

## CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICA DE SUELOS ÁNDICOS DE CANARIAS A PARTIR DE LA CURVA DE RETENCIÓN

S. Armas Espinel<sup>1</sup>, J.M. Hernández Moreno<sup>2</sup> y C.M. Regalado<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas. Av. Buenos Aires, 5. 38003 Santa Cruz de Tenerife. e-mail: [sarmesp@gobiernodecanarias.org](mailto:sarmesp@gobiernodecanarias.org)

<sup>2</sup>Dep. Geología y Edafología. Universidad de La Laguna. La Laguna, 38200 Tenerife. e-mail: [jhmoreno@ull.es](mailto:jhmoreno@ull.es)

<sup>3</sup>Dep. Suelos y Riegos. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA). Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife. e-mail: [cregalad@icia.es](mailto:cregalad@icia.es)

**RESUMEN.** La pendiente de la tangente en el punto de inflexión de la curva de retención de agua,  $S$ , está relacionada con la desviación estándar de la distribución de tamaños de poros. Por tanto  $S$  ha sido propuesto como un parámetro integrador, indicativo del grado en que la porosidad se encuentra concentrada en un rango concreto de poros. Se analiza el valor del parámetro  $S$  para un conjunto de suelos de Canarias, con características ándicas diferenciadas. Los valores promedio de pendiente encontrados fueron en general superiores, en algunos casos hasta casi un orden de magnitud, al valor crítico  $S > 0,035$ . La succión media en el punto de inflexión, o moda de la distribución del tamaño de poros, se situó alrededor de 10 kPa, esto es, asociada a la región de mesoporos.  $S$  aumentó significativamente con el contenido en materia orgánica y óxidos amorfos y cristalinos, y al disminuir la densidad aparente ( $\rho_b$ ), de forma tal que el valor crítico al que  $S = 0,035$  fue de  $\rho_b = 1,10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Este trabajo confirma la reconocida calidad física de los suelos ándicos y ha puesto de manifiesto la limitación del parámetro  $S$  para predecir los cambios de distribución de poros frente a las prácticas de manejo en diferentes subtipos de suelos ándicos.

**ABSTRACT.** The slope of the tangent at the inflection point of the water retention curve,  $S$  is related to the standard deviation of the pore size distribution.  $S$  has therefore been proposed as an integrator parameter indicative of the degree to which the porosity is concentrated in a particular range of pores. We analyze the value of the parameter  $S$  for a set of soils of the Canary Islands, with differentiated andic characteristics. The average slope values found were generally higher, in some cases almost an order of magnitude, the critical value  $S > 0,035$ . The average suction at the inflection point, or mode of the distribution of pore size, was around 10 kPa, that is associated with the mesopore region.  $S$  increased significantly with the organic matter content and crystalline and amorphous oxides and decreased with the bulk density ( $\rho_b$ ), so that the critical value at which  $S = 0,035$  was  $\rho_b = 1,10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . This study confirms the high physical quality of andic soils and has highlighted the limitations of the  $S$  parameter for predicting changes of pore distribution *versus* management practices in different subtypes of andic soils.

### 1.- Introducción

La calidad física es uno de los aspectos fundamentales de la calidad de los suelos, ya que influye en la capacidad de retención de agua, escorrentía superficial, infiltración, aireación, desarrollo radicular y propiedades mecánicas, etc. (Topp et al., 1997). Todos estos aspectos están relacionados en alguna medida directa o indirectamente con la estructura del suelo. Uno de los principales procesos de degradación de la estructura es la compactación del suelo, que da lugar a cambios en la relación de sólidos y poros (principalmente en el volumen de poros más grandes), afectando al crecimiento de las raíces de las plantas y a la distribución, flujo y retención de agua, sustancias disueltas y gases y provocando cambios en la curva de retención de humedad, principalmente en su pendiente.

En suelos agrícolas, en los que se persigue maximizar la productividad con el mínimo impacto en el medio ambiente, los rangos óptimos de los diferentes indicadores de la calidad física de los suelos no están definidos, dada la complejidad de las interacciones entre suelo, tipo de cultivo, manejo y clima, aunque se han establecido diversos valores recomendados (Reynolds et al., 2002). Por otra parte, en determinados estudios se hace imprescindible poder integrar o sintetizar el comportamiento hidráulico de un suelo en un único valor o índice característico, lo que facilitaría comparar las características hidráulicas de suelos de diferente origen y relacionarlas con otras propiedades de los suelos. Dexter (2004a) define el parámetro  $S$  como la pendiente de la curva de retención de agua en el punto de inflexión, al ser representada ésta como el contenido gravimétrico de agua frente al logaritmo natural de la succión,  $\ln(h)$ . Esto es  $S = d\theta/d(\ln(h))$  en el punto  $(\theta_i, \ln(h_i))$ . El punto de inflexión divide aproximadamente la porosidad entre poros finos "texturales" y poros gruesos "estructurales". Según este autor, el valor de  $S$ , es indicativo de la medida en que la porosidad del suelo está concentrada en un rango limitado de poros. La degradación física del suelo ocurre cuando éste es compactado (o cualquier otro proceso que reduzca la porosidad) y reduce la pendiente de la curva en el punto de inflexión. Por tanto, el autor propone el uso de  $S$  como un índice de la calidad física de los suelos, que permitiría comparar distintos tipos de suelos bajo diferentes condiciones de manejo. Dexter (2004c) sugiere cuatro

categorías de calidad física de los suelos en función de los valores que puede adquirir este parámetro:  $S \geq 0,05$  (muy buena);  $0,05 > S \geq 0,035$  (buena);  $0,035 > S \geq 0,020$  (pobre) y  $S < 0,02$  (muy pobre).

