

Influencia del contenido en materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo

Organic matter content influence on soil physical properties

FERNANDEZ RUEDA, M^a. J. y PAZ GONZALEZ, A.

Soil physical characteristics of agricultural soils with a range of texture and organic matter content, i. e., dry and wet pore space organisation, were investigated. In order to study the specific effect of organic matter for each soil, frequently both grassland and cultivated adjacent land were sampled. Because of the complexity of the soil particle structure, measurements were performed at the textural level on 2-3 mm aggregates. The compactness of grassland horizons was found to be lower than that of its cultivated counterparts. Mercury intrusion porosimetry showed that lacunar pores prevailed, whose volume increased as organic carbon content increased. The volume of clay-fabric pores was very small and did not appear to depend on the variation in organic matter content. Water content near saturation increased with increasing organic matter content and for potentials of about 1,500 kPa water retention curves tended to converge. Pore size distribution patterns as measured mercury intrusion porosimetry and derived from water retention characteristics were compared. The low shrinkage potential of moderately coarse and medium textured soils was also verified. A lack of potential for regeneration of good soil structure by fragmentation was deduced from the shrinkage curves.

Key words: soil aggregates, organic matter, pore space, Hg porosimetry, water retention, shrinkage.

FERNANDEZ RUEDA, M^a. J. y PAZ GONZALEZ, A. (Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. A Zapateira, 15.071. A Coruña).

INTRODUCCION

La organización de la fase sólida del suelo viene condicionada en gran parte por su composición; de ésta también dependen las características del espacio poroso, en el que se desarrollan procesos como el intercambio de iones y los fenómenos de transferencia de agua y calor. Aunque en la fase sólida ocurren numerosas reacciones físico-químicas, su composición se mantiene relativamente estable, si se considera a escala macroscópica y para procesos a corto plazo.

En los horizontes superficiales de los suelos agrícolas, la estructura natural está sometida a modificaciones súbitas inducidas por laboreo, lo que puede originar la reordenación, degradación y compactación de los elementos estructurales. El laboreo, a medio plazo, modifica el estatus orgánico del suelo, de donde se infiere la importancia del estudio de la evolución de la estabilidad de la estructura en función de la dedicación.

Desde el punto de vista morfológico se distinguen dos niveles de organización de la estructura, según la escala de observación adoptada: la microestructura, que se observa al microscopio, en lámina delgada, y la macroestructura, que se observa visualmente en el campo. El sistema poroso, cuya organización espacial resulta complementaria de la de la fase sólida, también se ha subdividido más o menos arbitrariamente en clases.

De la distinción entre macro y microestructura provienen los conceptos de *porosidad textural*, definida por el volumen relativo del espacio vacío entre los agregados y *porosidad estructural*, definida por el

espacio vacío interagregados. Se admite que la porosidad textural depende esencialmente de la composición del suelo y se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo. A escala estructural la organización de los suelos agrícolas varía en función del laboreo, la actividad biológica y el clima, por lo que el sistema poroso se considera más coyuntural.

Aunque el concepto de estructura se utilice universalmente, no existe una única definición de esta propiedad. STENGEL (1979, 1990) propuso relacionar dicho concepto con las técnicas analíticas utilizadas para su estudio, lo que da lugar a una definición operativa de la estructura. Los fundamentos en que se basan las técnicas de medida de la estructura se reducen a determinar uno de los dos componentes siguientes: disposición espacial de las partículas sólidas (o el espacio poroso complementario) que constituyen el suelo o naturaleza e intensidad de las uniones entre partículas. Otros autores han definido la estructura en base a criterios menos restrictivos. DEXTER (1988) considera que la estructura del suelo es el resultado de la heterogeneidad espacial y la variabilidad temporal de los componentes orgánicos y minerales del mismo. KAY (1990) postula que la estructura puede ser caracterizada en términos de *arquitectura* u organización espacial, *estabilidad* y *resiliencia* o capacidad de regeneración.

El término *arquitectura* se usa para describir la organización heterogénea de las partículas sólidas y los espacios porosos, y se refiere no sólo a la porosidad total sino también a la distribución del tamaño de poro y a la continuidad del sistema poroso.

La *estabilidad* de la estructura puede definirse como la capacidad del suelo para mantener la arquitectura de la fracción sólida y el espacio poroso. La persistencia de la estructura a una escala de tiempo como el período vegetativo de un cultivo se concibe según una doble vertiente: resistencia de los agregados a la acción del agua y deformación por acción de los esfuerzos mecánicos.

La *resiliencia* es la capacidad del suelo para recobrar su organización primitiva por procesos naturales de agregación, una vez que se reducen o anulan las fuerzas causantes de la degradación.

Se considera poco probable que exista una sola propiedad física que permita efectuar una caracterización de la estructura bajo todos los suelos, condiciones climáticas y tipos de cultivo. Sin embargo, se admite que en la mayor parte de los suelos de cultivo las propiedades más importantes que permiten describir y evaluar las características de la estructura son: el sistema poroso, la resistencia mecánica y la estabilidad al agua (LETEY, 1985; KAY, 1990).

La dinámica de la estructura está considerada como un proceso muy complejo, debido al número, la diversidad y la interdependencia de los factores que la condicionan. Dado que esta dinámica no se puede describir de un modo global, en muchos estudios se suelen analizar los mecanismos de los que depende. Los principales factores naturales que intervienen en la estabilidad al agua y la resistencia mecánica de las unidades estructurales del suelo son: la alternancia de ciclos de humectación-deseccación, hielo-deshielo y la acción de los organismos biológi-

cos. En síntesis, la organización del armazón tridimensional, o arquitectura del suelo, en un momento dado es el resultado del efecto neto de los diversos procesos que modifican la estructura del mismo a diferentes escalas y con distintas intensidades.

Con independencia del parámetro utilizado para caracterizar la estabilidad, las unidades estructurales de pequeñas dimensiones tienden a ser más resistentes y estables. Por contra, la estabilidad disminuye si aumenta el tamaño de estas unidades (CARTER, 1990; GUERIF, 1994).

En este trabajo se lleva a cabo una caracterización de la *porosidad textural* de suelos agrícolas a partir de determinaciones físicas complementarias, que comprenden el espacio poroso total, la distribución del tamaño de poro equivalente en seco y húmedo y las curvas de retracción. Los suelos estudiados presentan un amplio rango de contenidos en materia orgánica, lo que permite analizar la influencia de este factor sobre diversos entornos de tamaño de poro.

