

UN MÉTODO SENCILLO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA POROSIDAD DE UN AGREGADO DE SUELO

D. Moret-Fernández, M.V. López¹

¹ Departamento de Suelo y Agua. Estación Experimental de Aula Dei. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC). Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza, Spain. david@eead.csic.es; vlopez@eead.csic.es

RESUMEN. Este trabajo presenta un nuevo método (AM) para estimar la porosidad de agregados de suelo, ϕ , expresada como el cociente entre el volumen interno de poros (V_i) y el volumen externo del agregado (V_T). V_T se calcula a partir de la densidad de partícula, el peso del agregado y el V_i , estimado este último a partir del peso del agregado saturado en alcohol. El método se validó comparando V_T por AM con el V_T medido por fotogrametría (PHM), sobre 36 agregados de 8-16 mm procedentes de un suelo bajo laboreo tradicional (CT), reducido (RT) y no laboreo (NT). Los resultados muestran una buena relación entre el V_T medido con PHM y AM ($y = 0,94x + 0,01$; $R^2 = 0,99$). El método fue suficientemente sensible para detectar diferencias entre los sistemas de laboreo. Los agregados de suelo bajo NT y RT presentaron una ϕ significativamente mayor que bajo CT.

ABSTRACT. This work presents a new method (AM) to estimate the soil aggregate porosity, ϕ , expressed as the quotient between the internal pore volume (V_i) and the aggregate volume (V_T). V_T is calculated from the particle soil density, and the aggregate weight and V_i , the last one estimated from the weight of the ethanol-saturated aggregate. The method was validated by comparing the V_T estimated with AM with the corresponding value estimated by the photogrammetry technique (PHM), on 36 aggregates of 8-16 mm size collected from conventional tillage (CT), reduced tillage (RT) and no tillage (NT). Results show a good relationship between V_T measured with PHM and with AM ($y = 0.94x + 0.01$, $R^2 = 0.99$). The ϕ values were significantly higher in soil aggregates under NT and RT than those under CT.

1.- Introducción

Una adecuada estructura del suelo es un requisito esencial para un uso sostenible del mismo, ya que de ello depende la mayoría de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en su interior (Horn *et al.*, 1994; Nunan *et al.*, 2006). En suelos con una cierta cantidad de arcilla (>15%), las partículas minerales tienden a formar unidades estructuradas denominadas agregados. De las propiedades de estos agregados depende la emergencia de plántulas y el crecimiento radical, la transferencia de agua y gas, la protección y dinámica de la materia orgánica y la susceptibilidad del suelo a la erosión (Horn *et al.*, 1994; Blanco-Moure *et al.*, 2012). La estructura del agregado puede caracterizarse a partir su tamaño, configuración

externa o distribución de poros. De entre estas posibilidades, la información concerniente a la porosidad interna es la que resulta más útil a la hora de caracterizar el suelo como medio para el crecimiento de las plantas (Danielson y Sutherland, 1986).

La porosidad total de una muestra de suelo (ϕ), se define como el cociente entre el volumen del espacio poroso (V_i) y el volumen total de la muestra (V_T). Actualmente, hay tres métodos principales para estimar la porosidad de una muestra de suelo: usando la relación entre ésta y las densidades real y aparente del suelo; por diferencia de peso de la muestra de suelo completamente saturada de agua y completamente seca; y midiendo la densidad de la muestra evaluando el volumen con un picnómetro de gas (Danielson y Sutherland, 1986). La estimación de la porosidad del suelo a partir de las densidades necesita conocer la densidad de partículas del suelo, cuyo valor es aproximadamente $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ (Blake y Hartge, 1986). El método gravimétrico, que calcula la porosidad a partir del volumen de agua que ocupan los poros, resulta útil si no se dispone de datos de densidad de partículas. Sin embargo, este método no puede aplicarse a agregados de suelo sin desplazar el aire ocluido en los poros pues puede causar la explosión, (*slaking*) de aquellos tras la inmersión en agua. Finalmente, el método de medida del volumen con el picnómetro de gas puede dar errores si las muestras están total o parcialmente húmedas (Flint y Flint, 2002). De forma alternativa, ϕ puede ser estimado por microtomografía de rayos X (micro-CT) en combinación con técnicas de procesamiento de imágenes. Sin embargo, esta técnica no destructiva que permite cuantificar la porosidad total y la distribución del tamaño de los poros (Hainsworth y Aylmore, 1983), es demasiado costosa por el equipo de medida requerido.