La bibliografía sobre el uso de S como indicador de la calidad física de los suelos es extensa. Así, este parámetro se ha relacionado con algunas propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos (Dexter, 2004b,c; Dexter y Czyz, 2007; Asgarzadeh et al., 2010; Silva et al., 2011), con la calidad del agua (Mosaddegi et al., 2008), con el desarrollo radicular de los cultivos (Osuna-Ceja et al., 2006) y con otros indicadores de la calidad física del suelo, como el contenido en carbono orgánico, la estabilidad estructural y el agua útil (Kutlu y Ersahin, 2008; Garg et al., 2009; Reynolds et al., 2009). Así mismo, se ha validado tanto para suelos de zonas templadas como tropicales y bajo diferentes prácticas de manejo (Tormena et al., 2008; Pires et al., 2008; Vieira et al., 2009; Li et al., 2011). En estos trabajos se ha observado que S tiende a aumentar con la materia orgánica y a disminuir con la densidad aparente y el contenido en arcilla. Los valores críticos propuestos por Dexter (2004c) han sido en general adoptados en estos trabajos como los rangos límites para separar los suelos con una adecuada estructura ( $S > 0,035$ ) de los suelos degradados ( $S < 0,02$ ). Otros autores sin embargo sugieren en suelos tropicales de Brasil aumentar estos valores a  $S > 0,045$  y  $S < 0,025$ , respectivamente (Andrade y Stone, 2009; Calone y Rosolem, 2011).

Por otro lado, tal y como indican diversos autores, se debe validar este parámetro en un mayor número de tipos de suelos y sistemas de manejo y ser estudiado en combinación con otros índices de la calidad física. En otros estudios se han obtenido valores elevados ( $S \gg 0,035$ ) en suelos arenosos sin estructura y en medios artificiales porosos, y que deben ser por tanto valorados con precaución, ya que no son consistentes con valores adecuados de otros parámetros de calidad física (Reynolds et al., 2009; Asgarzadeh et al., 2010).

Los suelos de las Islas Canarias, de origen volcánico, presentan frecuentemente unas características físicas muy particulares de gran incidencia en su comportamiento hídrico (retención de humedad, transporte, etc.). Estas propiedades se deben a una elevada capacidad estructural atribuibles a la presencia de materiales amorfos (alofana, imogolita, ferrihidrita), en general fuertemente asociados a la materia orgánica y también a la presencia de óxidos de Fe y Al cristalinos. Los suelos con constituyentes amorfos se denominan suelos ándicos y cuando son predominantes en la fracción coloidal, Andisoles (Soil Survey Staff, 1998) o Andosoles (IUSS Working Group WRB, 2006). En el presente trabajo se analiza el valor del parámetro S para un conjunto de suelos naturales y cultivados de Canarias, con un rango en sus características ándicas.

## 2.- Material y métodos

### 2.1.- Suelos

Se seleccionaron un conjunto de suelos naturales y cultivados de las islas de Tenerife y La Palma con un rango en sus propiedades ándicas. En el caso de los suelos naturales (suelos N), se han elegido dos Andosoles alofánicos y organominerales (N1, N2) y un Ultisol (N3) y un Alfisol (N4) con ciertas características ándicas. Los perfiles representativos han sido descritos en el Departamento de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna.

Los suelos cultivados seleccionados (suelos C) proceden de cuatro fincas de platanera representativas del norte (suelo C1) y sur (C2, C3, C4) de la isla de Tenerife, con distintas condiciones de manejo, y han sido descritos por Armas-Espinel et al. (2003). Los suelos han sido transportados desde zonas de medianías hasta la zona costera para su cultivo y presentan ciertas características ándicas. El suelo C1 cumple los requisitos de Andisol salvo por los valores de retención de fosfato, atribuible a la saturación parcial de la capacidad de retención de P. Las texturas son franco-arcillosas o más finas. Las propiedades generales de estos suelos se resumen en la Tabla 1.

Los cationes solubles, conductividad eléctrica (CE) y pH se determinaron en el extracto de saturación. Los cationes de cambio por el método del acetato amónico (1 N, pH = 7). Los contenidos en materia orgánica y fósforo por los métodos de Walkley y Black (1934) y Olsen et al. (1954), respectivamente.

Propiedades ándicas: La densidad aparente ( $\rho_b$ ) se determinó por el método del anillo y los valores de Al, Fe y Si extraídos con oxalato amónico ( $Al_o$ ,  $Fe_o$  y  $Si_o$ ) y la retención de P ( $\Delta P$ ) según Blakemore et al. (1987). Los contenidos en  $Al_o$ ,  $Fe_o$  y  $Si_o$  representarían la riqueza en componentes no cristalinos como la alofana y ferrihidrita. Los requerimientos que definen las propiedades ándicas son los siguientes (Soil Survey Staff, 1998): ( $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ )  $\geq 2$  %, densidad aparente,  $\rho_b$ , medida a 33 kPa  $\leq 0,9$  kg·m<sup>-3</sup>, y  $\Delta P > 85$  %. El contenido en óxidos de hierro cristalino se determinó con ditionito-citrato (Blakemore et al., 1987).