MATERIAL Y METODOS

Los suelos estudiados se seleccionaron atendiendo a su susceptibilidad a la degradación física y a su dedicación agrícola. La mayor parte de las muestras se pueden considerar representativas de dos de las principales comarcas agrícolas de la Comunidad Autónoma de Galicia, como son Terra Cha (Lugo) y la zona del Complejo de Ordenes (La Coruña); además, se estudió un suelo desarrollado sobre calizas de la comarca de Mondoñedo (Lugo) y otro sobre sedi-

mentos de la comarca de Celanova (Orense). Se analizaron 22 horizontes, de ellos 19 superficiales y 3 subsuperficiales.

Se llevaron a cabo en la tierra fina, tamizada a 2mm, análisis químicos generales, determinaciones granulométricas (siguiendo los métodos descritos en GUITIAN y CARBALLAS, 1976) y medidas de densidad real. Las determinaciones físicas más importantes, como intrusión de Hg, curvas características de humedad y curvas de retracción se efectuaron en agregados de 2-3 mm.

Análisis de las propiedades físicas

La densidad real se determinó por picnometría; en cada muestra se efectuó la medida por triplicado. La densidad aparente se determinó en alícuotas de aproximadamente 3g constituidas por agregados de 2-3 mm. La muestra se satura con queroseno, determinándose el volumen por desplazamiento en el seno del mismo líquido, de acuerdo con el principio de Arquímedes (MONNIER *et al.*, 1973; FIÈS & STENGEL, 1981).

Para expresar el volumen de los poros a partir de la densidad aparente (d_a) y la densidad real (d_r) se utilizaron dos variables, porosidad (n), y el índice de poros (e), calculadas mediante las expresiones siguientes:

$$n = \frac{1 - d_a}{d_r} \quad (1)$$

$$e = \frac{d_a}{d_r} - 1 \quad (2)$$

Las curvas características de humedad se determinaron en fase de desecación.

Previamente, los agregados se saturaron a vacío parcial (-70 kPa), utilizando un aparato de Richards modificado (De LEÓN 1990). Después de saturación, las muestras de suelo se equilibran durante 48 horas a los siguientes potenciales: -5, -10, -50, -100, -300, -1000 y -1500 kPa.

La determinación de la relación humedad ponderal-volumen específico se efectuó en fase de desecación. La preparación de la muestra se inicia saturando aproximadamente 100 g de agregados naturales de 2-3 mm; estos agregados se disponen formando una monocapa que se somete a vacío parcial (-70 kPa) y se lleva a condiciones próximas a saturación, por aplicación de una succión de -3 cm (-0,3 kPa) durante 48 horas. A continuación, se efectúa una desecación en condiciones controladas bajo la acción de gel de sílice; a intervalos regulares (aproximadamente cada 1/2 hora) se toman alícuotas de 2 g con contenidos hídricos decrecientes; estas alícuotas se embeben inmediatamente en queroseno. Por tanto, para evaluar la densidad aparente, el volumen se mide por desplazamiento en queroseno - ya descrito - y la masa por desecación en estufa a 105° C. Los resultados se expresaron representando el contenido hídrico en su expresión gravimétrica frente al volumen específico (Mc GARRY & MALAFANT, 1987).

Las curvas de contracción se utilizan para calcular un índice de estabilidad estructural del suelo, definido por STENGEL *et al.* (1984), denominado capacidad de contracción potencial (S_p). El valor de S_p se deduce a partir del índice de poros

de los agregados saturados (-0,3 kPa), e_{\max} , y secos, e_s , según la expresión:

$$S_p = e_{\max} - e_s \quad (3)$$

Se admite que el valor de S_p , medido en laboratorio, es un valor potencial o máximo ya que los agregados se saturaron dispuestos en monocapa. En condiciones naturales, en general, el empaquetamiento es más denso que el que corresponde a una monocapa.

La distribución del tamaño de poro se determinó con la técnica de intrusión de Hg. La medida se llevó a cabo en alícuotas de 1,7-2 g formados por agregados de 2-3 mm. Se utilizó un porosímetro modelo Micromeritics 9310 con dos unidades, una para macroporos y otra para microporos, que permite operar desde 3×10^{-3} hasta 200 mPa (FIÈS & BRUAND, 1990). Asumiendo que los poros son cilíndricos, el diámetro equivalente medio, d , se calcula a partir de la presión, P , ejercida para forzar la entrada de Hg, la tensión superficial, s , y el ángulo de contacto, Q , según:

$$d = -\frac{4s \cos Q}{P} \quad (4)$$

Con este dispositivo se miden diámetros equivalentes entre 415 μm y 60 nm; para efectuar los cálculos se empleó un valor medio de $Q = 130^\circ$, y $s = 0,484 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

COMPOSICION DE LAS MUESTRAS

En la tabla 1 se presenta información general acerca de los 22 horizontes seleccionados. El material original sobre el que se desarrollan los suelos estudiados son

sedimentos cuaternarios y terciarios, esquistos pelíticos, gabro y caliza. En general, la toma de muestra se realizó en parcelas vecinas con distinta dedicación, cultivo y prado temporal o permanente, pretendiendo, con ello, obtener muestras de textura similar y diferentes contenidos en materia orgánica (FERNANDEZ RUEDA, 1997).

Los datos generales (pH en H_2O y KCl, materia orgánica y textura) se consignan en la tabla 2. La textura de 18 de las muestras estudiadas oscila de moderadamente gruesa a media (franco-arenosa, franca, franco-limosa y franco-arcilloso-arenosa), según los criterios USDA (1975); este conjunto se caracteriza por un contenido en limo más elevado que el de la media de los suelos de Galicia, mientras que la cantidad de arcilla es poco importante y similar a la de otros suelos de la Comunidad Autónoma, de texturas más ligeras. Las 4 muestras restantes presentan textura fina; se trata de horizontes arcillosos de Terra Cha (Lugo).

Los horizontes superficiales seleccionados presentan una amplia gama de contenidos en materia orgánica, que oscilan entre 2,03% y 13%. Si se tienen en cuenta los horizontes subsuperficiales la oscilación entre los máximos y los mínimos es todavía más amplia. Por ello, se presta particular atención al estudio de la influencia de la materia orgánica sobre la organización del espacio poroso.

Al planificar el muestreo en parcelas adyacentes, se esperaba que los suelos de prado presentasen contenidos en materia orgánica más elevados que los de cultivo de la misma localidad. Este resultado se obtiene para localidades con pradera

TABLA 1. Información general sobre los suelos estudiados.

