

TAMAÑO DE PARTÍCULA Y RELACIÓN MICROMORFOLÓGICA EN PROPIEDADES FÍSICAS DE PERLITA Y ZEOLITA *

PARTICULE SIZE AND MICROMORPHOLOGICAL RELATION ON PHYSICAL PROPERTIES OF PERLITE AND ZEOLITE

Rosa Anicua Sánchez^{1§}, Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena¹, Prometeo Sánchez García¹, Carlos Ortiz Solorio¹, Victor H. Volke Halle¹ y Juan Enrique Rubiños Panta²

¹Recursos Naturales- Posgrado en Edafología, ²Recursos Naturales- Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Posgraduados. Km 35.5 carretera México- Texcoco. 56230. Montecillo, Estado de México. §Autora para correspondencia: rosyans@yahoo.com.

RESUMEN

La selección de sustratos se basa en la capacidad de retención de humedad y drenaje; sin embargo, se cuenta con conocimiento limitado del tipo, forma y acomodo de las partículas que determinan esas características. El objetivo fue evaluar las propiedades físicas (densidad aparente, densidad real, espacio poroso total, capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente disponible y materiales sólidos) y micromorfológicas de perlita y zeolita en diferentes tamaños de partícula. El estudio se realizó en el Colegio de Postgraduados, en Texcoco, Estado de México, México, en 2006. Los tamaños de partícula fueron: >3.36, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 y <0.13 mm. La descripción micromorfológicas de poros y partículas se realizó mediante secciones delgadas impregnadas con resina; los parámetros estudiados fueron: tamaño, abundancia, forma, rugosidad de la superficie y distribución. Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con 3 repeticiones. Los resultados mostraron que la forma, tamaño, empaquetamiento y porosidad interna y externa de las partículas determinan las propiedades físicas del sustrato, propiedades que varían con el tamaño de partícula y que difieren en la capacidad de retención y movimiento del agua.

Palabras clave: curva de retención de humedad, porosidad interna y externa, sustratos.

ABSTRACT

The selection of growth media is based upon its water retention capacity and drainage; however, there is a limited knowledge of the type, form and arrangement of the particles that determine these characteristics. The objective was to determine the physical (particle density, total porosity, air capacity, readily available water, reserve water, less available water, and solid material) and micromorphological properties of different particle size of perlite and zeolite. The study was carried out at the Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de Mexico, Mexico, in 2006. The particle sizes were >3.36, 2.00, 1.0, 0.5, 0.25 and <0.13 mm. The study of pores and particles was made by impregnating thin resin sections of substrates; the studied parameters were: size, abundance, shape, surface roughness, and distribution. A completely random block design with 3 replications was used. Results showed that shape, size, packing, internal and external porosity of particles

* Recibido: Mayo, 2008
Aceptado: Enero, 2009

determines the physical properties of growth media, that vary in function of particle size and differ in water retention capacity and water movement.

Key words: internal and external porosity, growing media, water release curve.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas de sustratos relacionadas con el tamaño y distribución de partículas, así como la porosidad total determinan la capacidad de retención y movimiento del agua que son importantes para el crecimiento de las plantas (Adler, 1992; Terés *et al.*, 1995).

En algunos materiales que se utilizan como sustratos se ha determinado que el tamaño de partícula influye en la relación agua-aire, no solo en materiales específicos (peat moss, composta, corteza de pino y perlita), sino también en mezclas de materiales (Verdonck, 2004); sin embargo, se desconocen sus propiedades funcionales.

La mayoría de los materiales que se utilizan como sustratos tienen poros dentro y entre partículas, lo cual aumenta el espacio vacío (Adler, 1992; Burés, 1997). Orozco *et al.* (1995) observaron una correlación entre tamaño de partícula y tamaño de poro en perlita y determinaron que la porosidad interna de este material puede tener un efecto significativo en la capacidad de retención de agua; no obstante, esta no puede ser cuantificada y diferenciada fácilmente por las técnicas convencionales para determinar las relaciones agua-aire (Burés *et al.*, 1993).

Algunas técnicas que consisten en simular la no-porosidad de los sólidos se pueden utilizar para caracterizar el espacio poroso, entre ellas: el análisis de imágenes (Chen *et al.*, 1980; Burés *et al.*, 1993), el picnómetro de suelo (Martínez *et al.*, 1991), la resonancia magnética nuclear, análisis de microscopía electrónica (Pokorny y Wetzstein, 1984), y curvas de liberación de agua (De Boodt *et al.*, 1974; Chen *et al.*, 1980). No obstante, estas técnicas se han utilizado poco para la caracterización de sustratos ya que son materiales alterados. La micromorfología (descripción de partículas y poros) es una rama de la ciencia del suelo que se enfoca al estudio del tamaño y distribución de partículas y poros (macros y micros, entre y dentro de partículas) en muestras de suelo inalteradas; por lo que puede ser una alternativa para determinar las formas y tamaños de partícula y su relación con las propiedades físicas de los sustratos.

La perlita es una roca volcánica vítrea (silicato de aluminio) formada por el enfriamiento rápido; es un material amorfo que contiene entre 2 y 5% de agua atrapada. Este mineral en su manipulación industrial, se granula y precalienta a 300-400 °C y se vierte en hornos a 1 000 °C, formando una espuma blanca y ligera, por lo que es completamente estéril (Landis *et al.*, 1990).