### 2.2. Retención de agua

Se emplearon muestras inalteradas tomadas en anillos de 5 cm de diámetro y volumen de 96,6 cm<sup>3</sup> con ayuda de una barrena manual cilíndrica. Una vez en el laboratorio se saturaron mediante inmersión en una solución de CaSO<sub>4</sub> (0,005 M) y timol, para evitar la dispersión y degradación de la materia orgánica (Klute y Dirksen, 1986). Las medidas de tensión y humedad se llevaron a cabo mediante un sistema de cámaras de presión (células Tempe) en 10 pasos (0,2; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 70 y 90 kPa) y en placas de presión de Richards (Klute, 1986) para tres medidas más: 100, 500 y 1.500 kPa.

**Tabla 1.** Mineralogía y principales propiedades químicas y físicas de los suelos

Suelo	Prof. (cm)	Clasificación	Mineralogía		Al <sub>o</sub> +½Fe <sub>o</sub> (%)	Fe <sub>dc</sub> (%)	ΔP (%)	pH <sub>e.s.</sub>	CE <sub>e.s.</sub> (dS·m <sup>-1</sup> )	CICE (cmol·kg <sup>-1</sup> )	MO (g·kg <sup>-1</sup> )	P Olsen (mg·kg <sup>-1</sup> )
			Principal	Secundaria								
N1 <sub>P1</sub>	15-30	Typic Hapludand (Andosol)	A*		7,46	18,82	95,6	5,72	0,11	1,88	70,4	2,9
N1 <sub>P2</sub>	30-60	Typic Hapludand (Andosol)	A*		14,19	16,78	97,9	5,38	0,10	0,67	58,6	0,9
N2 <sub>S</sub>	15-30	Typic Hapludand (Andosol)	A		8,81	2,97	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
N2 <sub>P</sub>	35-45	Typic Hapludand (Andosol)	A	Im	9,12	4,59	100,3	6,78	0,13	6,14	59,2	6,8
N3 <sub>P1</sub>	30	(Suelo ferralítico)	Ht	I	3,43	7,88	78,8	5,21	0,50	11,21	176,3	2,1
N3 <sub>P2</sub>	70	(Suelo ferralítico)	Ht	I	2,77	9,49	74,8	5,02	0,28	4,81	32,3	11,9
N4 <sub>P</sub>	30	Ustalf (Suelo fersialítico)	Ht	I	1,43	5,27	70,2	6,12	0,16	10,47	14,3	6,6
C1 <sub>S</sub>	0-15	Haplic Torriarents	A	Ht	4,20	4,51	77,5	7,06	3,13	25,76	23,7	57,3
C2 <sub>S</sub>	0-15	Haplic Torriarents	Ht	I	2,30	4,46	54,5	7,59	3,81	37,41	29,6	77,0
C2 <sub>P</sub>	15-30	Haplic Torriarents	Ht	I	2,56	3,82	64,3	7,52	2,30	37,09	21,2	57,4
C3 <sub>S</sub>	0-15	Haplic Torriarents	Ht, II		2,47	3,51	60,9	7,34	8,01	51,69	46,6	144,4
C3 <sub>P</sub>	15-30	Haplic Torriarents	Ht, II		2,85	3,76	49,9	7,38	6,42	48,66	40,5	137,4
C4 <sub>S</sub>	0-15	Haplic Torriarents	Ht	I	2,04	3,77	61,4	7,63	2,02	53,58	31,3	134,1
C4 <sub>P</sub>	15-30	Haplic Torriarents	Ht	I	2,36	4,42	55,7	7,50	1,76	54,07	24,8	89,9
C10 <sub>S</sub>	0-10	Torriarents	Ht, II		0,78	n.d.	17,0	6,44	1,56	23,15	23,3	224,7
C10 <sub>P1</sub>	10-30	Torriarents	Ht, II		0,77	n.d.	23,0	6,31	1,51	18,80	17,0	121,3
C10 <sub>P2</sub>	30-60	Torriarents	Ht, II		0,84	n.d.	35,0	7,27	1,53	25,90	10,3	37,9

Profundidad de muestreo (Prof.); aluminio y hierro extraídos con oxalato (Al<sub>o</sub>, Fe<sub>o</sub>); hierro extraído con citrato-ditionito (Fe<sub>dc</sub>); retención de fosfato (ΔP); pH del extracto saturado (pH<sub>e.s.</sub>); conductividad eléctrica del extracto saturado (CE<sub>e.s.</sub>); capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE); materia orgánica (MO); fósforo Olsen (P Olsen); n.d. no determinado. Alofana aluminica (A), alofana muy aluminica (A\*), imogolita (Im), haloisita (Ht), ilita (II)

**Tabla 2.** Valores medios de los parámetros característicos de calidad física y de las curvas de succión de los suelos estudiados [ecuaciones (1)-(4)]