Nº	Localidad y símbolo	Material original	Uso del suelo
1	SIP - Sigüeiro	Esquisto pelítico	Prado permanente
2	SIC - Sigüeiro	Esquisto pelítico	Cultivo
3	MAP - Mabegondo	Esquisto pelítico	Prado permanente
4	MAC - Mabegondo	Esquisto pelítico	Cultivo
5	LSP - La Silva	Gabro	Prado temporal
6	LSC - La Silva	Gabro	Cultivo
7	MOP - Monforte	Sedimento arcilloso	Prado temporal
8	MOC - Monforte	Sedimento arcilloso	Cultivo
9	BOP - Bonxe	Sedimento arcilloso	Cultivo
10	BOC - Bonxe	Sedimento arcilloso	Cultivo
11	CAP - Castro	Sedimento	Cultivo
12	CAC - Castro	Sedimento	Cultivo
13	RAP - Raigoso	Sedimento arcilloso	Prado permanente
14	RAC - Raigoso	Sedimento arcilloso	Cultivo
15	BAP - Barreiro	Caliza	Prado temporal
16	BAC - Barreiro	Caliza	Cultivo
17	COP - Croa	Sedimento arcilloso	Prado temporal
18	COC - Croa	Sedimento arcilloso	Prado temporal
19	TUP - Tumbo	Sedimento arcilloso	Prado permanente
20	CAT - Castro	Sedimento	H. subsuperf. (2Btg)
21	COB - Croa	Sedimento arcilloso	H. subsuperf. (Bg)
22	ARB - Arneiro	Sedimento arcilloso	H. subsuperf. (Bg)

semipermanente, como se aprecia al comparar las muestras 9 y 10. Sin embargo, si pradera y cultivo alternan en la rotación no se puede generalizar lo anterior, de modo que el contenido en materia orgánica de parcelas contiguas puede ser mayor en el suelo de prado que en el de cultivo (muestras 7/8 y 11/12), del mismo orden (muestras 1/2 y 14/15) e incluso inferior (muestras 5/6 y 17/18).

Por otra parte en algunas localidades, aunque las muestras se tomaron en parcelas contiguas y de topografía similar (3/4

y 13/14) no se obtuvo una textura homogénea, siendo las diferencias de arcilla entre parcelas vecinas importantes, del orden de un 4%; estas diferencias no cabe atribuir las a imprecisiones del método de medida, sino que serían el resultado de la variabilidad espacial de la textura entre parcelas.

RESULTADOS Y DISCUSION

Al calcular, en primer lugar, la porosidad total a partir de los datos de densidad

TABLA 2. Composición de los horizontes estudiados ((1) = pH en H₂O; (2) = pH en KCl; C = carbono; M. O. = materia orgánica; A G = arena gruesa; A F = arena fina; L G = limo grueso; L F = limo fino; T = Textura).

N°	pH (1)	pH (2)	C (%)	M. O (%)	A G (%)	A F (%)	L G (%)	L F (%)	P (%)	T
1 SIP	5,1	4,1	2,24	3,85	25,9	28,3	10,7	20,2	14,9	fa
2 SIC	4,9	4,0	2,83	4,87	27,3	30,7	11,7	15,9	14,4	fa
3 MAP	5,0	4,2	4,39	7,55	3,1	8,0	10,7	57,4	20,8	fl
4 MAC	5,1	4,2	2,02	3,47	9,2	14,3	18,4	41,7	16,4	fl
5 LSP	5,1	4,6	5,96	10,2	24,8	15,4	13,4	34,0	12,4	f
6 LSC	4,9	4,6	7,58	13,0	26,6	14,9	13,5	31,3	13,7	f
7 MOP	5,6	4,3	1,48	2,25	14,0	25,8	20,2	27,0	13,1	f
8 MOC	7,5	6,7	1,18	2,03	12,5	23,1	21,4	29,1	18,0	f
9 BOP	5,2	4,3	3,78	6,50	21,3	28,2	13,5	19,0	18,1	f
10 BOC	5,1	4,2	2,79	4,80	21,4	28,6	12,7	19,2	16,5	f
11 CAP	5,4	4,5	7,14	12,2	34,3	22,5	10,3	16,4	16,5	fa
12 CAC	5,6	4,9	3,80	6,50	34,3	26,9	11,9	13,7	13,2	fa
13 RAP	4,0	3,5	4,63	7,96	4,0	8,5	17,2	49,3	21,0	fl
14 RAC	4,3	3,5	3,55	6,11	10,3	10,1	20,4	42,1	17,1	fl
15 BAP	7,4	7,2	1,99	3,42	27,1	20,6	18,2	25,0	9,1	f
16 BAC	7,2	6,5	1,70	2,92	22,9	22,6	19,0	26,8	8,7	f
17 COP	5,0	4,7	1,95	3,35	5,6	7,1	5,4	16,5	65,4	p
18 COC	4,4	4,3	2,16	3,72	4,9	4,8	5,7	17,8	66,8	p
19 TUP	5,3	4,7	3,22	5,54	15,9	23,4	13,3	22,4	25,0	f
20 CAT	4,9	3,7	0,42	0,81	13,6	13,2	6,1	26,3	40,8	p
21 COB	8,4	7,4	0,10	0,17	6,3	8,6	11,8	22,0	51,3	p
22 ARB	5,3	4,3	0,39	0,67	26,1	11,3	6,9	15,9	39,8	fp

real y densidad aparente, se pudo apreciar ya la relación entre dedicación del suelo y compacidad del mismo. En efecto, como se aprecia en la figura 1, en general, en las parcelas de cultivo la porosidad total fue siempre inferior a la de las parcelas adyacentes, dedicadas a prado. La excepción a esta regla la constituyen las muestras 11/12, desarrolladas sobre sedimentos terciarios extraordinariamente arcillosos.

En la mayor parte de los pares de muestras vecinas, este resultado se puede

atribuir a la modificación del estatus orgánico que induce el laboreo del suelo, de modo que se aprecia un buen paralelismo entre la reducción del contenido en materia orgánica de las parcelas dedicadas a cultivo y la disminución de la porosidad total. Así, por ejemplo, en el par de muestras 9/10, las diferencias tanto de carbono total como de porosidad entre dedicaciones son relativamente amplias; por el contrario, en el par 7/8 estas dos variables

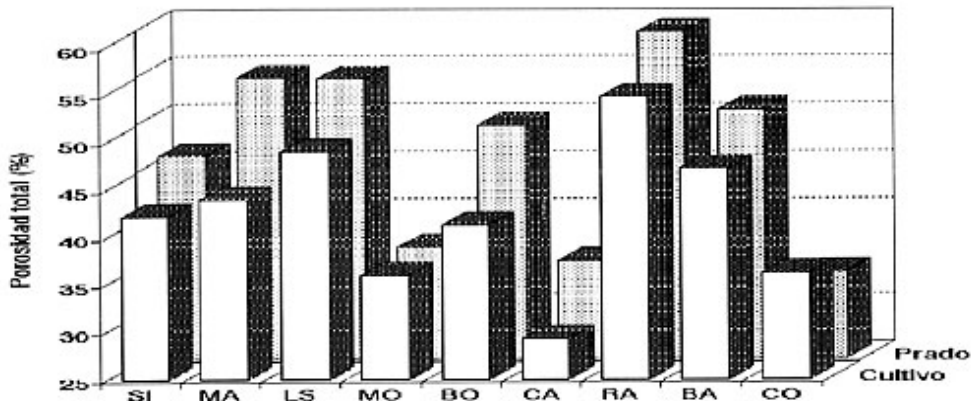


Fig. 1. Porosidad total en parcelas adyacentes dedicadas a prado y cultivo.

presentan pocas diferencias entre prado y cultivo.