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos hidratados de cationes alcalinos y alcalinotérreos que poseen una estructura tridimensional cristalina, los cuales se caracterizan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse en forma reversible, además de cambiar algunos de sus constituyentes catiónicos sin modificar su estructura (Ming y Mumpton, 1989).

El objetivo del presente trabajo fue determinar las propiedades físicas (densidad aparente y real, espacio poroso total, capacidad de aireación, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente disponible y curvas de liberación de agua) y micromorfológicas de sustratos (perlita y zeolita) en diferentes tamaños de partícula para determinar el comportamiento de la retención y movimiento del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el Colegio de Postgraduados en 2006. Se utilizaron dos sustratos inorgánicos, perlita y zeolita. La perlita se obtuvo de la casa Comercial Polietilenos del Sur y la zeolita de yacimientos en el estado de San Luis Potosí. Debido a que existen muchos tipos de zeolita que varían en cuanto a sus propiedades físicas y químicas y al desconocimiento específico de su procedencia, se realizó la identificación a través de la difracción de rayos X. La muestra de zeolita se molió finamente y se colocó en un porta muestras y la medición se realizó con la técnica de barrido a una velocidad de 4° min⁻¹ de 2 a 60° 2 θ .

Los sustratos se secaron al aire, se pesaron 100 g y se pasaron por una serie de tamices de >3.36, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25 y < 0.13 mm durante 10 minutos; posteriormente se pesó el contenido de cada tamiz con precisión de 0.1 g.

Para el análisis micromorfológico cada tamaño de partícula se depositó en tubos de PVC de 7.5 cm de largo y 5.5 cm de diámetro. Las muestras se secaron al aire y se impregnaron con resina poliéster insaturada y monómero de estireno en una relación 7:3, posteriormente se dejaron en gelación a la sombra por un lapso de 30 días. Una vez endurecidas se

procedió a cortarlas con un disco de punta de diamante, se pulieron con abrasivos de carburo de silicio (carborondum) y óxido de aluminio (aloxita) hasta alcanzar un espesor de 30 μm y se elaboraron secciones delgadas de 5 x 7.5 cm. Para cada tamaño de partícula se describió: la forma (redondez, esfericidad y rugosidad), distribución (básica y tipo de empaquetamiento) y poros (tipo, tamaño, acomodamiento y ubicación entre e intra partículas). Las secciones se analizaron con un microscopio petrográfico marca Olympus, con aumentos de 2 hasta 20 X y se describieron con base en el manual elaborado por Bullock *et al.* (1985). Para determinar el porcentaje de partículas y poros (intra e entre), la sección delgada se cuadrículó cada 0.5 cm (150 cuadros) y se cuantificó cada rasgo localizado en las intersecciones de la sección delgada. La distancia entre partículas se determinó a través de una imagen de sección delgada digitalizada y agrandada de 7.5 x 5 cm a 22.5 por 15 cm. La imagen fue impresa en papel y se midió la distancia entre partículas con una regla.

Las propiedades físicas que se determinaron fueron: densidad aparente (DA), densidad real (DR), espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD) y materiales sólidos (MS) con los

procedimientos descritos en el manual de caracterización de sustratos de Ansorena (1994) y las curvas de liberación de agua con el método De Boodt *et al.* (1974).

El diseño experimental fue completamente al azar con 3 repeticiones y se efectuó el análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) (SAS Institute, 1990).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Perlita

Análisis micromorfológico

En todos los tamaños de partícula de perlita se observó la formación dos tipos de poros: empaquetamiento simple con cavidades principalmente en tamaños menores de 0.50 mm (Figura 1a-c) y poros vesiculares. Los poros de empaquetamiento simple se presentan entre las partículas (Bullock *et al.*, 1985) (Figura 1a) son equidimensionales o alargados, mientras que las vesículas, se generan por el gas atrapado en su interior (Pape y Lager, 1995).

