parte, al disminuir el tamaño de partícula la D_a se incrementó en forma similar a lo observado por Noguera *et al.* (2003) en polvo de coco y por Wallach *et al.* (1992) en tezontle rojo en Israel. Las fracciones mayores de 4 mm, no fueron diferentes entre ellas en la mayoría de las muestras. Los valores de D_a observados fueron similares a los reportados por Raviv *et al.* (2002) con valores de 0.8 a 1.5 g cm⁻³ para tezontles (muestra compuesta) de Israel. Destaca la variación que puede existir entre orígenes del material, en cuanto a esta variable, pues los yacimientos de V. Hermosa y Peñitas presentaron, en todas fracciones granulométricas la mayor densidad aparente.

Densidad real

Se observó diferencia significativa entre las fracciones granulométricas en cada muestra, así como entre muestras (Cuadro 2). En forma general, a medida que se incrementó el tamaño de partícula, se redujo la densidad real (D_r). Los tezontles de los yacimientos de Mina, Emenguero y Tepame presentaron el menor valor medio de D_r con valores de 2.20, 2.23 y 2.39 g cm⁻³, respectivamente, caso contrario a V. Hermosa con valores de 2.81 seguido de Peñitas, con 2.58 g cm⁻³. No se observó diferencia estadística entre las fracciones menores a 0.25 mm para esta característica en la mayoría de las muestras a excepción de V. Hermosa y San Juan, al igual que para las fracciones de más de 6.50 mm no se observó diferencia estadística en la mayoría de las muestras.

Capacidad de aireación

Los valores de la capacidad de aireación (CA) de las seis muestras de tezontle, presentaron diferencia estadística entre las diferentes fracciones granulométricas para cada muestra. A medida que disminuyó el tamaño de partícula la CA se redujo en todas las muestras, (Cuadro 3). Es importante señalar que para fracciones mayores de 4.00 mm, no se observó diferencia estadística significativa al igual que para las fracciones menores de 0.50 mm.

Se observó una disminución significativa de la CA a partir de la fracción de 0.71-1.00 mm. En la fracción de 0.25-0.50 mm, disminuyó casi 50% respecto a las fracciones de 0.50-0.71 y 0.25-0.50 mm, por lo que es importante destacar que la

Cuadro 1. Efecto del diámetro de partícula sobre la densidad aparente en seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato, 2005.

Diámetro de partícula (mm)	Yacimiento						
	Mina	Emenguaro	V. Hermosa	San Juan	Tepame	Peñitas	Media
	Densidad aparente (g cm ⁻³)						
< 0.125	1.06a	1.06a	1.31a	1.03a	1.17a	1.30a	1.16
0.125-0.25	0.97b	0.89b	1.24b	0.91b	1.03b	1.05b	1.02
0.25-0.50	0.89c	0.77c	1.10c	0.83c	0.93c	0.94c	0.91
0.50-0.71	0.74d	0.65d	0.96d	0.77d	0.88d	0.83d	0.80
0.71-1.00	0.65e	0.58e	0.87ef	0.77d	0.77e	0.78e	0.75
1.00-2.00	0.56f	0.52f	0.84f	0.67e	0.69f	0.77e	0.67
2.00-4.00	0.51g	0.46g	0.84f	0.67e	0.60g	0.80ed	0.64
4.00-6.50	0.47h	0.41h	0.85f	0.62f	0.59g	0.81ed	0.63
6.50-8.50	0.46h	0.42h	0.89e	0.61f	0.59g	0.80ed	0.63
8.50-12.60	0.44h	0.43h	0.89e	0.48g	0.57g	0.81ed	0.61
Media	0.67	0.62	0.98	0.73	0.78	0.89	--
DMS 0.05	0.02	0.01	0.03	0.04	0.02	0.05	--

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 2. Efecto del diámetro de partícula sobre la densidad real en seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato, 2005.