Sin embargo, el contenido en materia orgánica no es el único factor que determina la porosidad, ya que en algunas muestras, como en el par 1/2, la porosidad total es mayor en el suelo de prado a pesar de que el contenido en carbono es del mismo orden en éste que en el de cultivo; incluso cuando el contenido en carbono total es mayor bajo cultivo, como ocurre en el par de muestras 6/7, la porosidad total también presenta valores más elevados en el suelo de prado. Esto pone en evidencia que, junto al contenido en carbono orgánico, existen otros factores que inciden sobre la porosidad; entre ellos cabe mencionar la deformación causada por las labores agrícolas, que es más intensa bajo cultivo que bajo prado.

En consecuencia, los dos factores principales a los que cabe atribuir la disminución de la porosidad total son, por un lado, la reducción del contenido de

materia orgánica hasta niveles que puedan determinar la eventual inestabilidad de los agregados, y, por otro, la compacidad inducida durante el laboreo.

Porosimetría de intrusión de Hg

De acuerdo con la clasificación de GREENLAND (1977), se pueden distinguir las siguientes categorías de poros: de transmisión (500-50 μm), de almacenamiento (50-0,5 μm) y residuales (< 0,5 μm). Por otra parte, FIÉS (1984), puso en evidencia que a escala textural el espacio poroso se puede subdividir en:

—Un espacio poroso *lagunar*, formado por huecos originados durante la retracción de la fase arcillosa, que es independiente de las partículas arenosas que constituyen el esqueleto.

—Un espacio poroso propio de la *fase arcillosa*, que se desarrolla en el interior de ésta y que habitualmente sólo se pone en

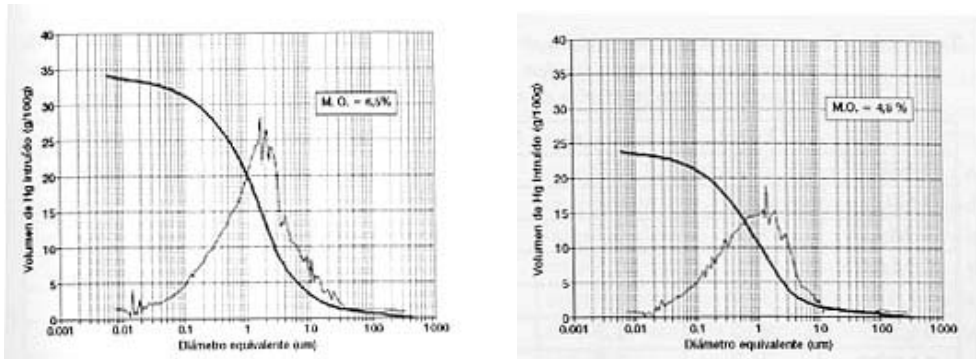


Fig. 2. Curvas de intrusión de Hg y pendiente de las mismas en muestras de textura media y diferente contenido en materia orgánica.

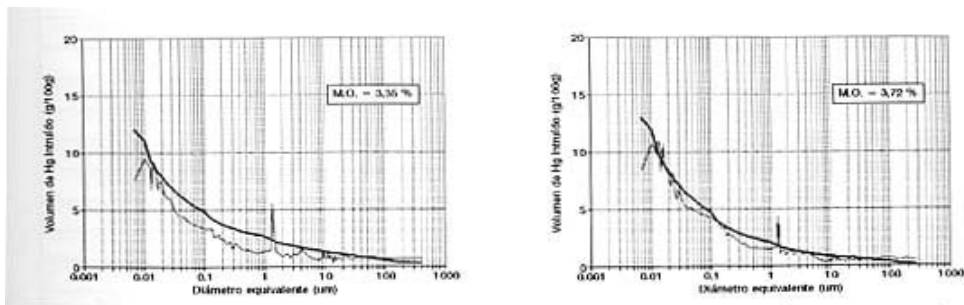


Fig. 3. Curvas de intrusión de Hg y pendiente de las mismas en muestras de textura fina y diferente contenido en materia orgánica.

evidencia para contenidos de arcilla mayores del 20%.

Estadísticamente, FIÈS (1984) pudo comprobar que el límite entre ambos tipos de espacio poroso se corresponde con un diámetro equivalente de 0,05 mm.

La distribución del tamaño de poro por intrusión de Hg se determinó en 20 muestras. En las figuras 2 y 3 se presentan ejemplos de los resultados obtenidos en suelos de textura media y fina, respectivamente.

En la mayor parte de las curvas se aprecia un claro predominio de una sola fase de entrada de Hg, de modo que, en primera aproximación, la distribución del tamaño de poro puede ser descrita como unimodal. Cuando la textura es franca, franco-arenosa y franco-limosa, es mucho más importante la porosidad de almacenamiento que la residual, mientras que en las muestras de textura arcillosa abunda más la porosidad residual.

La fase mayor o principal de entrada de Hg corresponde a entornos de tamaño

TABLA 3. Porosidad total, de transmisión, almacenamiento, residual y diámetro equivalente de 20 horizontes, de acuerdo con los datos obtenidos por intrusión de Hg (Porosidad total y para distintos intervalos en cm³/100g; Diám. equi., es el diámetro equivalente en mm).

