

ARTÍCULO ORIGINAL

Parámetros fractales de la fragmentación de un suelo bajo condiciones de límite de retracción

Fractals parameters of the fragmentation of a soil under retraction limit conditions

Juan Mato Tamayo¹, Luís Raúl Parra Serrano¹, Hugo Berto Vázquez Milanés², Alfonso Ortiz Rodríguez²

RESUMEN. Los trabajos de fragmentación fractal para el estudio de suelos reportados en la bibliografía internacional se basan en la fragmentación de iniciadores secados al aire o pretratados y secados al aire luego de haber sido extraídos del campo. En el presente trabajo se aborda el problema de obtener los parámetros fractales de la fragmentación de un suelo en condiciones de Límite de Retracción, para ello fueron extraídos iniciadores inalterados de un Fluvisol en la capa 0 - 10 cm. en 16 puntos diferentes para cada tratamiento, luego de haber aplicado 4 tecnologías de preparación de suelo diferentes, bajo un diseño experimental completamente aleatorizado, en el laboratorio la mitad fueron tratados con agua para regadío hasta obtener la humedad correspondiente al Límite de Retracción y luego sometidos al proceso de fragmentación, la otra parte se dejó secar al aire durante tres semanas. Los parámetros fractales obtenidos fueron comparados con sus semejantes para el mismo suelo, horizonte, puntos de muestreo y tecnologías de preparación; pero fragmentados luego del proceso de secado al aire. Los resultados obtenidos indican la conveniencia de realizar la fragmentación en condiciones de Límite de Retracción, sobre todo si se trata del estudio de diferentes tecnologías de preparación del suelo.

Palabras clave: iniciador, parámetros de escala, Geometría Fractal.

ABSTRACT. Previous works on fractal fragmentation are based on the fragmentation of air dried or pretreated initiators after field data collection. In the present work it is analysed the problem of deriving fractal fragmentation parameters from soils under Retraction Limit. Undisturbed soil samples were collected from a Fluvisol at the 0 - 10 cm soil layer and 16 sampling points per soil treatment. Four different soil technologies were used and a random experimental design was performed. Half of the soil samples were treated with irrigation water after retraction limit was reached. After that, they were fragmented. The other soil samples half were air dried during three weeks. The estimated fractal indicators were compared with their air dried counterparts for the same soil, horizon, sampling points and soil tillage technology. The results indicate the usefulness of performing the fragmentation process under Retraction Limit conditions even if different soil technologies are evaluated.

Keywords: initiator, parameters of scale, Fractal Geometry.

INTRODUCCIÓN

Los modelos basados en la Geometría Fractal, según Mandelbrot (1982), de los medios naturales se han convertido en una herramienta teórica y práctica muy importante en las investigaciones en la Ciencia del Suelo porque aportan parámetros de escala que permiten la integración de las propiedades y procesos que ocurren en los suelos en un marco único y brindan mucha información sobre el ambiente geométrico donde ocurre

la interacción semilla – suelo; suelo–raíz. Los parámetros fractales revelan información sobre la fragmentación, agregación, retención de agua y transporte de solutos en los suelos, de aquí el carácter de universalidad que adquieren tales parámetros y el marcado interés en el uso de los mismos, además de la relevancia agronómica de los procesos antes mencionados y que son perfectamente descritos por medio de parámetros fractales. Los estudios realizados involucran tanto parámetros de fragmenta-

Recibido 14/10/11, aprobado 28/01/13, trabajo 22/13, artículo original.

¹ Dr.C., Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Agrícola, Carretera de Bayamo a Manzanillo, km 17½, Bayamo, Granma, Cuba, CP 85 100, E-✉: jmatost@udg.co.cu

² M.Sc., Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento de Ingeniería Agrícola, Bayamo, Granma, Cuba