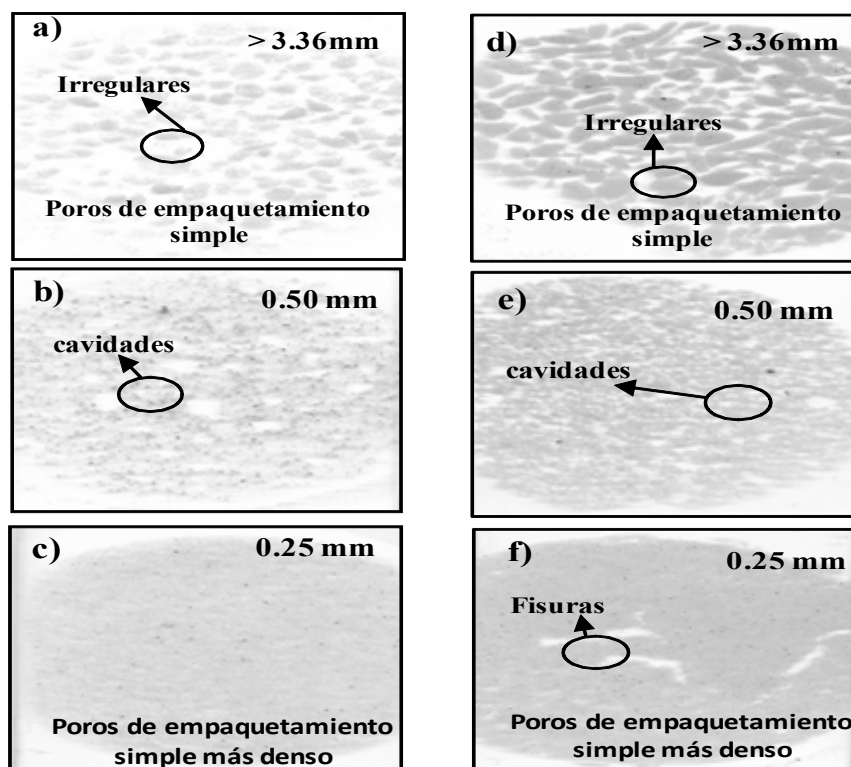


Figura 1. Secciones delgadas en perlita (a-c) y zeolita (d-f) en diferentes tamaños de partícula. Dimensión de la sección delgada 5 x 7.5 cm.

En la perlita por ser un material inorgánico y volcánico, se esperaba sólo el acomodamiento simple de las partículas; sin embargo, en el tamaño intermedio (partículas de 1 mm) las partículas se reorganizaron y formaron cavidades, probablemente como resultado de burbujas de aire en la resina utilizada. Este tipo de poros no se presentó en partículas pequeñas.

La presencia de poros entre partículas (macroporos de 0.01 a 1 mm y mesoporos de 0.05 a 0.01 mm), e intra partículas (microporos < 0.05 mm) variaron con el tamaño de las mismas (Figura 2a) y mostraron una tendencia lineal (Cuadro 1). El mayor porcentaje de poros interpartícula se presentó en tamaños < 0.13 mm (93%). En el caso de las partículas > 3.36 mm ocurrió tanto el menor porcentaje de poros entre (55.2%) como el mayor porcentaje de poros intra partícula (44.8%) (Cuadro 1).

La perlita mostró tres diferentes tipos de formas: subredonda-rugosa, subangular-rugosa, subredonda-rugosa-ondulada y cuatro formas vesiculares: redonda-lisa-ondulada, subredonda-lisa-ondulada, redonda-ondulada y subredonda-ondulada (Figura 2b-d). La mayor variedad de formas se presentó en partículas > 2 mm y las formas más homogéneas (subredonda y redonda) en partículas menores a estas. Cuando se relacionó la distancia entre partículas con la forma de ellas, se observó que a mayor variedad de formas, la distancia entre poros se incrementa entre 100 y 700 μm (partículas > 3.36 mm); mientras que en formas más homogéneas los diámetros dominantes fueron entre 0 y 200 μm (partículas pequeñas < 1 mm); lo que significa mayor compactación, Cuadro 2.