	Total	> 50 μm	50 a 0,5 μm	< 05 μm	Diám. equi.
1 SIP	29,3	1,0	17,6	10,7	2,10
2 SIC	28,5	0,7	17,2	10,6	1,61
3 MAP	32,6	0,5	21,9	10,2	1,14
4 MAC	27,2	0,5	15,5	11,2	0,90
5 LSP	31,8	0,9	18,7	12,2	2,37
6 LSC	43,3	1,3	31,8	11,2	3,64
7 MOP	21,2	0,5	14,3	6,4	1,15
8 MOC	17,9	0,5	9,7	7,7	0,99
9 BOP	34,0	1,0	24,2	8,8	2,37
10 BOC	23,8	0,9	14,2	8,7	2,19
11 CAP	41,0	3,7	30,0	7,3	7,38
12 CAC	35,7	2,4	27,2	5,8	4,95
13 RAP	50,2	2,2	33,9	14,1	3,58
14 RAC	36,5	0,7	22,2	13,6	1,73
15 BAP	24,8	2,3	19,4	3,1	5,59
16 BAC	24,7	1,2	19,9	3,6	2,95
17 COP	12,0	0,7	2,3	9,0	0,65
18 COC	13,5	0,5	1,9	11,1	0,49
23 TUP	24,4	1,1	11,9	11,4	2,93
27 ARB	11,9	0,4	1,2	10,3	0,59

de poro cuyas dimensiones presentan un claro paralelismo con la granulometría. En los horizontes de texturas más gruesas (franco-arenosas y francas) el máximo de entrada de Hg ocurre a diámetros de poro equivalentes comprendidos entre 10 y 0,1 μm ; en las muestras más arenosas se aprecia que la ocupación del espacio poroso lagunar de los agregados ya comienza a diámetros equivalentes mayores de 10 μm . En los horizontes de textura arcillosa, por contra, la fase mayor de entrada de Hg está desplazada a diámetros equivalentes de poro inferiores, de modo que el diá-

metro más frecuente se sitúa entre 0,01 y 0,02 μm .

En la tabla 3 se presenta un resumen de los datos de porosimetría, que incluyen tanto el volumen total de Hg que ocupa los poros de cada una de las muestras, como la cantidad del mismo que corresponde a los diversos intervalos de tamaño de poro, según la clasificación de GREENLAND (1977); también figura en esta tabla el diámetro equivalente medio.

Se aprecia que en pares de muestras con textura similar y contenidos en materia orgánica diferentes, la muestra más orgánica presenta porosidad total más ele-

vada. Además, en pares de muestras de suelos con textura similar y contenidos en materia orgánica del mismo orden de magnitud, el volumen total de Hg intruído es poco diferente.

Si se consideran únicamente los suelos de texturas gruesas y medias (muestras 1 a 16) se aprecia que la materia orgánica explica buena parte de la varianza del Hg total intruído; en efecto, el coeficiente de correlación entre materia orgánica y volumen total de poros, ($r^2 = 0,45$), es significativo para un nivel de $P < 0,05$.

En relación con los datos de diámetro equivalente, consignados en la tabla 3, hay que destacar el hecho de que pares de muestras tomadas en la misma localidad bajo distinta dedicación presenten siempre diferencias importantes; esto se cumple incluso cuando el contenido en materia orgánica y la porosidad total son similares. Por esta razón, el diámetro equivalente parece ser un parámetro más ade-

cuado que la porosidad total para caracterizar el efecto global de la dedicación sobre la organización de los agregados a escala textural.

No sólo la porosidad total, sino también el volumen que ocupan los poros de transmisión, almacenamiento y residuales (tabla 3) puede estar relacionado con la composición orgánica. Así, comparando pares de muestras con granulometría similar se pone de manifiesto que un aumento del contenido en materia orgánica determina que se acreciente el volumen ocupado por los poros de tamaño medio, es decir de aquellos entornos de tamaño de poro que de acuerdo con GREENLAND (1977) cumplen funciones de almacenamiento o de aquellos que FIÈS denomina porosidad lagunar. Así, el coeficiente de correlación entre porosidad de almacenamiento y materia orgánica ($r^2 = 0,46$), muy similar al que presenta la porosidad total con esta variable.

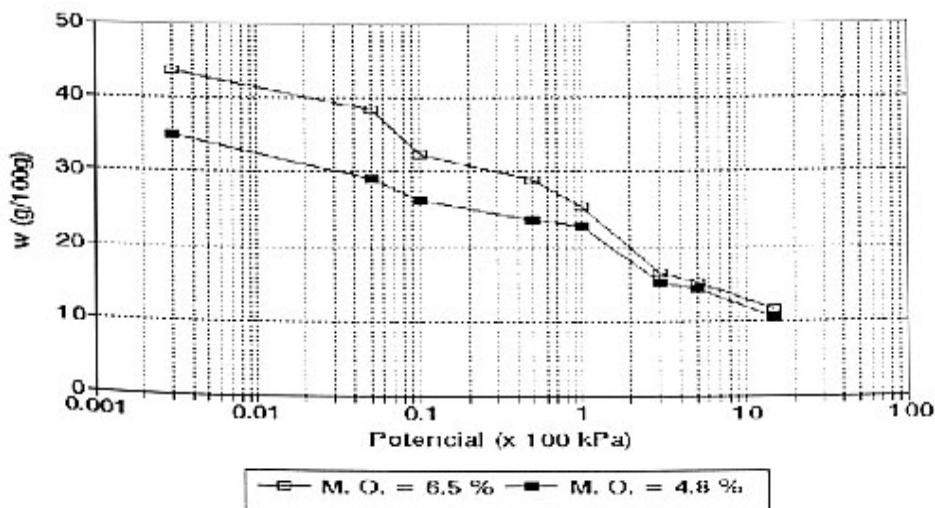


Fig. 4. Ejemplo de curvas características de humedad para texturas similares y diferentes contenidos en materia orgánica.

En definitiva, en los suelos estudiados se aprecian importantes diferencias de porosidad de almacenamiento y lagunar que no corresponden a una variación de textura significativa.

Por contra, en pares de muestras de la misma localidad la microporosidad, referida tanto a la porosidad residual de GREENLAND (1977) como a los poros de la fase arcillosa de FIÈS (1984) se mantiene relativamente constante, no apreciándose diferencias significativas cuando varía el contenido en materia orgánica. Por lo tanto, diferencias de contenido en materia orgánica no parecen afectar a este entorno de tamaños de poro.

Estos resultados, que están de acuerdo con los presentados por GUERIF (1989) y PAZ y GUERIF (1993), se han interpretado como una consecuencia de la presencia de partículas de materia orgánica libre que actuarían sobre la arquitectura de los agregados de un modo similar a las partículas de arena y limo, modificando la organización textural en el sentido de incrementar el volumen ocupado por los poros de tipo lagunar.

Curvas características de humedad

En relación con las curvas características de humedad, el primer resultado que cabe resaltar es la influencia de la materia orgánica sobre la retención hídrica. Así, en la figura 4, se pone de manifiesto que a potenciales hídricos bajos, próximos a saturación, el agua retenida por el suelo, y por lo tanto la porosidad, aumenta con el contenido en materia orgánica, lo que confirma los resultados de HAMBLIN

(1985) y GUERIF (1989). Si a potenciales próximos a saturación (entre 0,3 y 1 kPa) se aprecian diferencias significativas en cuanto agua retenida a un potencial dado en función de la dedicación del suelo y de su contenido en materia orgánica, por contra, a potenciales próximos al punto de marchitez las curvas características de humedad tienden a converger. Son pocas las excepciones observadas, relativas a datos puntuales disconformes con este modelo general.