Suelo	ρ <sub>b</sub> (kg·m <sup>-3</sup> )	θ <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	θ <sub>r</sub> (m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	α (cm <sup>-1</sup> )	m (-)	n (-)	S (-)	h <sub>i</sub> (kPa)	MP <sub>10</sub> (m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	AU (m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )
N1 <sub>P1</sub>	0,57	0,668	0,248	0,031	0,197	6,584	0,232	5,94	0,183	0,226
N1 <sub>P2</sub>	0,60	0,705	0,342	0,025	0,036	4,921	0,117	8,02	0,053	0,186
N2 <sub>S</sub>	0,65	0,709	0,232	0,022	0,362	2,233	0,252	7,71	0,218	0,258
N2 <sub>P</sub>	0,55	0,680	0,245	0,046	0,269	1,940	0,217	7,24	0,201	0,203
N3 <sub>P1</sub>	0,61	0,687	0,341	0,050	0,343	1,521	0,135	4,03	0,201	0,147
N3 <sub>P2</sub>	1,06	0,587	0	0,104	0,036	1,037	0,018	23,70	0,051	0,104
N4 <sub>P</sub>	1,17	0,594	0,274	0,101	0,014	66,265	0,269	1,07	0,279	0,069
C1 <sub>S</sub>	0,84	0,621	0,250	0,035	0,265	1,870	0,102	8,99	0,152	0,187
C2 <sub>S</sub>	1,10	0,561	0,189	0,009	0,180	1,219	0,062	30,45	0,061	0,202
C2 <sub>P</sub>	1,06	0,615	0,163	0,036	0,098	2,938	0,066	10,93	0,091	0,220
C3 <sub>S</sub>	1,00	0,632	0,169	0,101	0,058	3,495	0,068	2,55	0,173	0,171
C3 <sub>P</sub>	1,01	0,631	0,187	0,079	0,141	1,697	0,072	5,44	0,162	0,176
C4 <sub>S</sub>	0,98	0,631	0,076	0,032	0,057	6,480	0,055	25,97	0,076	0,212
C4 <sub>P</sub>	0,99	0,638	0,118	0,012	0,164	1,214	0,054	94,40	0,051	0,210
C10 <sub>S</sub>	1,09	0,553	0,021	0,490	0,078	1,638	0,038	1,70	0,168	0,154
C10 <sub>P1</sub>	1,18	0,537	0,103	0,447	0,130	1,155	0,035	1,67	0,161	0,130
C10 <sub>P2</sub>	1,18	0,443	0,243	0,163	0,321	1,473	0,043	1,33	0,147	0,056
Rango óptimo	0,90-1,20*	-	-	-	-	-	≥ 0,035**	-	0,10*	0,10*

Densidad aparente (ρ<sub>b</sub>); contenido volumétrico de humedad a saturación (θ<sub>s</sub>); contenido volumétrico de humedad residual (θ<sub>r</sub>); parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten, ec. (1), (α, m, n); pendiente de la curva de retención en el punto de inflexión (S); valor de la succión en el punto de inflexión (h<sub>i</sub>); porosidad llena de aire (MP<sub>10</sub>); agua útil (AU). \*Reynolds et al. (2009); \*\*Dexter (2004a)

Para el ajuste de las curvas de retención de agua se ha utilizado el modelo de van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (1)$$

donde θ(h) es el contenido de humedad volumétrico predicho en función de la succión, h; θ<sub>r</sub>, θ<sub>s</sub> son los contenidos volumétricos de humedad residual y a saturación, respectivamente; α, n, m son parámetros de

ajuste de la curva, y S<sub>e</sub> es la saturación efectiva. Para la estimación de los parámetros se utilizó el programa informático SHIPFIT (Soil Hydraulic Properties Fitting) (Durner, 1995).

Dexter (2004a) propone la siguiente expresión de S en términos de los parámetros de ajuste de van Genuchten:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-(1+m)} \quad (2)$$

Para la aproximación  $m=1-1/n$  la expresión anterior se transforma en:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left( \frac{2n-1}{n-1} \right)^{\left( \frac{1}{n-2} \right)} \quad (3)$$

El valor de la succión ( $h_i$ ) y del contenido de agua ( $\theta_i$ ) en el punto de inflexión vienen dados por:

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1}{m} \right)^{\frac{1}{n}}; \quad \theta_i = (\theta_s - \theta_r) \left( 1 + \frac{1}{m} \right)^{-m} + \theta_r \quad (4)$$

donde el contenido de humedad,  $\theta$ , se expresa en  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .  $S$  toma valores negativos, pero a efectos comparativos se evalúa en valor absoluto. En términos de distribución de tamaños de poros, el máximo de la distribución se correspondería con el punto de inflexión de la curva de retención, y por tanto  $S$  estaría relacionado con la mayor frecuencia de un determinado tamaño de poros (moda de los poros) (Reynolds et al., 2009).

Consideramos la porosidad total como el contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ) y determinamos la denominada porosidad llena de aire,  $MP_{10}$  (capacidad para almacenar o proveer aire en el suelo) y el agua útil,  $AU$  (capacidad para almacenar o proveer agua disponible para el desarrollo vegetal) a partir de los contenidos de agua a 10 y 1.500 kPa de succión, según  $MP_{10} = \theta_s - \theta_{10 \text{ kPa}}$  y  $AU = \theta_{10 \text{ kPa}} - \theta_{1500 \text{ kPa}}$  (Tabla 2).