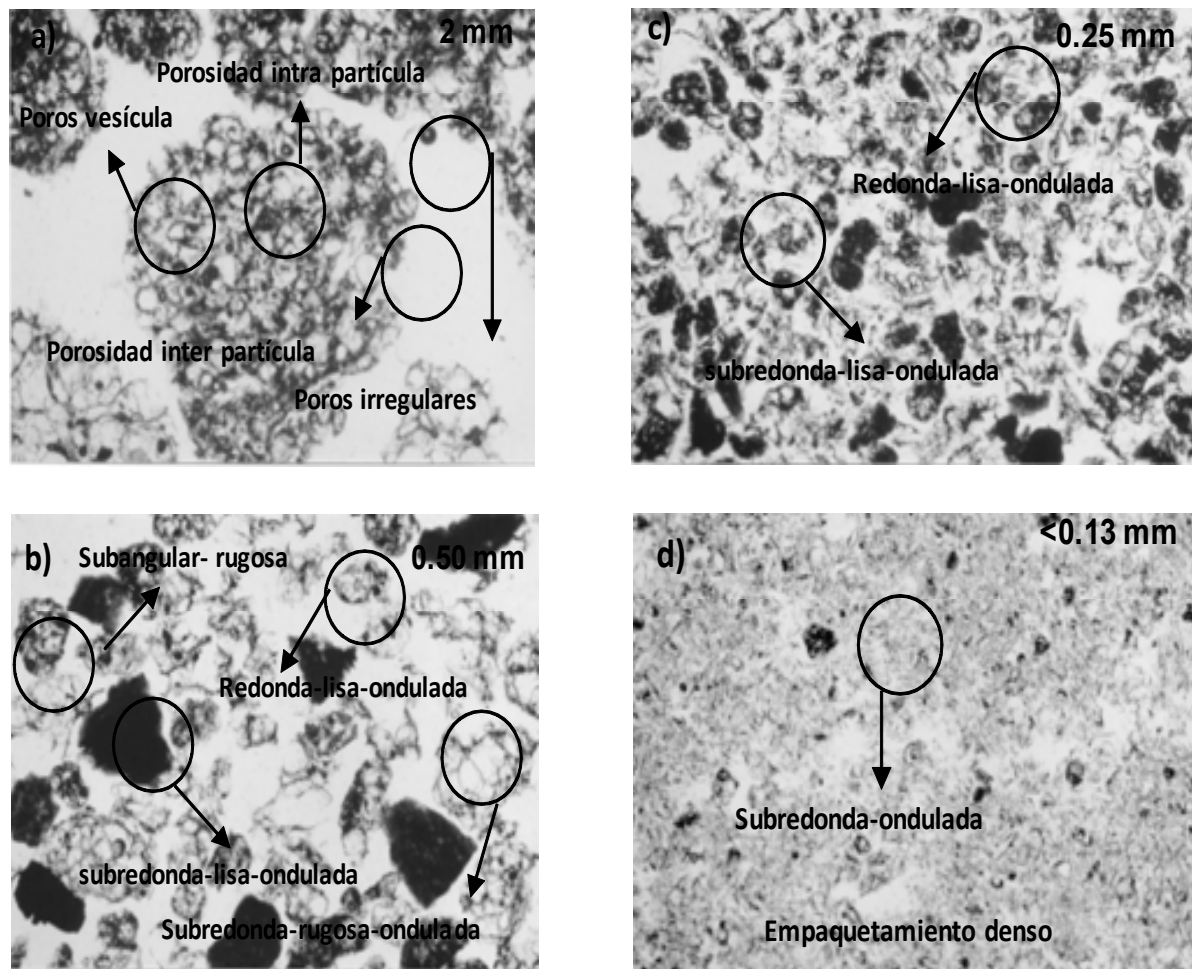


Figura 2. Perlita: a-d). Porosidad inter e intra agregado y forma de poros en diferentes tamaños de partícula. Longitud del marco 5.3 mm LPP.

Cuadro 1. Porosidad en diferentes tamaños de partícula de perlita.

| Tamaño de partícula (mm) | <0.13 | 0.25 | 0.50 | 1.0 | 2.0 | >3.36 |
|--------------------------|---------------|------|------|------|-----|-------|
| | Porosidad (%) | | | | | |
| Inter partícula | 93 | 82.8 | 79.1 | 67.3 | 65 | 55.2 |
| Intra partícula | 7 | 17.2 | 20.9 | 32.7 | 35 | 44.8 |
| P. E. simple | 93 | 82.8 | 79.1 | 67.3 | 65 | 55.2 |
| P. E. compuesto | | | | | | |
| P. E. complejo | | | | | | |
| Vesícula | 7 | 17.2 | 20.9 | 32.7 | 35 | 44.8 |
| Fisuras | | | | | | |

PE= poros de empaquetamiento

Cuadro 2. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en perlita.

| Tamaño de partícula (mm) | | <0.13 | 0.25 | 0.50 | 1.0 | 2.0 | > 3.36 |
|--------------------------|---------|----------------|------|------|------|------|--------|
| | | Ocurrencia (%) | | | | | |
| | 0-50 | 80 | 43.3 | 26.7 | 6.7 | | |
| | 50-100 | 20 | 50.0 | 43.3 | 36.7 | 3.3 | |
| Diámetro (μm) | 100-200 | | 6.7 | 23.3 | 43.3 | 70.0 | 50.0 |
| | 200-300 | | | 6.7 | 13.3 | 16.7 | 20.0 |
| | 300-500 | | | | | 10 | 16.7 |
| | 500-700 | | | | | | 13.3 |

Propiedades físicas

Los valores de densidad aparente observados fueron irregulares; sin embargo, se observó que a medida que disminuyó el tamaño de partícula la DA se

incrementó. El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre el tamaño de partícula ($p \leq 0.05$) y la DA. La mayor densidad se observó en partículas de 0.13 mm (0.32 g cm^{-3}) y la menor en partículas $> 3.36 \text{ mm}$ (0.14 g cm^{-3}) (Cuadro 3), debido al empaquetamiento más denso.

Cuadro 3. Propiedades físicas en diferentes tamaños de partícula en perlita.

| | | Tamaño de partícula (mm) | | | | | |
|---|-----|--------------------------|----------|----------|---------|----------|---------|
| | | <0.13 | 0.25 | 0.50 | 1.0 | 2.0 | >3.36 |
| Distribución granulométrica (% en peso) | | 4.7 | 2.02 | 28.2 | 29.2 | 17.6 | 18.2 |
| Propiedades físicas | | | | | | | |
| Densidades (g cm^{-3}) | DA | 0.32 a | 0.22 b | 0.22 b | 0.15 c | 0.15 c | 0.14 c |
| | DR | 1.9 a | 1.2 b | 1.3 b | 1.0 cb | 0.75 cd | 0.62 d |
| Porosidad y retención de agua (% volumen) | EPT | 83.16 a | 81.67 ba | 83.08 ba | 85.00 a | 80.00 ba | 77.42 b |
| | CA | 6.7 d | 14.5 c | 8.6 d | 18.0 b | 8.2 d | 40.9 a |
| | AFD | 12.4 c | 43.6 a | 42.5 a | 22.4 b | 24.5 b | 10.0 c |
| | AR | 12.6 a | 6.1 c | 12.3 a | 11.3 ba | 11.8 ba | 7.1 c |
| | ADD | 51.4 a | 17.5 c | 19.7 c | 33.2 b | 35.4 b | 19.4 c |
| | MS | 16.84 b | 18.33 ba | 16.92 ba | 15.00 b | 20.00 ba | 22.58 a |

Medias con la misma letra en hileras son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). DA= densidad aparente; DR= densidad real; EPT= espacio poroso total; CA= capacidad de aireación; AFD= agua fácilmente disponible; AR= agua de reserva; ADD= agua difícilmente disponible y MS= materiales sólidos.