En la tabla 4 se presentan, los resultados de contenido hídrico a capacidad de campo (10 kPa) y punto de marchitez (1.500 kPa) así como el agua útil, obtenida por diferencia, para los 22 horizontes estudiados. Asimismo, se presentan datos de la porosidad de almacenamiento para 20 horizontes obtenida por intrusión de Hg.

A escala textural, el agua útil de los horizontes analizados oscila entre 6 g/100g en la muestra 21 y 32,4 g/100g en la muestra 13. Se aprecian dos grupos de horizontes con reservas de agua útil relativamente poco importantes a esta escala: por una parte, los suelos de textura arcillosa y, por otra, algunos horizontes superficiales de textura ligera (muestras 11 y 12) que presentan contenidos en materia orgánica elevados.

Al comparar pares de horizontes con distinta dedicación, se aprecia que otro de los efectos de la materia orgánica es el incremento de la reserva de agua útil. En muestras con textura similar y diferente contenido en materia orgánica, la oscilación de agua útil se cifra entre 2,2 g/100g (muestras 7/8) y

TABLA 4. Contenido hídrico a 10 y 1500 kPa, agua útil (Au) y porosidad de almacenamiento, determinada por intrusión de Hg.

	10 kPa (g / 100g)	1500 kPa (g / 100g)	Au (g / 100g)	Saturación (g / 100g)
1 SIP	30,2	13,0	17,2	37,8
2 SIC	24,8	11,2	13,6	33,8
3 MAP	58,0	25,6	32,4	62,7
4 MAC	33,0	15,5	19,5	35,0
5 LSP	43,5	23,1	23,4	56,4
6 LSC	45,4	19,3	26,2	61,6
7 MOP	22,0	7,4	14,6	25,4
8 MOC	20,3	7,9	12,4	23,4
9 BOP	32,3	11,7	20,6	43,0
10 BOC	26,3	10,5	15,8	35,0
11 CAP	19,2	8,1	11,1	29,7
12 CAC	14,2	5,7	8,5	38,3
13 RAP	60,0	22,2	37,8	69,1
14 RAC	38,6	15,0	23,5	41,7
15 BAP	22,4	7,4	15,1	37,5
16 BAC	25,3	9,1	16,1	31,9
17 COP	37,8	22,1	15,7	42,0
18 COC	33,5	21,7	11,8	42,4
19 TUP	33,7	18,2	15,5	48,7
20 CAT	12,6	8,5	4,1	22,0
21 COB	34,8	28,8	6,0	36,9
22 ARB	20,7	13,4	7,3	23,4

4,8 g/100g (muestras 9/10). Sin embargo, aún cuando el contenido en materia orgánica no sea muy diferente, se pueden observar, diferencias de agua útil entre dedicaciones de hasta 4 g/100g. Cuando oscila entre pares de muestras no sólo el contenido de materia orgánica sino también la cantidad de arcilla, las diferencias en las reservas de agua útil son mucho más elevadas fijándose en 12,9 g/100g (muestras 3/4) y 14,3 g/100g (muestras 13/14).

Curvas de retracción

La contracción de los suelos en estado natural puede describirse mediante 3 fases, descritas ya por HAINES (1923) y reconocidas por otros autores (STENGEL, 1981), que se caracterizan por la relación de dependencia entre contenido hídrico (DW) y reducción de volumen (DV):

- Contracción estructural $DV > DW$
- Contracción normal $DV = DW$

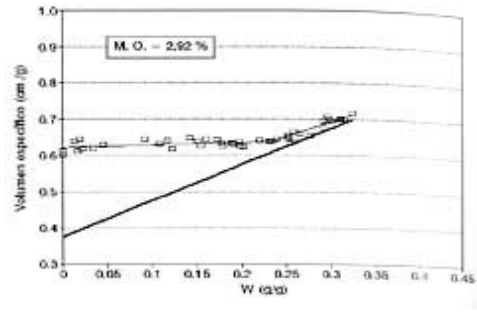
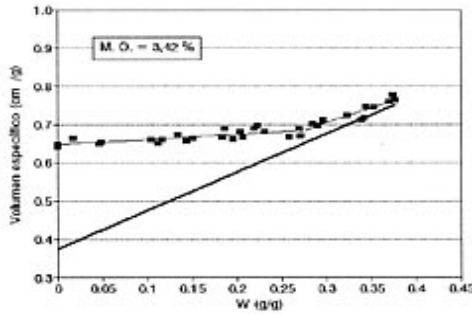


Fig. 5. Curvas de retracción en muestras de textura media y contenido en materia orgánica diferente.

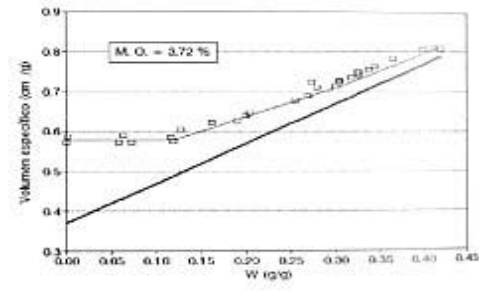
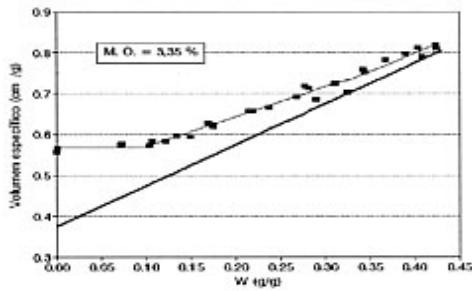


Fig. 6. Curvas de retracción en muestras de textura fina.

- Contracción residual $DV < DW$

La *contracción a escala estructural* se aprecia sólo en suelos naturales, y no se distingue cuando se analizan pequeños agregados, naturales o remoldeados.

Durante la *contracción normal*, ya en el rango propio de la escala textural, la reducción de volumen y la pérdida de agua son equivalentes.

En la fase de *contracción residual*, la pérdida de agua nuevamente es mayor que la disminución de volumen.

Por otra parte, HAINES (1923), dis-

tingió tres dominios en una curva de retracción:

1) Una parte lineal, la *recta de saturación*, a lo largo de la cual la disminución de volumen de la muestra equivale exactamente al volumen de agua cedido. El límite inferior de la *recta de saturación* se llama *límite de entrada de aire*.

2) Una parte intermedia, la *recta de retracción residual*, en la cual ya hay entrada de aire en el material. Su límite inferior se llama *límite de retracción*.