El objetivo de este trabajo es presentar un método sencillo (AM) para estimar la porosidad de un agregado individual calculada como el cociente entre los volúmenes de poros, V_i , y total del mismo, V_T . El valor V_i se mide a partir del volumen de alcohol que satura el espacio poroso, y el del volumen total sumando V_i y el volumen de partículas de suelo, V_r , estimado este último a partir de la densidad real de partículas. Para validar este método, el V_T de un agregado medido con AM se comparó con el correspondiente volumen medido con la técnica de fotogrametría. Para ello, se emplearon 18 agregados de 8-16 mm de diámetro procedentes de un suelo bajo tres sistemas de laboreo diferentes (tradicional, reducido y no laboreo). Finalmente se utilizó el método AM para estudiar el efecto de los tres tratamientos de laboreo sobre ϕ .

2.- Material y métodos

2.1.- Teoría

La porosidad se expresa como

$$\phi = \frac{V_i}{V_T} \quad (1)$$

con V_i como volumen del espacio poroso y V_T como el volumen total,

$$V_T = V_i + V_r \quad (2)$$

en donde V_r es el volumen de las partículas sólidas

$$V_r = \frac{M}{\rho_r} \quad (3)$$

siendo M la masa del agregado seco y ρ_r la densidad de éstas.

2.2.- Descripción del método

La técnica AM requiere los siguientes pasos. El agregado seleccionado se seca a temperatura ambiente durante varias semanas, se pesa y se sumerge en alcohol durante 20 minutos. La baja tensión superficial del alcohol impide la desintegración del agregado por explosión a medida que el líquido va ocupando los poros internos del agregado (Le Bissonnais, 1996). El burbujeo observado en la superficie del agregado sumergido en alcohol indica que el aire atrapado está siendo liberado. Una vez saturado, el agregado se coloca sobre una toalla de papel saturada en alcohol y se pesa inmediatamente a temperatura ambiente (≈ 20 °C). Este proceso se realiza en menos de 10 segundos. El volumen interno del agregado, V_i , se calcula convirtiendo la diferencia de masas del agregado saturado de alcohol, M_{ag-al} y del agregado seco en volumen usando la densidad del alcohol, ρ_{al} ,

$$V_i = \frac{M_{ag-al} - M_{ag}}{\rho_{al}} \quad (4)$$

El agregado saturado en alcohol se seca a 40 °C durante 8 horas y se pesa de nuevo para comprobar si se han producido pérdidas de suelo durante el proceso. Conocido V_i , V_T se estima según Ec. (2). El valor de ρ_r se determina por el método picnómetro (Flint y Flint, 2002) a partir de submuestras de diez gramos de agregados triturados. Una vez estimada V_T , ϕ se calcula según Ec. (1).

2.2.- Validación del método

Los agregados utilizados para validar el método procedían de un campo experimental de laboreo de larga duración ubicado en la Estación Experimental de Aula Dei (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), en Zaragoza. Se compararon tres tratamientos de laboreo bajo la rotación tradicional de cereal-barbecho: laboreo tradicional con arado de vertedera (CT), laboreo reducido con *chisel* (RT) y no laboreo (NT). Las parcelas estaban dispuestas según un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones

por tratamiento de laboreo (López y Arrúe, 1995). El suelo es de clase textural franca (29% arena, 46% limo y 23% arcilla.), alcalino (pH = 8,4) y con bajo contenido de carbono orgánico ($OC \approx 10$ g kg⁻¹ a 0-40 cm de profundidad) (Blanco-Moure *et al.*, 2012). Las muestras se tomaron en los primeros 5 cm de suelo. Una vez en laboratorio, las muestras de suelo se secaron al aire a temperatura ambiente (≈ 20 °C) y se tamizaron para obtener agregados de 8-16 mm de diámetro. Se tomaron también dos submuestras de suelo de diez gramos para la posterior medida de ρ_r . (7)

Para validar la técnica AM, se comparó el V_T estimado con la Ec. (2) con el correspondiente volumen medido con la técnica de fotogrametría (PHM) (Stewart *et al.*, 2012). Para tal fin, se utilizaron 18 agregados de suelo (seis por tratamiento de laboreo). En el análisis PHM, cada agregado se colocó en un soporte rotativo y fue fotografiado con una cámara Nikon D80 de seis megapíxeles y un objetivo de 105-mm (Micro Nikkor 105 mm1: 2.8 G). Se tomaron un total de 40 imágenes por rotación. La reconstrucción 3D del agregado se realizó utilizando los programas Agisoft PhotoScan y MeshLab, y el V_T se calculó mediante un programa de cálculo numérico (Moret-Fernández *et al.*, 2015). A fin de comprobar la posible influencia del alcohol sobre el volumen total, el método PHM se aplicó dos veces sobre el mismo agregado, antes y después de ser sumergido en alcohol. La comparación entre los valores de V_T y ϕ estimados con AM y PHM se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño aleatorio.