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

ción como son los de: Rieu & Sposito (1991a); Rieu & Sposito (1991b); Giménez (1998); Perfect *et al.* (1993); Perrier & Bird (2002); Filgueira *et al.* (1997); Millán & Posada (2002), así como los de agregación realizados por: Perfect, (1991); Perfect, (1997) y Rieu & Perrier (1998). Los procesos de agregación y fragmentación en un suelo recién labrado se complementan, pero se considera predominante la fragmentación (Giménez, 1998). Esto es así siempre que la labranza se realice en condiciones apropiadas de humedad; se conoce que los aperos de labranza provocan la unión de los agregados si ésta se realiza con el suelo muy húmedo. Si los parámetros fractales de la fragmentación de un suelo se obtienen con iniciadores cuya humedad corresponde al Límite de Retracción, entonces tales parámetros serán más representativos del estado estructural del suelo. El Límite de Retracción es definido por Sánchez-Girón (1996) como el mayor contenido de humedad por debajo del cual toda pérdida de humedad no supone una disminución del volumen del suelo. Este estado es el ideal para labrar el suelo porque la resistencia entre los agregados (resistencia que presentan los agregados a deslizar unos sobre otros, pero sin que apenas se rompan o fragmenten), es menor a la de los agregados (resistencia de los agregados a romperse por sus planos de ruptura, y depende de la cohesión molecular y de las uniones que establece la materia orgánica) y por lo tanto se consigue reordenarlos sin llegar a romperlos y no se corre riesgo de dañar la estructura del suelo. No menos importante resulta el hecho de que labrar en estas condiciones representa consumir una menor energía. El objetivo de este trabajo fue obtener los parámetros fractales de la fragmentación de un suelo bajo condiciones de Límite de Retracción para compararlos con parámetros obtenidos en muestras de suelo secadas al aire.

MÉTODOS

Generalidades

Las muestras de suelo fueron obtenidas en un área propiedad de la UBPC “El Palmar”, correspondiente a la Empresa de Cultivos Varios “Paquito Rosales”, del municipio Yara, Provincia de Granma, en un *Fluvisol* franco arcilloso (Staff, 2003). El área experimental es ¼, resultado de dividir en cuatro partes iguales la circunferencia de radio 482 m que forma el sistema de riego de pivote central. Luego del laboreo, a cada tratamiento le corresponden 17 surcos, equivalentes a 0,72 ha.

Fueron extraídos pequeños iniciadores inalterados de 505± 0,45 g, utilizando un cuchillo fino y muy duro, en la capa de 0 a 10 cm, aleatoriamente en 8 puntos diferentes para cada tecnología, tratando de que las muestras fueran tomadas bajo una misma boquilla de la máquina de riego de pivote central y que tuvieran una forma aproximadamente cúbica. También se obtuvieron muestras alteradas utilizando cilindros de 4 cm de radio y 8 cm de longitud; según Sánchez-Girón (1996), los cilindros que guardan la relación 2:1 entre sus dimensiones, son los que menos alteran la muestra. Las muestras fueron tomadas luego de haber aplicado cada una de las tecnologías de preparación de suelo siguientes; cada una de ellas representa un tratamiento.

T1 (Tecnología Tradicional): rotura: Se realizó con el agregado formado por el tractor MTZ-80 y el arado ADI-3M, a una profundidad de 25 cm; primer pase de grada: Se realizó con el agregado formado por el tractor K-700 y la grada 7 000, a una profundidad de 12 cm; subsolado: Se llevó a cabo con el agregado formado por el tractor K-700 y el subsolador FAS-5, a una profundidad de 38 cm realizando dos pases de forma perpendicular; segundo pase de grada: Se realizó con el agregado formado por el tractor Valtra Valmet 1 180 DH y la grada aradora intermedia Baldan a una profundidad de 10 cm.

T2: rotura: Se efectuó con el agregado formado por el tractor Valtra Valmet 1180 DH y el multiarado MZ-170, a una profundidad promedio de 30 cm; pase de grada: Se realizó con el agregado formado por el tractor Valtra Valmet 1180 DH y la grada de peso medio Baldan, a una profundidad promedio de 10 cm.

T3: subsolado: Se realizó con el agregado formado por el tractor Valtra Valmet 1 180 DH y el subsolador ASTH 5/5, a una profundidad promedio de 25 cm; **fresado:** Se efectuó con el agregado formado por el tractor MTZ-80 y la fresadora Jaguar, a una profundidad promedio de 10 cm.