La perlita es un material ligero con densidad aparente alrededor de 0.1 g cm^{-3} y con tamaño de partícula usualmente entre 1.6 y 3 mm (Landis, 1990). Burés (1997) reportó una densidad aparente de 0.12 g cm^{-3} para perlita, sin mencionar el tamaño de las partículas con las que efectuó el estudio. En este estudio, los resultados observados de densidad aparente fueron ligeramente más altos que los reportados por estos autores.

Se observaron diferencias significativas en la densidad real entre los diferentes tamaños de partícula (Cuadro 3). Este comportamiento puede indicar un error metodológico, aunque también se ha reportado que ésta varía de acuerdo con el método utilizado (Burés, 1997). La variación de la densidad real de este material, está relacionada con el empaquetamiento o arreglo, tipo y forma de las partículas debido a que presentan un comportamiento inversamente proporcional; es decir, entre mayor tipo de formas (subredonda-rugosa, subangular-rugosa, subredonda-lisa-ondulada y redonda-ondulada) (Figura 2b-c), menor compactación con el picnómetro. En el caso de las partículas $<0.13 \text{ mm}$ solo se presentó una forma (subredonda-ondulada), permitiendo el acomodamiento denso y uniforme de las partículas, de ahí que el valor de la densidad real observada fue mayor, 1.9 g cm^{-3} (Figura 2d).

Estos resultados contrastan con lo reportado por Burés (1997), quien señaló que las propiedades de empaquetamiento de las partículas dependen del contacto y la proximidad que se da entre ellas. Los resultados de espacio poroso total en perlita variaron entre 77.4 y 85%, Cuadro 3 presentando valores irregulares de acuerdo con el tamaño de partícula.

El mayor EPT se observó en partículas de 1 mm de diámetro con 85% (Cuadro 3), debido a que en este tamaño se generaron poros cavidades (macro y meso poros). Este comportamiento puede ser función del tamaño, forma y

arreglo de las partículas individuales de la perlita. Burés (1997) reportó un EPT de 95.47% en perlita y Ward *et al.* (1987) reportaron que la perlita es un material rígido que no se comprime con facilidad, por lo que tiene una buena porosidad y por ende una mejor aireación al sustrato en comparación con la arena.

Estos resultados coinciden con los valores observados en este estudio; sin embargo, se observó además, que el comportamiento de la perlita en cuanto a la retención de agua (fácilmente disponible, de reserva, o difícilmente disponible) es irregular y es función del tamaño de partículas; además, estas diferencias fueron estadísticamente significativas en todas las variables (Cuadro 3). Por ejemplo, las partículas $>3.36 \text{ mm}$ (tamaño de grava) presentaron la más alta capacidad de aireación (40.9%), las de 0.25 y 0.50 mm, el más alto porcentaje de agua fácilmente disponible (43.6 y 42.5%, respectivamente) y las $<0.13 \text{ mm}$, la mayor cantidad de agua difícilmente disponible (51.4%).

Este comportamiento está relacionado con el tipo de poros inter e intra partículas y con la superficie específica que aumenta o disminuye las fuerzas de adhesión. Las partículas de mayor tamaño tienen menor superficie y menor porosidad entre partículas, en contraste con las partículas pequeñas que tienen mayor superficie específica con menor porosidad dentro de la misma. Como sustrato, la perlita se usa para mejorar la aireación y la capacidad de retención de agua (hasta 5 veces su peso) (Burés, 1997; Handreck y Black, 1994; Bunt, 1988).

El tamaño de partícula influyó en la liberación de agua, Figura 3. Con los resultados obtenidos en este estudio, en cuanto a tamaño de partícula, forma y porosidad inter e intra partícula se puede seleccionar la granulometría apropiada de los sustratos de acuerdo con el objetivo y tipo de cultivo a establecer.

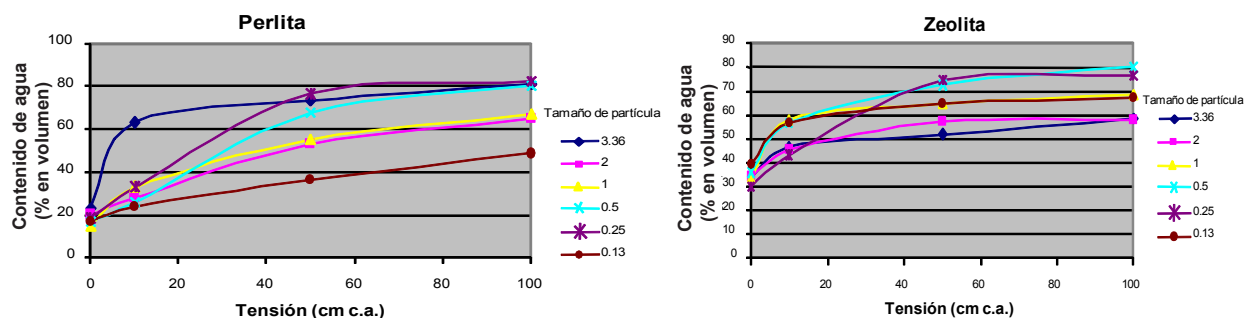


Figura 3. Curva de liberación de agua para perlita y zeolita en diferentes tamaños de partícula.