Diámetro de partícula (mm)	Yacimiento						
	Mina	Emenguaro	V. Hermosa	San Juan	Tepame	Peñitas	Media
	Densidad real (g cm ⁻³)						
< 0.125	2.65a	2.68a	2.82cd	2.74b	2.66a	2.72a	2.71
0.125-0.25	2.64a	2.64a	2.87a	2.79a	2.66a	2.72a	2.72
0.25-0.50	2.59b	2.56b	2.86ab	2.73b	2.65a	2.72a	2.68
0.50-0.71	2.43c	2.35d	2.84abc	2.66c	2.63a	2.67b	2.60
0.71-1.00	2.32d	2.43c	2.83bc	2.58d	2.55b	2.67b	2.56
1.00-2.00	2.16e	2.18e	2.79de	2.51e	2.42c	2.56c	2.44
2.00-4.00	1.90f	1.96f	2.78ef	2.29f	2.15d	2.50d	2.26
4.00-6.50	1.81g	1.87g	2.77ef	2.27f	2.14d	2.46e	2.22
6.50-8.50	1.77h	1.83hg	2.75f	2.22fg	2.08e	2.45e	2.18
8.50-12.60	1.74h	1.81h	2.77ef	2.25g	2.04f	2.42e	2.17
Media	2.20	2.23	2.81	2.50	2.39	2.58	--
DMS 0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	--

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

fracción de 0.25-0.50 mm determina la disminución (efecto negativo) más importante sobre la CA. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Handreck (1983) quien reportó el mayor descenso de la CA en corteza de pino y arena, cuando el diámetro de la partícula se redujo a 0.25-

0.50 mm. Al respecto, Noguera *et al.* (2003) reportaron valores de CA de 70 a 84% para fracciones mayores de 0.5 mm de polvo de coco, mientras que en fracciones menores de 0.5 mm estos valores fueron de 8 a 27%, lo que demuestra el efecto de esas fracciones sobre la CA (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efecto del diámetro de partícula sobre la capacidad de aireación en seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato, 2005.

Diámetro de partícula (mm)	Yacimiento						Media
	Mina	Emenguaro	V. Hermosa	San Juan	Tepame	Peñitas	
	Capacidad de aireación (% volumen)						
< 0.125	9.0e	9.2f	9.5g	11.9f	7.7g	12.0f	9.9
0.125-0.25	10.5e	9.8f	9.4g	17.5e	8.5g	12.2f	11.3
0.25-0.50	9.7be	9.2f	8.7g	11.2f	10.5f	13.6f	10.5
0.50-0.71	18.2d	22.1e	16.0f	27.8d	20.7e	21.1e	23.3
0.71-1.00	34.9c	36.3d	28.4e	26.4d	30.0d	34.9d	29.5
1.00-2.00	46.0b	47.9c	41.5d	42.6c	45.4c	44.0c	44.6
2.00-4.00	57.9a	59.1b	48.1c	54.3b	56.3b	54.1b	55.0
4.00-6.50	58.9a	64.3a	52.4ab	56.3ab	58.2a	56.2ab	57.7
6.50-8.50	56.1a	65.2a	51.1b	56.0ab	59.2a	58.2a	57.6
8.50-12.60	55.9a	64.1a	54.3a	58.3a	58.2a	58.3a	58.2
Media	35.7	38.7	31.9	36.2	35.5	36.5	--
DMS 0.05	3.1	2.4	2.4	3.0	1.7	2.8	--

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

La determinación de la CA en cada fracción es una variable muy importante para los sustratos, Raviv *et al.* (2004) destacaron esta característica, debido a la importancia de suministrar oxígeno y agua a la raíz, subrayando que un adecuado suministro de ambos en la zona de la raíz propicia efectos inmediatos sobre la forma y crecimiento de la misma, así como también incrementa la actividad metabólica y absorción de agua y nutrimentos. A excepción del yacimiento V. Hermosa, los demás mostraron efecto similar del diámetro de partícula sobre la CA.