T4: primer pase de grada: Se realizó con el agregado formado por el tractor Valtra Valmet 1180 DH y la grada de peso medio Baldan, a una profundidad promedio de 8 cm; segundo pase de grada: Se realizó con el agregado formado por el tractor K-700 y la grada 4 500; **subsolado:** Se efectuó con el agregado formado por el tractor K-700 y el subsolador FAS-5, a una profundidad promedio de 35 cm realizando dos pases de forma perpendicular; tercer pase de grada: Se realizó con el agregado formado por el tractor Valtra Valmet 1180 DH y la grada de peso medio Baldan, a una profundidad promedio de 10 cm.

La Tabla 1 muestra los valores finales de humedad de los iniciadores justo antes de comenzar el proceso de fragmentación. El otro grupo de iniciadores fue tamizado luego de secados al aire por tres semanas.

TABLA 1. Humedad de los iniciadores justo antes de comenzar la fragmentación

Tecnología	H (g·kg ⁻¹)
T1	121 ^a
T2	122 ^a
T3	120 ^a
T4	120 ^a

* Diferentes letras minúsculas en la misma columna indicarían diferencias significativas para p< 0,05

La Figura 1 muestra la evolución en el tiempo de los valores medios de la humedad de los iniciadores a partir de un valor aproximadamente igual al Límite Líquido hasta alcanzar el Límite de Retracción del suelo.

Ya en el laboratorio, los iniciadores fueron separados (aleatoriamente) en dos grupos de 8 por cada tratamiento; los iniciadores de un grupo fueron humedecidos con agua de riego y llevados a la humedad correspondiente al Límite de Retracción, el cambio de la masa de cada iniciador fue registrado diariamente y la pérdida de humedad evaluada tomando como

referencia la última observación. El contenido de humedad diario fue calculado por la diferencia respecto de la inicial, para esto se asumió que la humedad inicial del iniciador fue aproximadamente igual a la determinada previamente por el método gravimétrico.

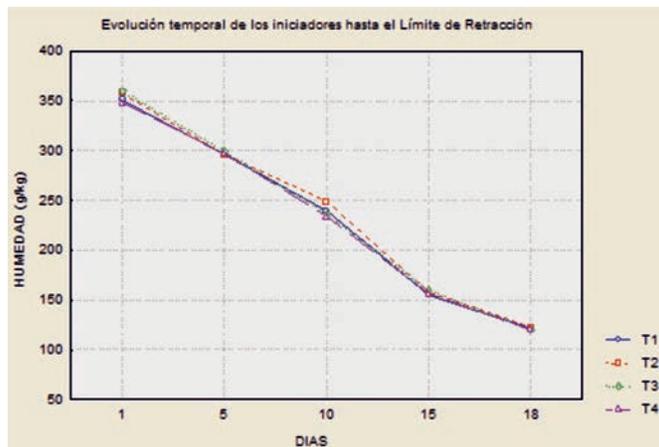


FIGURA 1. Evolución temporal de los iniciadores hasta el Límite de Retracción.

Descripción de la metodología fractal

El tamizado de todos los iniciadores, tanto de aquellos secados al aire como de los humedecidos se efectuó en una torre de tamices con las siguientes aberturas: 10–7; 7–5; 5–3; 3–2; 2–1; 1–0.5 y 0,5–0,25 mm; se utilizó un vibrador, registrando la masa de suelo retenida sobre cada malla. No existen criterios estandarizados con relación al tiempo requerido para fragmentar un iniciador fractal y obtener parámetros físicos de validez y representativos de la condición del suelo. Si bien se acepta que cada tipo de suelo requiere un tiempo diferente de tamizado según Díaz, *et al.* (2002a) y Díaz, (2000b), lo que predomina es considerar un solo tiempo. Al efecto, después de un tiempo de fragmentación de 10 min, los iniciadores húmedos produjeron una dimensión fractal de la fragmentación independiente del tiempo de fragmentación, indicativo del estado de fragmentación completa, mientras que para los secos al aire se logró para 35 min. Estos valores de tiempo fueron los utilizados en el presente estudio.