### 3.- Resultados y discusión

En la Figura 1 se comparan las curvas de retención de agua gravimétrica representativas de los suelos naturales y cultivados, respectivamente. Los valores de retención se han expresado en términos de humedad gravimétrica, por su interés al reflejar la elevada capacidad de retención de agua de los suelos alofánicos. Los suelos estudiados muestran diversos tipos de curvas. Los contenidos de humedad obtenidos fueron elevados pero inferiores a los encontrados en la bibliografía para suelos volcánicos, generalmente asociados a Andosoles de regiones con abundantes precipitaciones (Maeda et al., 1977; Maeda y Soma, 1986; van Ranst et al., 2002).

Los suelos naturales  $N1_{P1}$ ,  $N2_S$  y  $N3_{P1}$  presentaron curvas de retención de agua gravimétrica similares, con una importante cesión de agua en el rango de  $pF$  1,4-2,4 (2,5-25,1 kPa), en el que pierden un 30-35 % de agua. Estos suelos presentaron los mayores promedios de porosidad total o retención de agua a saturación,  $\theta_s$  (alrededor de 110-120 %), mientras que los menores valores se obtuvieron en los suelos  $N3_{P2}$  y  $N4_P$ , con un 55 %. Los suelos  $N1_{P2}$  y  $N3_{P2}$  mostraron un comportamiento “arcilloso”, con valores elevados de retención de agua tanto a bajas como a altas succiones (pero con diferente escala). Por el contrario, el suelo  $N4$  mostró un comportamiento “arenoso”, con un

salto brusco a partir de  $pF$  1 (1 kPa), asociado a una importante liberación de agua a succiones bajas, pero manteniendo contenidos de agua a  $pF$  4,2 (1.500 kPa) relativamente elevados, del orden de 22 %. En cuanto a los suelos cultivados, los contenidos de agua a saturación oscilaron entre un 42 (suelo  $C10_{P-2}$ ) y 75 % ( $C1_S$ ). El Andisol  $C1$  y los suelos ándicos  $C2$ ,  $C3$  y  $C4$  mostraron curvas de retención de humedad gravimétrica similares, con valores de  $\theta_s$  entorno al 60-75 %, y con una pérdida significativa de agua a partir de  $pF$  0,5-1,5 (0,31-3,1 kPa). A partir de este valor de succión se observa una cesión de agua más o menos gradual hasta  $pF$  4,2 (1.500 kPa), manteniendo valores notablemente elevados (30-40 %). El suelo menos ándico  $C10$  muestra los menores valores de retención de agua a lo largo de todo el rango de succión, con una liberación gradual de agua desde los primeros valores de succión. Este suelo presentó una zona “plana” entre  $pF$  2 y 3 (10 y 100 kPa), similar a la mostrada por Dorel et al. (2000) en un Nitisol de características mineralógicas similares a las de este suelo. Este tipo de curva estaría asociada a una porosidad constituida principalmente por macro y microporos, mientras que la observada en el suelo  $C1$  se podría atribuir a la presencia de una importante variedad de rangos de poros interconectados (Armas-Espinel et al., 2003). Los suelos  $C2$ ,  $C3$  y  $C4$  presentaron un comportamiento intermedio entre estos dos suelos.

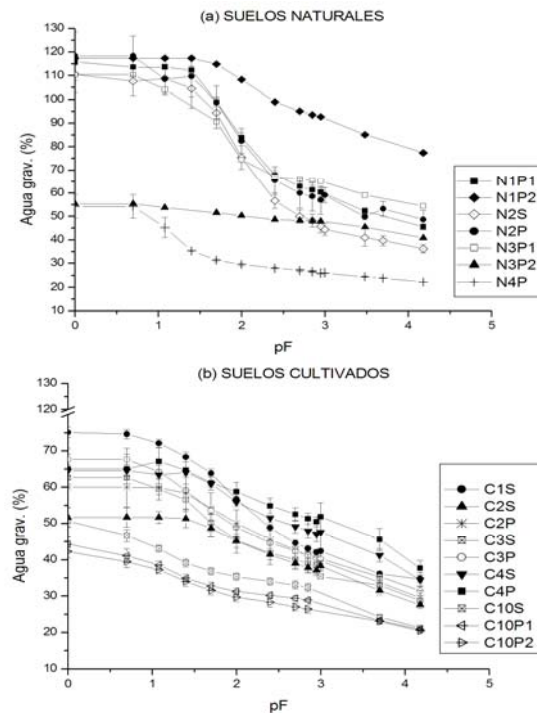


Fig. 1. Curvas de retención de agua, expresada como contenido gravimétrico, de los suelos naturales (a) y cultivados (b) en función de la succión,  $h$  (cm), expresada como  $pF = \log(h)$ . Las barras representan el error típico de la media