Capacidad de retención de humedad

Las fracciones mayores de 4 mm no mostraron diferencia estadística para este parámetro en la mayoría de las muestras, en estas fracciones se obtuvieron los valores más bajos de capacidad de retención de humedad (CRH). A partir de la fracción de 0.50-0.71 mm y menores, se observó un incremento significativo de la CRH, con valor máximo en la fracción de 0.25-0.50 mm (56.9%) (Cuadro 4), lo cual concuerda con lo reportado por Handreck (1983) en corteza de pino y arena, donde observó que la máxima cantidad de agua disponible en la fracción de 0.25-0.50 mm y que en partículas de menor diámetro está disminuyendo. Noguera *et al.* (2003) reportaron los más altos valores de CRH en las fracciones menores a 0.50 mm en polvo de coco.

Las fracciones de 0.25 a 1.00 mm tuvieron un efecto determinante sobre la relación humedad:aire (CRH-CA) en los tezontles estudiados y las partículas de 0.50 mm se pueden considerar el punto de control en esta relación, lo que coincide con lo reportado por Noguera *et al.* (2003) en polvo de coco y Handreck (1983) en corteza de pino y arena, quienes reportaron que el tamaño de partícula equivalente a 0.50 mm determina un cambio importante y altamente significativo sobre la relación humedad:aire. Esto pone de manifiesto que las fracciones de 0.7 a 1.0, 0.50-0.71 y 0.25-0.50 mm son importantes para la formulación de sustratos. Todos los yacimientos mostraron un efecto similar del tamaño de partícula sobre la CRA. Es decir, el tamaño de partícula determina la CRH del sustrato y no el origen del mismo.

Espacio poroso total

Para el espacio poroso total (EPT) los resultados mostraron diferencias significativas entre las fracciones de cada muestra. En forma general, el EPT se incrementó a medida que aumentó el tamaño de partícula (Cuadro 5), lo cual coincide con lo reportado por Handreck (1983) en corteza de pino y arena y Raviv *et al.* (2002) en tezontle; con valores de 60 a 80% en función del origen y del proceso de tamizado o molienda. Esta variable no es relevante sobre la relación

Cuadro 4. Efecto del diámetro de partícula sobre la capacidad de retención de humedad en seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato, 2005.

Diámetro de partícula (mm)	Yacimiento						Media
	Mina	Emenguaro	V. Hermosa	San Juan	Tepame	Peñitas	
	Capacidad de retención de agua (% volumen)						
< 0.125	52.7b	53.7b	46.5c	53.5b	50.0b	45.1d	50.2
0.125-0.25	55.7a	60.6a	49.8b	57.8a	53.8a	52.5b	55.0
0.25-0.50	55.8a	62.2a	52.4a	58.1a	55.6a	57.2a	56.9
0.50-0.71	51.7b	52.8b	52.8a	46.7c	48.4b	49.3c	47.8
0.71-1.00	38.8c	38.0c	40.8d	43.6c	35.1c	37.9e	41.5
1.00-2.00	28.6d	26.5d	29.4e	26.6d	24.2d	27.4f	27.1
2.00-4.00	19.5e	18.4e	20.4f	18.1e	16.1e	17.5g	18.3
4.00-6.50	15.5f	14.1f	16.1g	13.9f	15.5e	13.4h	14.7
6.50-8.50	14.6fg	13.1f	15.0g	13.0f	12.8f	12.7hi	13.5
8.50-12.60	13.5g	12.6f	14.3g	11.4f	15.3e	10.7i	12.9
Media	34.6	35.2	33.7	34.3	32.6	32.4	--
DMS	1.7	2.1	1.9	3.2	2.2	2.4	--

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 5. Efecto del diámetro de partícula sobre el espacio poroso total en seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato, 2005