Una cantidad proporcional al número de agregados retenidos en cada tamiz, $N(d_i)$ se calculó por la siguiente ecuación (Rieu y Sposito 1991b):

$$N(d_i) = \frac{M(d_i)}{d_i^3 \cdot \sigma_i} \quad (i = 0, 1, \dots) \quad (1)$$

donde:

$M(d_i)$ - masa cada fracción retenida;

d_i - diámetro medio cada fracción retenida;

σ_i - densidad aparente de cada fracción retenida.

El subíndice cero corresponde a la fracción de mayor tamaño. La estimación de la dimensión fractal D se hizo a partir de la pendiente de la recta de regresión, en una representación de $\log N(d_k)$ versus $\log(d_k)$ de la ecuación (2), (Rieu y Sposito, 1991b)

$$N(d_k) = A(r) d_k^{-D} \quad (2)$$

donde:

$N(d_k)$ -número de agregados acumulados en las fracciones (comenzando desde la fracción más grande);

$A(r)$ -parámetro que depende del factor de similitud y es constante para cada suelo;

d_k -diámetro medio de la fracción correspondiente.

La determinación de la dimensión fractal D_r se hizo a partir de la pendiente de la recta de regresión de $\log \frac{\sigma_i}{\sigma_0}$ vs $\frac{d_i}{d_0}$

de la ecuación (3), (Rieu y Sposito, 1991b).

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_0} = \left(\frac{d_i}{d_0} \right)^{D_r - 3} \quad (3)$$

donde:

σ_i -densidad aparente de las distintas fracciones de agregados;

σ_0 -fracción de mayor diámetro;

d_i y d_0 - diámetros medios respectivos.

Los ajustes fueron realizados con The SigmaPlot version 11.5.1 software (SPSS Inc.) (2006). El límite de retracción se determinó según (Sánchez-Girón, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 muestra los parámetros fractales de la fragmentación obtenidos tanto para los iniciadores tamizados en seco como para aquellos que se tamizaron con una humedad correspondiente al Límite de Retracción. En el modelo de Rieu y Sposito (1991a), aparecen dos dimensiones fractales para el sistema suelo, basados en el grado de fragmentación del mismo: D_r la dimensión fractal de un suelo fragmentado en forma incompleta y D , la dimensión fractal de un suelo completamente fragmentado.

En el caso de la fragmentación incompleta hay puentes entre los agregados que los mantienen juntos. La dimensión fractal D_r está directamente relacionada con la porosidad del medio real. La fragmentación completa de un suelo, por otro lado, significa que éste ha sido transformado en una colección de agregados no conectados entre sí, así la dimensión fractal D lleva implícita la porosidad real del medio, más una porosidad adicional proveniente de la destrucción de los puentes.

La diferencia entre D_r y D indica el grado de fragmentación (Filgueira *et al.*, 1999). Cuando la diferencia es baja, la fragmentación es mayor (Rieu y Sposito, 1991b; Perfect, 1997).

TABLA 2. Parámetros fractales de la fragmentación del suelo obtenidos

	Tamizado en seco				Tamizado húmedo			
	D	Dr	Kf (10^2mm^{D_r})	Dr-D	D	Dr	Kf (10^2mm^{D_r})	Dr-D
T1	2,23 (1,11)	2,66 (0,93)*	5,7 (0,19)	0,43	2,29 (0,12)	2,77 (0,09)	1,82 (0,15)	0,48
T2	2,18 (1,21)	2,73 (1,03)	4,3 (0,15)	0,55	2,23 (0,22)	2,92 (1,02)	0,54 (0,22)	0,69
T3	2,21 (1,34)	2,69 (1,44)	4,8 (0,18)	0,48	2,33 (0,09)	2,80 (1,13)	0,66 (0,19)	0,53
T4	2,19 (1,17)	2,64 (1,08)	5,4 (0,11)	0,45	2,34 (0,11)	2,83 (0,09)	1,75 (0,17)	0,49

* Entre paréntesis la desviación estándar de la media.