3) Una parte final en que la porosidad ya no varía y la muestra permanece a *volu-*

men constante. En esta fase el contenido hídrico es inferior al punto de marchitez.

La descripción de la dinámica de la retracción se suele presentar utilizando como coordenadas el contenido hídrico gravimétrico y el volumen específico. La principal ventaja de este sistema estriba en que permite observar directamente si al disminuir el volumen de la muestra el agua perdida es reemplazada o no por aire y en que proporción entra aire en el sistema poroso.

En las figuras 5 y 6 se presentan datos de retracción determinados en agregados de 2-3 mm, así como las curvas teóricas ajustadas por regresión para suelos de textura media y fina, respectivamente.

Los datos experimentales presentan una variabilidad importante, lo que determina cierto nivel de imprecisión en la evaluación de los dos puntos singulares de las curvas: el límite de entrada del aire (W_a) y el límite de retracción (W_e). De las figuras 5 y 6 se infiere que en el dominio correspondiente al límite de retracción, el cambio de pendiente entre las fases de contracción normal y residual únicamente se aprecia con nitidez en los suelos arcillosos. Como consecuencia, en los horizontes de texturas gruesas y medias, la determinación del punto de entrada de aire (W_e) resulta poco precisa, de tal modo que muchas de las curvas de retracción podrían describirse mediante una doble recta.

La dispersión de la medida es más importante en los horizontes de textura ligera y contenidos elevados en materia orgánica. Por lo tanto, al evaluar los índices W_a y W_e , la precisión parece más débil

en aquellos horizontes con contenidos elevados en materia orgánica.

En el dominio próximo a saturación, se aprecian diferencias entre la recta de saturación y la de contracción normal, de modo que ambas tienden a discurrir paralelas. Esto significa que la muestra de suelo no se pudo saturar totalmente en las condiciones experimentales estándar; las dificultades para alcanzar la saturación pueden ser debidas bien al elevado contenido en materia orgánica o bien a contenidos altos de arcilla.

Al comparar horizontes superficiales de la misma localidad, los dedicados a cultivo tienden a presentar valores inferiores de volumen específico (mayor densidad aparente) que los de prado. Estas diferencias de volumen específico son particularmente importantes para contenidos hídricos situados por debajo del límite de entrada de aire (W_e); en este rango de humedades se aprecian siempre en pares de horizontes con distinta dedicación y la misma textura, tanto si el contenido en materia orgánica decrece en la parcela de cultivo como si se mantiene del mismo orden que en la parcela de prado e incluso cuando es mayor en la de cultivo que en la de prado.

Las curvas de retracción pueden proporcionar índices, relevantes desde el punto de vista físico, para evaluar cuantitativamente la estructura y en su caso analizar el efecto de la dedicación sobre las propiedades y la fertilidad física del suelo. Como señalan Mc GARRY & MALAFANT (1987) son numerosos los índices que se pueden obtener a partir de las curvas de retracción, entre los que destacan el

punto de entrada de aire o la capacidad de expansión potencial.

En el límite de entrada de aire (W_a) se aprecia, al comparar las 18 primeras muestras, que los suelos de prado presentan contenidos hídricos sistemáticamente más altos que los de cultivo de la misma localidad. Es evidente el paralelismo entre estos resultados y los discutidos al analizar las curvas características de humedad. En efecto, a potenciales próximos a saturación, se apreciaron siempre diferencias significativas de las curvas de pF en función de la dedicación del suelo, que se pudieron explicar como consecuencia del efecto conjunto de diferencias en el contenido en materia orgánica y en el grado de compacidad. A pequeñas diferencias de materia orgánica entre dedicaciones, le corresponden valores de contenido hídrico en el límite de entrada de aire (W_a) relativamente próximos, mientras que cuando la diferencia de materia orgánica entre dedicaciones es muy importante, la humedad en el límite de entrada de aire es mucho más elevada en el suelo de prado que en el de cultivo.

Los resultados obtenidos para el contenido hídrico en el límite de retracción (W_p), en horizontes con distinta dedicación, son más aleatorios. Esto se debe probablemente a la imprecisión en la evaluación de este límite en suelos tan poco expandibles como los de texturas ligera y media estudiados.

Hay que señalar, no obstante, que cuando, en vez de los contenidos hídricos correspondientes al límite de entrada de aire (W_a) y límite de retracción (W_r), se consideran los potenciales hídricos en

estos límites, las diferencias entre suelos de prado y cultivo con texturas similares no se ponen de manifiesto. Por tanto los límites característicos de las curvas de retracción, cuando se define en términos de succión y no de contenido hídrico, no parecen estar influenciados por el contenido en materia orgánica, tanto en los horizontes de texturas ligeras y medias como en los de texturas pesadas. Resultados similares han sido puesto de manifiesto por GUERIF (1989), quien concluye que el fenómeno de retracción, cuando se describe en función del potencial hídrico del suelo, no depende del contenido en materia orgánica.

En el conjunto de suelos de textura ligera y media se comprueba que el volumen específico a saturación depende del contenido en materia orgánica, por lo que en pares de muestras de textura similar, presentan sistemáticamente valores mayores en los horizontes con mayor en carbono, independientemente de la dedicación. El índice de poros a saturación, magnitud que depende al mismo tiempo de la densidad real y aparente, presenta en estos suelos un notable paralelismo con el volumen específico medido en las mismas condiciones de saturación.

El volumen específico en seco de los horizontes de textura ligera y media muestra una mayor dependencia de la dedicación que del contenido en carbono, contrariamente a lo que ocurre con el volumen específico a saturación. Al igual que el contenido hídrico del punto de entrada de aire (W_a) es este un índice que proporciona valores más altos en los suelos de prado que en los de cultivo, aún cuando el

contenido en materia orgánica de la muestra de cultivo pueda ser superior a la de la homóloga bajo prado.

En definitiva, como cabe esperar, todos los suelos arcillosos estudiados presentan una elevada compacidad en seco. Dentro de los suelos de textura ligeras y media, la compacidad en seco también puede ser muy elevada.

Es necesario indicar, una vez más, que en los pares de muestras de textura similar y con distinta dedicación no siempre las muestras de prado son las que presentan mayor contenido en materia orgánica. En relación con ello, los índices obtenidos a partir del intervalo de contracción normal como el volumen específico o el índice de poros están relacionados con el contenido total en materia orgánica. Por contra, los índices deducidos del intervalo de contracción residual, como el volumen específico en seco la diferencia ($W_a - W_r$) y el límite de entrada de aire (W_a) describen mejor la dedicación del suelo y parecen depender menos del contenido total de carbono.