El método AM se utilizó finalmente para estudiar el efecto del sistema de laboreo sobre la porosidad. Para ello, se emplearon 36 agregados de 8-16 mm de diámetro procedentes de los tres sistemas de laboreo (doce agregados por tratamiento). La comparación de medias se efectuó mediante un análisis de varianza (ANOVA) para un diseño de bloques al azar.

3.- Resultados y discusión

La consistente relación entre el peso del agregado ($y = 0.98x$, $R^2 = 0.99$, $p < 0.0001$) y el volumen medido con PHM ($y = 0.97x$, $R^2 = 0.97$, $p < 0.0001$) antes y después de sumergir el agregado en alcohol indica que las pérdidas de suelo durante las medidas fueron despreciables y que el alcohol no tuvo un efecto significativo sobre el volumen de los agregados. Estos últimos resultados coinciden con los obtenidos por Le Bissonnais (1996), quien observó que la baja tensión superficial del alcohol impide la desintegración del agregado cuando éste está sumergido en alcohol. Aunque se obtuvo una muy buena relación entre el V_T medido con PHM y el estimado con AM (Fig. 1), los valores provenientes de AM fueron ligeramente inferiores: 0,72 y 0,70 cm³ para PHM y AM, respectivamente, lo que significa un error de 2,85%. Estas diferencias pueden deberse a la evaporación del alcohol durante los primeros 10 segundos en los que el agregado

saturado en alcohol se coloca en la balanza. Estas pérdidas hacen que disminuya el valor de V_i y, en consecuencia y según la Ec. (2), se reduzca el valor de V_T .

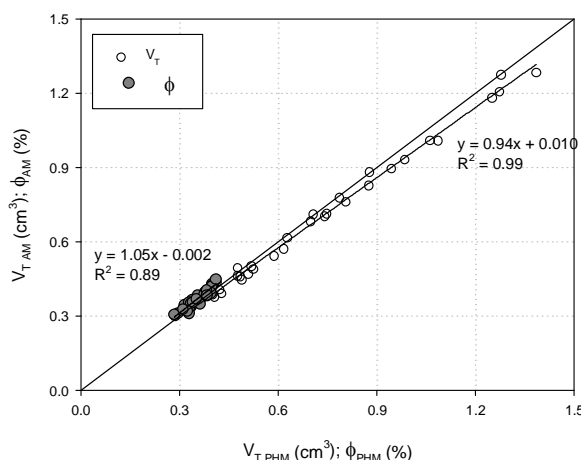


Fig. 1. Relación entre el volumen total (V_T) y la porosidad total (ϕ) medidos con los métodos de PHM y AM.

Las porosidades de los agregados medidas con el método AM oscilaron entre 0,30 y 0,45 (Fig. 2). Estos valores son comparables a los estimados por Park y Smucker (2005) para agregados de 2-9,5 mm de diámetro bajo NT, y por Wertz *et al.* (2008) para agregados de 2-4 mm procedentes de un suelo agrícola (porosidad media 0,33). De forma similar, Nunan *et al.* (2006) calcularon porosidades promedio del 0,29-0,35 para agregados de 1-3 mm procedentes de suelos de pasto. Lipiec *et al.* (2012) también estimaron una ϕ del mismo orden de magnitud (0,31-0,38). En cuanto a los efectos del laboreo sobre la porosidad de los agregados, el método AM demostró ser suficientemente sensible para detectar diferencias significativas entre CT y los tratamientos de laboreo de conservación, RT y NT (Fig. 2). En general, los valores de porosidad aumentaron al disminuir la intensidad de la alteración del suelo (CT<RT<NT). Estos resultados coinciden con los valores de resistencia a la rotura de agregados por compresión (*tensile strength*, TS) obtenidos por Blanco-Moure *et al.* (2012) sobre muestras de suelo procedentes de las mismas parcelas experimentales. Según este estudio, los valores más bajos de TS correspondían a los suelos de NT y se explican por una mayor bioporosidad (fauna y canales de raíces), consecuencia de una mayor actividad biológica promovida por la mínima alteración del suelo bajo NT. Por el contrario, en CT, la labor rompe la continuidad de los poros, causando una rápida consolidación del agregado post-laboreo y un incremento de TS (Blanco-Moure *et al.*, 2012)