Zeolita

De acuerdo con el difractograma de difracción de rayos X realizado en el material, las zeolitas utilizadas en este estudio corresponden a Faujasite (14.0, 3.78 y 2.88 nm). La Faujasite presenta canales de 0.8 a 1.0 nm de diámetro, lo que hace que su superficie específica interna sea considerable (cerca de 10⁵ m² kg⁻¹) y almacene agua (Boettinger y Ming, 2002).

Análisis micromorfológico

Las partículas forman tres tipos de poros: empaquetamiento simple (Figura 1d-f) y cavidades, en tamaños gruesos e intermedios y fisuras en tamaños menores de 0.25 mm. Los poros inter e intra partícula varían con el tamaño de las mismas (Cuadro 4 y Figura 4a-d). El más alto porcentaje

de poros inter partícula se observó en partículas <0.13 mm (100%), mientras que las partículas de 2 mm mostraron el menor porcentaje de poros inter partícula (72.5%) con el mayor porcentaje de poros intra partícula (27.5%) (Figura 4a).

La zeolita presentó cuatro diferentes tipos de formas: angular-subangular-ondulada, angular-lisa-ondulada, subangular-rugosa, subredonda-ondulada (Figura 4a-d), cuya variabilidad esta relacionada con el tamaño de partícula y a su vez con el diámetro de poros. Por ejemplo, las partículas >3.36 mm presentaron una mayor variedad de formas, con diámetro de poros más amplio (entre 0 y 500 µm); mientras que las partículas más pequeñas (<1 mm), con formas homogéneas, el diámetro dominante fue menor (< 200 µm).

Cuadro 4. Porosidad en diferentes tamaños de partícula de zeolita.

| Tamaño de partícula (mm) | <0.13 | 0.25 | 0.50 | 1.0 | 2.0 | >3.36 |
|--------------------------|-------|------|------|-----|------|-------|
| | (%) | | | | | |
| Inter partícula | 100 | 96 | 93 | 82 | 72.5 | 80.9 |
| Intra partícula | | 4 | 7 | 18 | 27.5 | 19.1 |
| P. E. simple | 95 | 100 | 93 | 82 | 72.5 | 80.9 |
| P. E. compuesto | | | | | | |
| P. E. complejo | | | | | | |
| Vesícula | | | | 6 | 19.2 | 10.9 |
| Fisuras | 5 | | | 12 | 8.3 | 8.2 |

PE= poros de empaquetamiento.

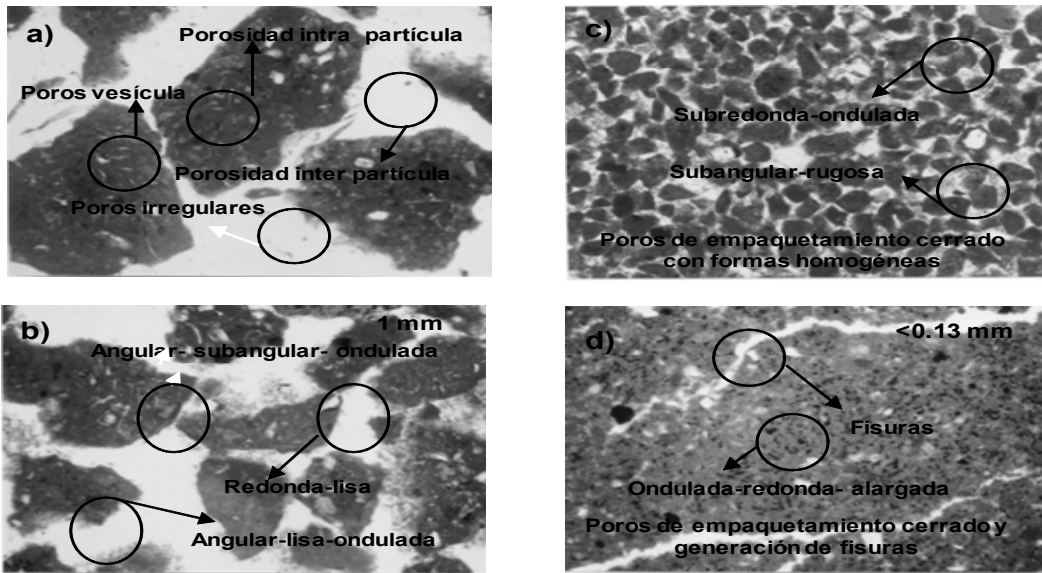


Figura 4. Zeolita: a-d). Porosidad inter e intra agregado, forma de poros en diferente tamaño de partícula. Longitud del marco 5.3 mm LPP.

Es importante señalar la formación de mesoporos o poros cavidad en partículas de 1 y 0.50 mm (de 100 a 500 μm) y fisuras en partículas menores de 0.25 mm (Figura 4d). La distancia dominante entre partículas fue de 0 a 300 μm (Cuadro 5).