Los valores de  $S$  de los suelos estudiados oscilaron entre 0,018 y 0,382 y fueron en general superiores a 0,05,

lo que indicaría conforme a la clasificación propuesta por Dexter (2004), que estos suelos presentarían una calidad física muy buena, con excepción del suelo C10, que presentó valores de  $S \leq 0,035$ , asociado por tanto a una pobre estructura del suelo, y el suelo N3<sub>P2</sub> con  $S < 0,02$  (muy pobre). En los suelos cultivados, no se observaron diferencias significativas por profundidad de muestreo, mientras que en los suelos naturales,  $S$  fue superior en los horizontes superficiales. Estos valores son similares a los presentados por Tormena et al. (2008) en un Oxisol bajo distintos sistemas de cultivo (en este trabajo,  $S$  oscila entre 0,021 y 0,072), y por Pires et al. (2008) en dos Ferrasoles y un Nitosol de Brasil ( $S$  varía entre 0,027 y 0,059). Silva et al. (2012) obtienen valores de  $S$  también elevados, entorno a 0,12-0,15, en un Oxisol forestal del Amazonas, que descienden a valores próximos a 0,04-0,05 en el suelo cultivado (tras 2 años de cultivo convencional) y en abandono (tras 4 y 8 años). Estos valores son también comparables a los obtenidos en un conjunto de suelos volcánicos europeos con diferentes propiedades y condiciones de manejo (determinados a partir de los parámetros de van Genuchten, recopilados por Basile et al. 2007). La succión en el punto de inflexión,  $h_i$ , osciló entre 0,5 y 84,6 kPa para los suelos cultivados y entre 1 y 23,7 kPa para los suelos naturales. Los valores medios están alrededor de 10 kPa, es decir asociado a mesoporos.

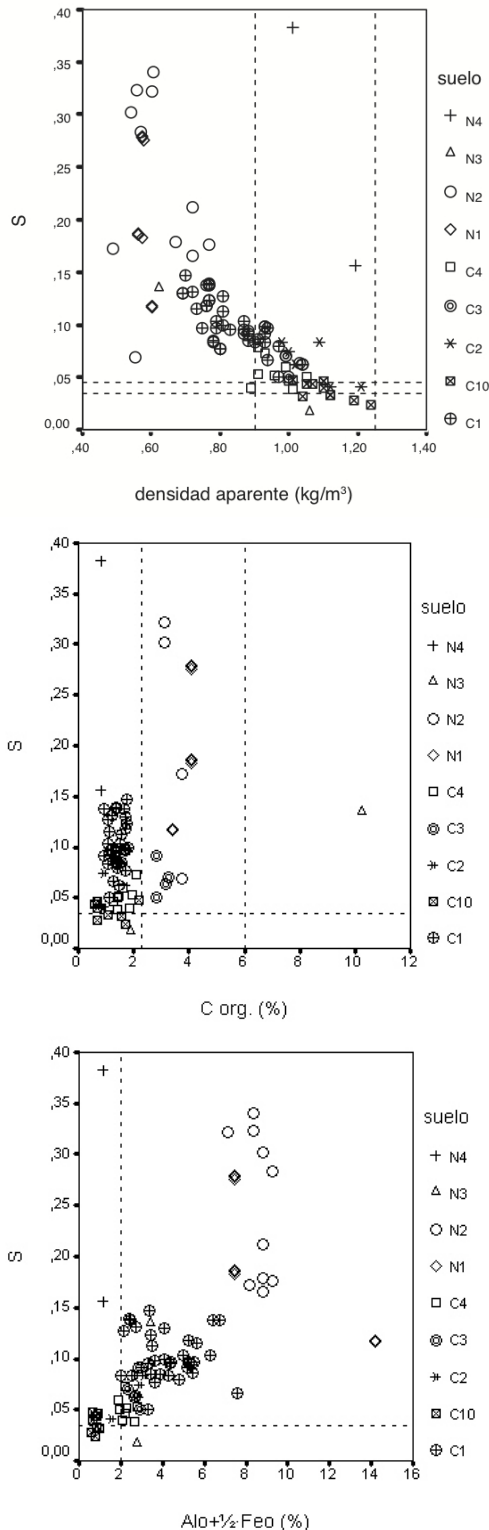
El parámetro  $S$  tendió en general a disminuir con la densidad aparente y aumentar con el contenido en materia orgánica ( $C_{org}$ ) (Figura 2). Según los valores críticos de  $S$  y el carbono orgánico total (rango óptimo 2,3-6 %  $C_{org}$ , según Reynolds et al., 2009), los suelos estudiados tienen una adecuada calidad física, salvo varias muestras del suelo C10, que presentan valores de  $S < 0,035$  y  $C_{org} < 2,3$  %. Estas tendencias son similares a las presentadas por diversos autores (Dexter, 2004a; Osuna-Ceja et al., 2006; Kutlu y Ersahin, 2008; Vieira Cavalieri et al., 2009; Garg et al., 2009). Según esta relación, la densidad aparente crítica ( $\rho_b$  para la que  $S = 0,035$ ) para el conjunto de los suelos de este trabajo es de aproximadamente  $1,10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , según se deduce de la Figura 2. En otros estudios, este valor crítico corresponde a un valor de  $\rho_b = 1,67$  (Garg et al., 2009),  $1,43$  (Kutlu y Ersahin, 2008),  $1,27$  (Vieira Cavalieri et al., 2009) y  $1,20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Li et al., 2011). Tormena et al. (2008) en un Oxisol de Brasil obtienen un valor más próximo al de nuestro trabajo ( $1,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Se debe tener en cuenta que los rangos óptimos de  $\rho_b$  ( $0,9$ - $1,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) según la bibliografía citada por Reynolds et al. (2009), no abarcan la totalidad del rango observado en los suelos ándicos estudiados, que presentan en general valores de  $\rho_b \leq 1,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Andrade y Stone (2009) sugieren como límites críticos en suelos tropicales de Brasil los valores de  $S = 0,045$ , para separar suelos con una buena estructura de suelos degradados, y  $S \leq 0,025$ , para suelos con una estructura degradada completamente, en lugar de los valores de  $S = 0,035$  y  $0,020$ , respectivamente, propuestos por Dexter (2004a). Este mayor valor de  $S$  definido por estos autores se