Diámetro de partícula (mm)	Muestras						Media
	Mina	Emenguaro	V. Hermosa	San Juan	Tepame	Peñitas	
	Espacio poroso total (% volumen)						
< 0.125	60.1i	60.6h	53.4f	62.2g	55.8g	52.2e	57.4
0.125-0.25	63.4h	66.9g	55.8e	66.6f	61.0f	61.5d	62.5
0.25-0.50	66.4g	71.6f	60.8d	69.6e	65.0c	65.6c	66.5
0.50-0.71	72.1f	75.7e	65.9c	71.8d	66.8d	69.2b	70.7
0.71-1.00	75.6e	78.3d	69.0ab	71.7d	71.0c	71.5a	72.4
1.00-2.00	78.8d	80.8c	70.1a	75.5c	74.1b	71.7a	75.2
2.00-4.00	80.8c	83.0b	70.1a	75.6c	77.6a	70.7ab	76.3
4.00-6.50	82.4b	84.6a	69.8a	77.5b	77.6a	70.1ab	77.0
6.50-8.50	82.5ab	84.4a	68.3b	77.7b	77.7a	70.6ab	76.9
8.50-12.60	83.3a	84.2a	68.2b	82.3a	78.4a	70.1ab	77.1
Media	74.5	77.0	65.2	73.0	70.5	67.3	--
DMS 0.05	0.8	0.5	1.2	1.5	0.9	2.0	--

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

humedad: aire, como las anteriores, ya que un alto EPT, se obtiene tanto con poros grandes como con poros pequeños que tienen efecto variado sobre la capacidad de aireación del sustrato.

Porosidad ocluida

La porosidad ocluida (P_o) se incrementó con el aumento del tamaño de partícula. Cabe destacar que las muestras Mina y Emenguaro fueron las que presentaron el mayor

valor medio de 4.5 y 4.1%, respectivamente; por lo tanto, estos dos materiales son altamente porosos, mientras que las muestras Tepame, San Juan y Peñitas tuvieron valores intermedios (2.8, 2.3 y 1.6%, respectivamente) y V. Hermosa los menores en todas sus fracciones, por lo que este material es poco poroso, sobre lo que Baca *et al.* (1990) indicaron que es preferible el tezontle más poroso porque facilita el manejo y favorece al cultivo (Cuadro 6).

Relaciones entre variables

Es notable la estrecha relación del orden cuadrático observada entre el diámetro de partícula y la CA con R² de 0.96 para los diámetros medios de 0.37 a 3.00 mm. La CA de 20% se presentó con el diámetro medio de 0.6 mm, la de 30% con 0.9 mm y la de 40% con 1.2 mm (Figura 2). Esto confirma que el diámetro de partícula influye más sobre la CA que la fuente del material.

Se observó estrecha relación de orden cuadrática entra el diámetro de partícula y CRH con una R² de 0.97 para los diámetros medios de 0.37 mm a 3.0 mm. El valor de CRH de 30% se obtuvo con el diámetro medio de partícula de 1.3 mm, CRA de 40% se consigue con 0.8 mm, mientras que CRH de 50% con 0.6 mm (Figura 3). La mayor influencia sobre la CRH la ejerció el diámetro de partícula, más que la fuente o yacimiento del sustrato.

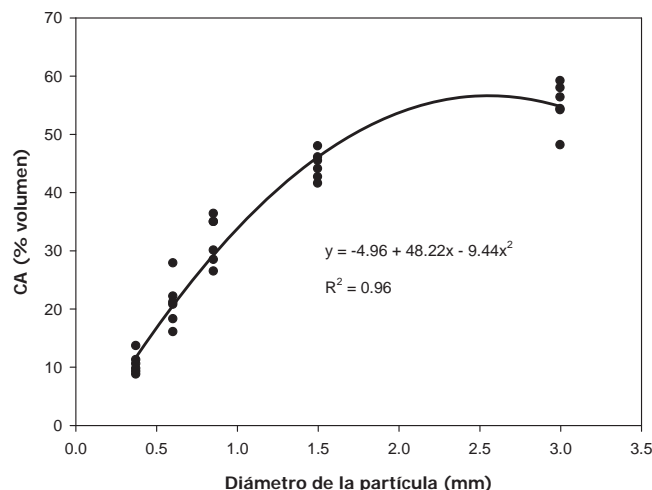


Figura 2. Relación entre el diámetro medio de la partícula y la capacidad de aireación de seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato.