Brady y Weil (1999) reportaron que las fisuras se generan como resultado de la pérdida de humedad en las partículas. Es

probable que este proceso esté relacionado con el tamaño de partícula, debido a un mayor contacto de los microporos estructurales con el medio. Este fenómeno no ocurre en las partículas grandes, donde el agua estructural se conserva a causa de una menor superficie de exposición. Cuando las partículas pierden humedad, tienen a contraerse y formar las grietas, proceso común en las partículas arcillosas (Figura 1f y 4d).

Cuadro 5. Porcentaje de ocurrencia del diámetro de poros en zeolita en diferente tamaño de partícula.

| | | Tamaño de partícula (mm) | | | | | |
|----------------------------|---------|--------------------------|------|------|------|------|--------|
| | | <0.13 | 0.25 | 0.50 | 1.0 | 2.0 | > 3.36 |
| Diámetro (μm) | 0-50 | 86.7 | 43.3 | 36.7 | 43.4 | 30 | 23.3 |
| | 50-100 | 13.3 | 50 | 46.7 | 33.3 | 20 | 10 |
| | 100-200 | | 6.7 | 16.6 | 20 | 36.5 | 36.7 |
| | 200-300 | | | | 3.3 | 13.3 | 20 |
| | 300-500 | | | | | | 10 |
| | 500-700 | | | | | | |

Cuadro 6. Propiedades físicas en diferentes tamaños de partícula en zeolita.

| Tamaño de partícula (mm) | | <0.13 | 0.25 | 0.50 | 1.0 | 2.0 | > 3.36 |
|--|-----|---------|---------|---------|----------|---------|----------|
| Distribución granulométrica (%en peso) | | 2.9 | 0.05 | 0.1 | 0.59 | 17.6 | 78.8 |
| Propiedades físicas | | | | | | | |
| Densidades (g cm^{-3}) | DA | 0.83 a | 0.68 b | 0.81 a | 0.76 ba | 0.75 ba | 0.76 ba |
| | DR | 2.1 c | 2.28 a | 2.23 ba | 2.24 ba | 2.2 bc | 2.22 ba |
| Porosidad y retención de agua (%volumen) | EPT | 60.48 b | 70.18 a | 63.68 b | 66.07 ba | 65.91 b | 65.77 ba |
| | CA | 17.4 c | 13.7 d | 20.5 b | 23.8 a | 11.1 e | 12.7 d |
| | AFD | 7.8 cd | 31.4 a | 15.8 b | 6.9 d | 12.1 cb | 5.2 d |
| | AR | 2.4 c | 1.6 c | 7.6 a | 3.7 bc | 0.8 c | 6.6 ba |
| | ADD | 32.8 b | 23.6 c | 19.8 d | 31.6 b | 41.9 a | 41.3 a |
| | MS | 39.52 a | 29.82 b | 36.32 a | 33.93 ba | 34.09 a | 34.23 ba |

Medias con la misma letra en hileras son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$). DA= densidad aparente; DR= densidad real; EPT= espacio poroso total; CA= capacidad de aireación; AFD= agua fácilmente disponible; AR= agua de reserva; ADD= agua difícilmente disponible y MS= materiales sólidos.

Propiedades físicas

Los valores de densidad aparente fueron irregulares y estadísticamente diferentes, debido a que el grado de compresión y el arreglo de partículas son afectados, dependiendo del tamaño de estas. La mayor densidad se observó en partículas <0.13 mm (0.83 g cm^{-3}) y la menor en partículas de 0.25 mm (0.68 g cm^{-3}) (Cuadro 6).

Ming y Mumpton (1989) y Boettinger y Ming (2002) reportaron que la densidad aparente difiere para cada tipo

de zeolita, determinaron para la faujasite un valor de 1.91 Mg m^{-3} , el cual es muy alto en comparación con el material zeolítico estudiado. La densidad real fue variable (Cuadro 6) y estadísticamente diferente, presentándose el mayor valor en partículas de 0.25 mm (2.28 g cm^{-3}) y el menor en partículas <0.13 mm (2.1 g cm^{-3}).

Los valores del espacio poroso total en zeolita fueron irregulares y estadísticamente diferentes (entre 60.48 y 70.18%) de acuerdo con el tamaño de partícula (Cuadro 6). El mayor EPT se presentó en

partículas de 0.25 mm de diámetro con 70.18% (Cuadro 6), debido a su acomodamiento que generó poros con cavidades de diferente tamaño (0-500 μm).

La retención de agua fácilmente disponible, de reserva, y difícilmente disponible fue estadísticamente diferente en función del tamaño, forma y distancia de las partículas (Cuadro 6). Por ejemplo, las partículas de 1 mm mostraron la mayor capacidad de aireación (23.8%), las partículas de 0.25 mm la mayor cantidad de AFD (31.4%) y uno de los menores valores para ADD (23.6%); mientras que en partículas > 3.36 mm mostraron la menor cantidad de AFD (5.2%) y la mayor cantidad de ADD (41.3%).

Cuando se comparan estos resultados con el tipo y la distancia de los poros (inter e intra partícula), la superficie específica (externa e interna) y las fuerzas de adhesión, se puede explicar este comportamiento irregular. En las partículas de 0.25 mm hay una mayor superficie específica externa que permite que las moléculas de agua se adhieran, aunque no con la suficiente fuerza (fácilmente extraíble), lo que provoca una contracción de partículas (entre 0 y 100 μm) y formación de algunas fisuras. En el caso de las partículas más grandes (>3.36 mm), la superficie específica interna (estructural) es mayor, de ahí que el agua tienda más a almacenarse que a percolarse a pesar de la presencia de macroporos, es decir, en estas partículas, el agua encuentra más superficie de contacto lo que provoca mayor adherencia (agua difícilmente disponible).