relacionó mejor para estos suelos con los límites más estrechos de densidad aparente y valores de macroporosidad, porosidad total y relación entre macro y microporos óptimos para el crecimiento de las plantas adoptados por estos autores. Calonego y Rosolem (2011) en un estudio sobre el efecto de la rotación de cultivos en un Nitosol de Brasil, también señalan el límite de  $S = 0,045$  como un valor más apropiado para usar como índice de calidad, obteniendo valores de  $S = 0,05$  en el horizonte superficial y del orden de 0,02-0,03 en los de mayor profundidad. Según este nuevo criterio, varias muestras de los suelos C2, C4 y C10, con  $S < 0,045$ , presentarían una pobre calidad física, estando asociadas a valores de  $\rho_b > 0,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y  $(\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\cdot\text{Fe}_0) < 2$  % (suelo C10 y dos muestras del suelo C2). Varias muestras del suelo C4, con  $S \leq 0,05$  y  $\rho_b > 0,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , presentaron valores de conductividad hidráulica saturada muy baja ( $K_{SL} < 2,22\cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), estando asociadas a valores de succión en el punto de inflexión elevados, superiores a  $pF$  2,7 (50,1 kPa). Destaca también el suelo N3<sub>P2</sub>, con  $S = 0,018$ , que presenta una importante compactación en campo y baja permeabilidad. Las muestras desviantes del suelo N4 presentan valores muy elevados del parámetro  $n$ , del orden de 60 a 70, estando asociadas a curvas con una pérdida destacada de agua a bajas succiones, lo que indicaría que el parámetro  $S$  no es aplicable en suelos con una elevada macroporosidad, como es el caso del suelo N4 (Vieira Cavalieri et al., 2009; Reynolds et al., 2009). Andrade y Stone (2009) presentan la siguiente relación obtenida a partir de bases de datos de suelos de Brasil:  $\rho_b = -7,02\cdot S + 1,62$ , para texturas arcillosas. Para densidades de, por ejemplo,  $0,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , los valores de  $S$  estimados a partir de esta relación, serían de 0,117, que se corresponden aproximadamente con los valores obtenidos en los suelos de nuestro estudio.

En relación con el resto de indicadores, el parámetro  $S$  muestra una relación positiva con la porosidad total ( $\theta_s$ ) (como era de esperar, considerando la relación con  $\rho_b$ ), la porosidad llena de aire,  $MP_{10}$ , el agua útil,  $AU$ , y el contenido en  $(\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\cdot\text{Fe}_0)$  (Figura 2). Según los valores críticos descritos en la bibliografía para  $MP_{10}$  y  $AU$  (valores óptimos  $> 0,10 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ , según Reynolds et al., 2009), los suelos estudiados tienen una adecuada calidad física, salvo el suelo N3<sub>P2</sub>, con valores de  $S < 0,035$  y  $MP_{10} < 10$  %, y algunas muestras del suelo menos ándico, C10, que presentan valores de  $S < 0,035$ . En la relación de  $S$  con la materia orgánica y  $(\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\cdot\text{Fe}_0)$ , el suelo N4 se separa de nuevo de la tendencia general, lo que indicaría que la estabilidad estructural de este suelo no depende de los contenidos en carbono orgánico ni  $(\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\cdot\text{Fe}_0)$ .

En resumen, la gran variabilidad de las curvas características obtenidas refleja las diferentes mineralogías y contenidos en materia orgánica de los suelos estudiados. En cuanto a los valores de  $S$  obtenidos en este trabajo, hay que resaltar que son en general bastante elevados en relación con los descritos en la bibliografía consultada.



**Fig. 2.** Relación del parámetro S con la densidad aparente, el carbono orgánico total ( $C_{org}$ ) y el contenido en  $(Al_0+1/2 \cdot Fe_0)$  por suelos. Las líneas discontinuas horizontales indican los valores críticos de  $S = 0,035$  y  $S = 0,045$ , propuestos por Dexter (2004) y Andrade y Stone (2009), respectivamente. Las líneas discontinuas verticales representan los rangos óptimos según Reynolds et al. (2009)

#### 4.- Conclusiones

Los elevados valores de S obtenidos en este estudio parecen responder tanto a la influencia de los materiales amorfos como a la de los óxi-hidróxidos cristalinos de hierro. Los resultados apoyan recientes estudios en suelos tropicales que apuntan a la necesidad de reconsiderar los límites del parámetro S en relación con la calidad física de los suelos. Asimismo, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de combinar S con otro índice de calidad física, especialmente, estabilidad estructural, a la hora de evaluar la calidad física de los suelos.

#### 5.- Bibliografía

Andrade, R.S. y L.F. Stone, 2009. O índice S como indicador da qualidade física de solos do Cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 382-388.

Armas-Espinel, S., J.M. Hernández-Moreno, R. Muñoz-Carpena, y C.M. Regalado, 2003. Physical properties of volcanic clayey soils in relation to diagnostic Andic parameters. *Geoderma*, 117, 297-311.