La relación entre CRH y CA fue lineal con R² de 0.96. Se observó que una CRH de 50% está asociada con una CA de 19%, una CRH de 40% está asociada a una CA de 30% (Figura 4). Se considera que esta sería la relación ideal para el sustrato de tezontle; es decir, es recomendable que la de fracción granulométrica presente una CRH del orden de 40%, para contar una buena reserva de agua y al mismo tiempo adecuada aireación en el sustrato.

Cuadro 6. Efecto del diámetro de partícula sobre la porosidad ocluida en seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato, 2005.

Diámetro de partícula (mm)	Yacimiento					
	Mina	Emenguaro	V. Hermosa	San Juan	Tepame	Peñitas
	porosidad ocluida (% volumen)					
< 0.125	0.1h	0.3g	0.0d	0.0g	0.0e	0.1f
0.125-0.25	0.2h	0.7g	0.0d	0.0g	0.0e	0.1f
0.25-0.50	0.8g	1.5f	0.0d	0.0g	0.1e	0.1ef
0.50-0.71	2.5f	2.6e	0.0d	0.8f	0.3e	0.6ef
0.71-1.00	3.5e	3.2e	0.0d	1.7e	1.2d	0.5e
1.00-2.00	4.8d	4.5d	0.2cd	2.2d	2.5c	1.8d
2.00-4.00	7.5c	6.4c	0.3bc	4.8ab	5.2b	2.6c
4.00-6.50	8.2b	6.8bc	0.4abc	4.6b	5.3b	3.2b
6.50-8.50	8.8a	7.4ab	0.7a	5.2a	6.2a	3.2ab
8.50-12.60	8.8a	7.8a	0.5ab	3.8c	6.5a	3.7a
Media	4.5	4.1	0.2	2.3	2.8	1.6
DMS 0.05	0.5	0.6	0.3	0.5	0.4	0.5

Medias con distinta letra en la columna son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

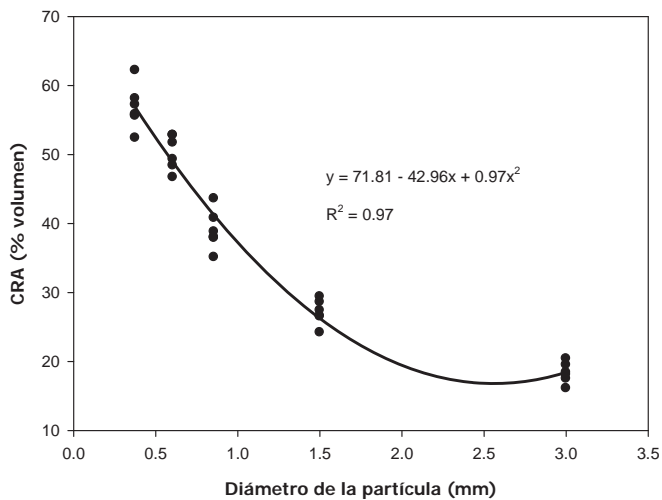


Figura 3. Relación entre el diámetro medio de la partícula y la capacidad de retención de humedad de seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato.

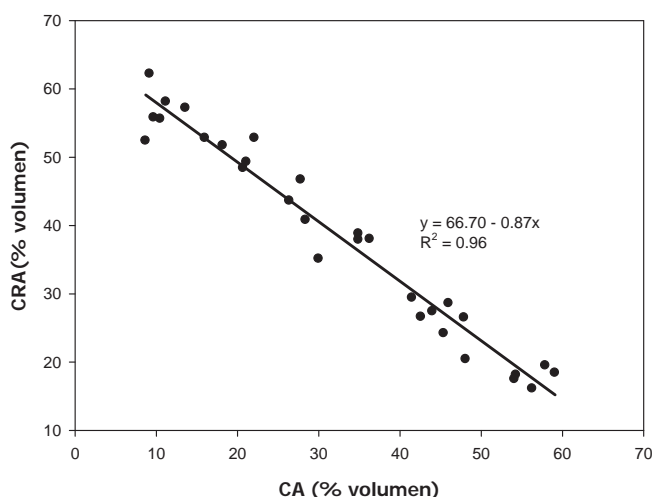


Figura 4. Relación entre la capacidad de aireación y la capacidad de retención de humedad de las fracciones granulométricas de seis muestras de tezontle del estado de Guanajuato.