En las partículas de 1 mm (tamaño intermedio), la retención de humedad fue también intermedia, y la capacidad de aireación fue la mayor (23.8%). Una explicación a este comportamiento puede ser la distancia entre poros observada (entre 0 y 200 μm) y las formas homogéneas de las partículas (Figura 4 a-d). Vassilyev *et al.* (2006) indicaron que las zeolitas poseen poros regulares, además, de la existencia de dos tipos de superficies: interna, inaccesible a largas moléculas y externa (cristalina), que tiene un impacto en el tamaño de los poros.

Las curvas de liberación de agua para zeolita muestran que el tamaño de partícula influyó significativamente en este proceso (Figura 3).

CONCLUSIONES

Las propiedades físicas (DA, DR, EPT, CA, AFD, AR y ADD) en perlita y zeolita son determinadas por el tamaño y forma de partícula, las cuales a su vez definen el tipo de porosidad con la formación de empaques simples, cavidades fisuras y vesículas, el tamaño número y ubicación de los poros que a su vez influyen en la capacidad de retención y movimiento del agua en los sustratos.

LITERATURA CITADA

- Adler, P. M. 1992. Porous media: geometry and transports. Butterworth-Heinemann. Stoneham, M.A. USA. 235 p.
- Ansorena, M. J. 1994. Sustratos, propiedades y caracterización. Mundi Prensa, Madrid. ISBN 84-7114-481-6.
- Boettinger, J. L. and Ming, D. W. 2002. Zeolites. *In*: Dixon, B. J. and Schulze, G. D. (eds.). Soil mineralogy with environmental applications. Book Series, No.7. Soil. Sci. Soc. Am. Inc. South Segoe Road, Madison, WI53711, USA. p. 585-610.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils. 12^a Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River. New Jersey, USA. 881 p.
- Bullock, P.; Federoff, N.; Jongerius, A.; Stoops, G. and Tursina, T. 1985. Handbook for soil thin section description. Wayne Research Publications, England.
- Burés, S.; Farmer, M. A.; Landau, D. P.; Ferrenberg, A. M. and Pokorny, F. A. 1993. Container media characterization by scanning electron microscopy and comparison with a Monte Carlo computer simulated medium. *Cornmun. Soil Sci. & Plant Anal.* 24:2649-2659.
- Burés, S.; Landau, D. P.; Ferrenberg, A. M. and Pokorny, F. A. 1993. Monte Carlo computer simulation in horticulture: A model for container media characterization. *HortScience* 28:1074-1078.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ed. Agrotecnia. S. L. Madrid, España. 339 p.
- Bunt, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hyman Ltd. London. 148 p.

- Chen, Y.; Banin, A. and Ataman, Y. 1980. Characterization of particles and pores, hydraulic properties and water-air ratios of artificial growth media and soils. *ISOSC Proc.* p. 63-81.
- De Boodt, M.; Verdonck, O. and Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae* 37:2054- 2062.
- Handreck, K. A. and Black, N. D. 1984. Growing media for ornamental plants and turf. Kensington, NSW, Australia: New South Wales University Press. 401 p.
- Landis, T. D. 1990. Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor. Vol. 2. USDA. EUA. p. 46-92.
- Martínez, F. X.; Burés, S.; Blanca, F.; Yuste, M. P. and Valero, J. 1991. Experimental and theoretical air/water ratios of different substrate mixes at container capacity. *Acta Horticulturae* 294:241-248.
- Ming, D. W. and Mumpton, F. A. 1989. Zeolites in soils. *In*: Dixon, B. J. and Weed, B. S. (eds.). Minerals in soil environmental. (2nd Ed.). Book Series, No.1. Soil Science Society of America, Inc. South Segoe Road, Madison, WI53711, USA. p. 585-610.
- Orozco, R.; Marfa M. and Burés, S. 1995. Water status of graded perlites. *Acta Horticulturae* 401:137-143.
- Pape, T. and Lager, D. 1995. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen, Netherlands. 164 p.
- Pokorny, F. A. and Wetzstein, H. Y. 1984. Internal porosity, water availability, and root penetration of pine bark particles. *HortScience* 19:447-449.
- Statistical Analysis Systems Institute (SAS Institute.) 1990. SAS/STAT. User's guide. Ver. 6. Ed. SAS Institute, Inc. Cary, NC. 243 p.
- Terés, V.; Arrieta, V. and Rozas, M. 1995. A method for evaluation of fair volume in substrates. *Acta Horticulturae* 401:41-48.
- Verdonck, O. 2004. The influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Horticulturae* 644:99-101.
- Vassilyev, O.; Chen, J.; Hall, G. S. and Khinast, G. 2006. Efficient surface functionalization of zeolites via esterification. Microporous and mesoporous materials. Elsevier. 101-108.
- Ward, J.; Bragg, N. C. and Chambers, B. J. 1987. Peat based compost: their properties defined and modified to your needs. International Plant Propagators Society, combined Proceedings. 36:288-292.