Se analizaron también datos de expansión potencial calculada mediante el parámetro S_p (STENGEL *et al.*, 1984), por diferencia entre el índice de poros de los agregados saturados y secos. El índice de expansión potencial, S_p , permitiría evaluar la capacidad del suelo para regenerar su estructura durante los ciclos de humectación-deseccación. STENGEL *et al.* (1984) sitúan en 25% el valor límite por debajo del cual el suelo carece de aptitud para la fragmentación y la regeneración de la estructura. La capacidad de expansión potencial, S_p , de los suelos de textura ligeras y medias es variable. En 9 de los 17

horizontes con esta granulometría es baja, inferior al 25%, como corresponde a muestras con una fracción arcillosa escasa y de naturaleza esmectítica. Sin embargo, se encuentran valores altos de expansión potencial en horizontes de texturas ligeras y medias y ricos en materia orgánica.

Los resultados demuestran el efecto de la materia orgánica, incrementando la capacidad de expansión potencial en muestras con una amplia gama de contenidos en arcilla, y, en particular, en el conjunto de aquellos horizontes de texturas medias y ligeras. De acuerdo con ello, los suelos más ricos en materia orgánica presentarían, a priori, mayor aptitud para la fragmentación y para el mantenimiento o regeneración de una estructura de buena calidad.

Por último, el índice de volumen específico, que mide la diferencia relativa de compacidad en húmedo y seco, presenta cierto paralelismo con el índice de expansión potencial, ya que, en suelos de textura similar, ambos tienden a presentar valores más altos en horizontes con mayores contenidos en materia orgánica. Sin embargo, el índice de expansión potencial es más sensible a variaciones en el contenido en materia orgánica entre dedicaciones que el índice de volumen específico.

En definitiva, a partir de las curvas de retracción se pueden obtener diversos índices, algunos de los cuales presentan una buena sensibilidad para analizar el efecto de la dedicación del suelo sobre la estabilidad de la estructura. En suelos de textura similar el valor de estos índices oscila en función de la dedicación y/o el contenido en materia orgánica.

CONCLUSIONES

Se puso en evidencia una relación entre porosidad total a escala textural y dedicación del suelo, comprobándose que en los suelos de cultivo hay una disminución del espacio poroso. La reducción de la porosidad se debe a la interacción de dos factores, ambos inducidos por laboreo: disminución del contenido en materia orgánica y aumento de la compacidad.

Del análisis de la organización de la arquitectura de los agregados en seco y húmedo, se infiere que la materia orgánica induce un aumento del volumen total de poros, y de algunas categorías de los mismos, en particular en los entornos de tamaños de los poros de origen lagunar y de aquellos cuya función es el almacenamiento.

Las curvas características de humedad ponen en evidencia importantes

diferencias de retención de agua del suelo en suelos con similar textura y diferente dedicación a potenciales próximos a saturación. En el entorno del punto de marchitez estas curvas tienden a converger. El agua útil tiende a aumentar conforme lo hace el contenido en materia orgánica del suelo.

Las curvas de retracción a escala textural también muestran diferencias entre dedicaciones distintas de suelos con texturas similares. A partir de éstas se calcularon diversos índices de estabilidad estructural. Los valores de aquellos índices calculados a partir del intervalo de contracción normal dependen del contenido en materia orgánica. Aquellos índices obtenidos del intervalo de contracción residual describen mejor la dedicación del suelo y muestran más independencia del contenido en materia orgánica.

BIBLIOGRAFIA

- CARTER, M. R., (1990). Relationship of strength properties to bulk density and macro porosity in cultivated loamy sand to loam soils. *Soil Tillage Res.*, 15: 25 -268.
- DE LEON, F., (1991). Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structureaux de la couche labourée. Tésis. INA. Paris-Grignon. 133 pp.
- DEXTER, A. R., (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11: 199-238.
- FERNANDEZ RUEDA, M^a J., (1997). Características físicas y mecánicas de suelos de cultivo. Tesis doctoral. Universidad de La Coruña. 283 pp.
- FIES, J. C. and STENGEL, P., (1981). Densité texturale des sols naturels. I. Méthode de mesure. *Agronomie*, 1: 651-658.
- FIES, J. C., (1984). Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes: comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie*, 4: 891-899.
- FIES, J. C. and BRUAND, A., (1990). Textural porosity analysis of a silty clay soil using pore volume balance estimation, mercury porosimetry and quantified backscattered electron scanning image (BESI). *Geoderma*, 47: 209-219.
- GREENLAND, D. J., (1977). Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent ?. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 281: 193-208.
- GUERIF, J., (1989). Effects of changing straw disposal on soil physical properties. In «Energy saving by reduced soil tillage». Report EUR 11258 CEE. Pp 117-126.
- GUERIF, J., (1994). Effects of compaction on soil strength parameters. In: Soane, B. D. and Van Ouwerkerk (eds.), *Soil compaction in crop production*, 191-213. Elsevier.
- GUITIAN OJEA, F. y CARBALLAS, T., (1996). Técnicas de análisis de suelos. De. Pico Sacro. Santiago de Compostela. 288 pp.
- HAINES, W. B., 1923. The volume changes associated with variations of water content in soils. *J. Agric. Sc.*, 13: 296.
- HAMBLIN, A. P., (1985). The influence of soil structure on water movement crop growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38: 95-158.
- KAY, B. D., (1990). Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 12: 1 - 41.
- LETEY, J., (1985). Relationship between soil physical properties and crop productions. pp., 277-294. In: STEWART, B. A. (ed.), *Advances in Soil Science*, vol. 1 Springer-Verlag, N. Y.
- Mc GARRY, D. and MALAFANT, K. W. J., (1987). The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 290-297.
- MONNIER, G., STENGEL, P. and FIES, J. C., (1973). Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux: application a l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24: 533-545.
- PAZ, A. y GUERIF, J., (1993). Influencia de la carga y el potencial hídrico durante la compactación sobre la resistencia a la tracción de unidades estructurales de suelo en estado seco. *Suelo y Planta*, 2: 459-473.
- STENGEL, P., (1979). Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Ann. Agron.*, 30: (1), 27-51.
- STENGEL, P., DOUGLAS, J., GUERIF, J., GOSS, M. J., MONNIER, G., CANNEL, R. Q., (1984). Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. *Soil Tillage Res.*, 4: 35-43.
- STENGEL, P., (1990). Caractérisation de l'état structural, objectifs et méthodes. In: Boiffin, J., and Marin La Fleche, A., (Eds), *La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques et maîtrise par l'agriculteur. Colloques de l'INRA*. pp. 15-36.
- USDA, 1975. *Soil Taxonomy*. Soil Conservation Service. Handbook 436. Wahsington. 754 pp.