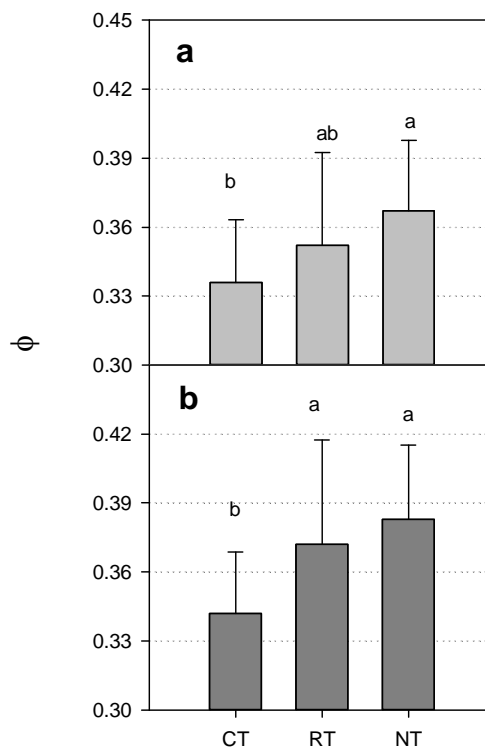


Fig. 2. Porosidad total (ϕ) de agregados de suelo (8-16 mm de diámetro) medida con los métodos (a) PHM y (b) AM. CT, laboreo convencional (CT), laboreo reducido (RT) y no laboreo (NT).

4.- Conclusiones

Este artículo presenta un método sencillo (AM) para estimar la porosidad total (ϕ) de agregados individuales del suelo. El valor de V_T se obtiene a partir de una ecuación que relaciona la densidad de la partícula, la masa y el V_i del agregado del suelo, este último estimado a partir del peso cuando está saturado de alcohol. El V_T estimado con AM en agregados individuales se comparó con el correspondiente volumen medido con la técnica fotogramétrica (PHM). Los resultados mostraron que el método AM era preciso y suficientemente sensible para detectar diferencias significativas entre las porosidades de agregados de 8-16 mm de diámetro procedentes de un suelo bajo tres diferentes sistemas de laboreo. Estos resultados muestran que AM puede ser una alternativa prometedora, precisa, simple y barata para estimar la porosidad total de un agregado. Sin embargo, deben tomarse ciertas precauciones a la hora de utilizar este método ya que la evaporación del alcohol durante los primeros 10 segundos antes de que el agregado saturado en alcohol sea pesado, puede dar lugar a una subestimación de V_T . Este problema puede ser minimizado pesando el agregado en cámaras isotérmicas a baja temperatura.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España (AGL2010-22050-C03-02). Agradecer también la colaboración técnica de M. Josefa Salvador y Ricardo Gracia.

7.- Bibliografía

- Blanco-Moure, N., L.A. Angurel, D. Moret-Fernández, y M.V. López, 2012. Tensile strength and organic carbon of soil aggregates under long-term no tillage in semiarid Aragon (NE Spain). *Geoderma* 189-190, 423-430.
- Blake, G.R., y K.H. Hartge, 1986. Particle density, en *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9* (2nd ed.), pp. 377-382.
- Danielson, R.E., y P.L.M. Sutherland, 1986. Porosity, en *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph n. 9* (2nd ed.), pp. 443-461.
- Flint, L.E., y A.L. Flint, 2002. Porosity, en *Methods of Soil Analysis. Part 4*. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. pp. 241-255.
- Hainsworth, J.M., y L.A.G. Aylmore, 1983. The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Aust. J. Soil Res.* 21, 435-443.
- Horn, R., H. Taubner, M. Wuttke, y T. Baumgartl, 1994. Soil physical properties related to soil structure. *Soil Till. Res.* 30, 187-216.
- Le Bissonnais, Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *Eur. J. Soil Sci.* 47, 425-437.
- Lipiec, J., M. Hajnos, y R. Swieboda, 2012. Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma* 179-180, 20-27.
- López, M.V., y J.L. Arrúe, 1995. Efficiency of an incomplete block design based on geostatistics for tillage experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J* 59, 1104-1111.
- Moret-Fernández, D., B. Latorre, C. Peña, C. González-Cebollada, y M.V. López, M.V. 2015. Applicability of the photogrammetry technique to determine the volume and the bulk density of small soil aggregates. *Soil Res.* (en prensa)
- Nunan, N., K. Ritz, M. Rivers, D.S. Feeney, y I.M. Young, 2006. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography. *Geoderma* 133, 398-407.
- Park, E.J., y A.J.M Smucker, 2005. Saturated hydraulic conductivity and porosity within macroaggregates modified by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J* 69, 38-45.
- Stewart, R.D., M.R.A Najm, D. Rupp, y J.S Selker, 2011. An image-based method for determining bulk density and the soil shrinkage curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 1217-1221.
- Wertz, S., S. Czarnes, F. Bartoli, P. Renault, C. Commeaux, N. Guillaumaud, y A. Clays-Josserand, A., 2008. Early-stage bacterial colonization between a sterilized remoulded soil clod and natural soil aggregates of the same soil. *Soil Biol. Bioch.* 39, 3127-3137.