CONCLUSIONES

Las fracciones granulométricas del tezontle del estado de Guanajuato influyen en forma significativa sobre las características de densidad aparente, densidad real, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad. Los valores de densidad aparente y real aumentan a medida

que disminuye el tamaño de partícula. Cuando el diámetro de partícula se reduce por debajo de 0.50 mm la capacidad de aireación se reduce significativamente. Los valores de espacio poroso total y porosidad ocluida se incrementan al aumentar el tamaño de partícula.

Las fracciones 0.25 a 1.00 mm muestran un papel esencial en la relación agua-aire y por ende en la formulación de sustratos de tezontle existe una relación inversa muy estrecha entre el contenido relativo de agua y la capacidad de aireación, cuya función se puede utilizar para determinar las mejores propiedades de aireación y capacidad de retención de agua.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ing. Juan Pablo Tehuacatl por su apoyo brindado durante la elaboración del presente manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Ansorena, J. 1994. Sustratos. Propiedades y Caracterización. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.
- Baca, C. G. A.; Alcalde B., S.; Martínez G., A.; Laird, J. y Barrera I., D. 1990. Efecto de la solución nutritiva, el riego, el sustrato y la densidad de siembra en tres cultivos hortícolas en hidroponía al aire libre. I pepino. *Agrociencia, Serie Agua-Suelo-Clima*. 1:51-76.
- Blake, G. R. and Hartge K. H. 1986. Particle density. p. 377-382. *In: Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods*. A. Klute (ed). 2d ed. Agronomy Monography no. 9. ASA., SSSA. Madison WI, USA.
- Burés, S.; Gago, M. C. and Martínez, F. X. 1997. Water characterization in granular materials (referred). *Acta Horticulturae*. 450:389-396.
- Carmona, E.; Ordovás, J.; Moreno, M. T.; Avilés, M.; Aguado, M. T. and Ortega, M. C. 2003. Granulometric characterization and alteration during composting of industrial cork residue for use as a growing media. *Hortscience*. 38:1242-1246.
- Handreck, K. A. 1983. Particle size and the physical properties of growing media for containers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 14:209-222.

- Lemaire, F.; Fatigues, A.; Revière, L. M.; Charpentier, S. and Morel, P. 2003. Cultures en post et conteneurs, principes agronomiques et applications. 2^a ed. INRA. Paris. 210 p.
- Martínez, F. X. 1993. Propuesta de metodología para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos. *Actas de Horticultura*. 11:55-66.
- Noguera, P.; Abad, M.; Puchades, R.; Maquieira, A. and Noguera, V. 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 34: 593-605.
- Prasad, M. and Ní Chualáin, D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. *Acta Horticulturae*. 648: 161-166.
- Raviv, M.; Wallach, R.; Silber, A. and Bar-Tal, A. 2002. Substrates and their analysis. *In: Hydroponic production of vegetable and ornamental*. D. Savvas and H. Passam (eds). Embryo publications. Athens, Greece. p. 25-101.
- Raviv, M.; Wallach, R. and Blom, T. J. 2004. The effect of physical properties of soilless media on plant performance, a review. *Acta Horticulturae*. 644:251-259.
- Statistical Analysis Systems Institute (SAS Institute). 1999. The SAS system for windows. Release 8.2. SAS Institute Cary, NC.
- UNE-EN 13040:1999. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo: Preparación de muestras para ensayos químicos y físicos, determinación del contenido de materia seca, contenido de humedad y densidad aparente compactada en laboratorio. AENOR. Madrid, España. 19 p.
- UNE-EN 13041:1999. Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo: Determinación de propiedades físicas. Densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total. AENOR. Madrid, España. 25 p.
- Wallach, R.; da Silva, F.F. and Chen, Y. 1992. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *Journal of America Society of Horticultural Science*. 117:415-421.