En el trabajo de Filgueira *et al.* (1999), resultó que el mayor valor de $D_r - D = 0,651$ se obtuvo para un suelo con 20 años sin cultivar, y el menor valor de $D_r - D = 0,070$ fue para un suelo que durante algunos años se mantuvo bajo la secuencia de 1 año con arroz en condiciones de inundación y 2 años en barbecho. En este caso se observa claramente que el suelo que se mantuvo en barbecho conservó mejor su estructura. En el presente estudio la diferencia $D_r - D$ resultó ser mayor para la tecnología T2, tanto para los iniciadores secos al aire como para los húmedos, demostrativo de que es la tecnología que menos afecta la estructura original del suelo; pero nótese que tal diferencia es mayor para los iniciadores con humedad igual al Límite de Retracción, es decir, el laboreo de este suelo con una humedad de $120 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ permitirá la menor alteración posible de su estructura. La disminución del parámetro k_f , representativo

del número acumulativo de fragmentos mayores o iguales que una escala unitaria, es notable para T2 y T3 en comparación con las dos restantes; tal resultado extrapolado a condiciones de campo pudiera implicar una mejor eficiencia del laboreo en términos de la energía utilizada por la maquinaria agrícola para trabajar sobre el suelo.

CONCLUSIONES

- Los parámetros fractales de la fragmentación del suelo son más representativos del estado estructural del mismo si se obtienen en condiciones de Límite de Retracción.
- La fragmentación fractal de iniciadores humedecidos hasta el Límite de Retracción permite disminuir el tiempo de agitación mecánica y por tanto la energía a utilizar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DÍAZ-ZORITA, M., H. GROVE, & E. PERFECT: Sampling and sieving procedures for measuring soil dry aggregate size distributions. In: **15th International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) Conference**, Texas Agricultural Experiment Station, USA, 2000.
2. DÍAZ-ZORITA, M. & E. PERFECT: "Disruptive methods for assessing soil structure." *Soil & Tillage Res.* 64: 3–22, 2000.
3. FILGUEIRA, R. R., L. FOURNIER, O. SARLI, A. PIRO & A. ARAGÓN: "Aplicación de la matemática fractal a la fragmentación de un suelo", *Ciencia del Suelo*, (Argentina), 15:–36, 1997.
4. FILGUEIRA, R. R., L. FOURNIER, O. SARLI, A. ARAGÓN & J. RAWLS: "Sensitivity of fractal parameters of soil aggregates to different management practices in a Phaeozem in central Argentina". *Soil & Tillage Res.*, 52: 217–222, 1999.
5. GIMENEZ, D., R. ALLMARAS, R. HUGGINS & A. NATER: "Mass, surface, and fragmentation fractal dimensions of soil aggregates produced by tillage." *Geoderma*, 86: 261–278. 1998.
6. MANDELBROT, B. B.: *The Fractal Geometry of Nature*, (Edición española: La Geometría Fractal de la Naturaleza, Eds. Tusquets, Spain, 1982.
7. MILLÁN, H. & M. GONZÁLEZ-POSADA: "Fragmentation fractal dimensions of Vertisol samples: Influence of sieving time and soil pretreatment", *Geoderma*, 109: 75–83, 2002.
8. PERFECT, E.: On the relationship between mass and fragmentation fractal dimensions, In: **Proc. Int. Multidiscipl. Conf. 4th World Scientific Publ.**, pp. 349 – 357, River Edge, NJ, USA, 1997.
9. PERFECT, E. & D. KAY: "Fractal theory applied to soil aggregation", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1552–1558, 1991.
10. PERFECT, E., D. KAY & V. RASIAH: "Multifractal model for soil aggregate fragmentation." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 896–900, 1993.
11. PERRIER, E. & N. BIRD: "Modelling soil fragmentation: the pore– solid fractal approach", *Soil & Tillage Research*, 64: 91–99, 2002.
12. RIEU, M., & E. PERRIER: *Fractal models of fragmented and aggregated soils*, pp. 169–202, In P. Baveye, J.-Y. Parlange, & B. A. Stewart (Eds.). *Advances in Soil Science: Fractals in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, FL., USA, 1998.
13. RIEU, M. & G. SPOSITO: "Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1231–1238, 1991a.
14. RIEU, M. & G. SPOSITO: "Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: II. Applications", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1239–1244, 1991b.
15. SÁNCHEZ-GIRÓN, R. V.: *Dinámica y Mecánica de Suelos*, Ediciones Agrotécnicas, S.A., Madrid, España, 1996.
16. STAFF, S. S.: *Key to Soil Taxonomy*, (Ninth edition), USDA, USA, 2003.