Asgarzadeh, H., M.R. Mosaddeghi, A.A. Mahboubi, A. Nosrati, y A.R. Dexter, 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil*, 335, 229-244.

Basile, A., A. Coppola, R. de Mascellis, G. Mele y F. Terribile, 2007. A comparative analysis of the pore system in volcanic soils by means of water-retention measurements and image analysis. *En: Soils of volcanic regions of Europe*. Ed. Arnalds, O., Bartoli, F., Buurman, P., García-Rodeja, E., Oskarsson, H. y Stoops, G., Springer Verlag, 493-513.

Blakemore, L.C., P.L. Searle y B.K. Daly, 1987. Methods of chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau. Lower Hutt, New Zealand. Scientific Report 80, 44-45.

Calonego, J.C. y C.A. Rosolem, 2011. Soil water retention and S index alter crop rotation and chilesing. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 35, 1927-1937.

Cavaliere, K.M.V., A.P. Silva, C.A. Tormena, T.P. Leao, A.R. Dexter, y I. Hakansson, 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. *Soil Till. Res.*, 103, 158-164.

Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.

Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma*, 120, 215-226.

Dexter, A.R., 2004c. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120, 227-239.

Dexter, A.R. y E.A. Czyz, 2007. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land Degradation and Development*, 18, 369-381.

Dorel, M., J. Roger-Estrade, H. Manichon, y B. Delvaux, 2000. Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use Manage.*, 16, 133-140.

Durner, W., 1995. SHYPPFIT 0.24 User's Manual. Research Rep. 95.1. Department of Hydrology. University of Bayreuth. Bayreuth, Germany.

Garg, R.N., S.P. Mazumdar, S. Chattaraj, D. Chakraborty, R. Singh, M. Kumari, B. Saha, S.M. Trivedi, R. Kaur, K.H. Kamble, y R.K. Singh, 2009. Assessment of Soil Physical Conditions: Evaluation of a Single Value Index. *J. Agric. Physics*, 9, 9-19.

IUSS Working Group WRB, 2006. World Reference Base for Soil Resources. 2. World Soil Resources Reports no 103, UN Food and Agriculture Organization, Rome; 2006. p. 128.



- Klute, A. (ed.), 1986. *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd edition. Agronomy, vol. 9. ASA-SSSA, Madison. 1188.
- Klute, A. y C. Dirksen, 1986. Hydraulic Conductivity and Diffusivity. *En: Methods of Soil Analysis Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Klute, A. (ed.). ASA and SSSA, Madison, WI, 687-734.
- Kutlu, T. y S. Ersahin, 2008. Evaluation of soil physical quality in mollic ustifluent, typic ustifluent and typic usthorhent using Dexter's S-theory. *J. Food Agric. Environ.*, 6, 450-455.
- Li, L., K. Yin Chan, Y. Niu, G. Li, A. Oates, A. Dexter, y G. Huang, 2011. Soil physical qualities in an Oxic Paleustalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. *Soil Till. Res.*, 113, 82-88.
- Maeda, T. y K. Soma, 1986. Physical properties. *En: "Ando Soils in Japan"*. K. Wada (ed.). Kyushu University Press, Fukuska, Japan, pp. 99-111.
- Maeda, T., H. Takenada, y B.P. Warkentin, 1977. Physical properties of allophane soils. *Adv. Agron.*, 29, 229-261.
- Mosaddeghi, M.R., M. Khatar, A.R. Dexter, y A.A. Mahboubi, 2008. Water characteristic curve and physical quality of soil as influenced by water salinity and sodicity. 2<sup>nd</sup> International Salinity Forum: Salinity, Water and Society Global issues, local action, March 31<sup>th</sup>-April 3<sup>rd</sup>, Adelaide, South Australia, on CD-ROM.
- Olsen, S., C. Cole, F. Watanabe y L. Dean, 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular Nr 939, US Gov. Print. Office, Washington, D.C. pp. 1-19.
- Osuna-Ceja, E., B. Figueroa-Sandoval, K. Oleschko, M. Flores-Delgadillo, M. Martínez-Menes, y F. González-Cossío, 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, 40, 27-38.
- Pires, L.F., F.A.M. Cassaro, K. Richard, y O.O.S. Bacchi, 2008. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. *Soil Till. Res.*, 100, 72-77.
- Reynolds, W.D., B.T. Bowman, C.F. Drury, C.S. Tan, X. Lu, 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110, 131-146.
- Reynolds, W.D., C.F. Drury, C.S. Tan, C.A. Fox, y X.M. Yang, 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152 (3-4), 252-263.
- Silva, G.L., H.V. Lima, M.M. Campanha, R.J. Gilkes, y T.S. Oliveira, 2011. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167-168, 61-70.
- Silva Guedes, E.M., A. Rodrigues Fernández, H. Veras de Lima, A. Pereira Serra, J. Ribamar Costa, y R. da Silva Guedes, 2012. Impacts of different management systems on the physical quality of an Amazonian Oxisol. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 36, 1269-1277.
- Soil Survey Staff, 1998. *Keys to Soil Taxonomy*, 8th ed. U.S.D.A.- NRCS, Lincoln.
- Topp, G.C., W.D. Reynolds, F.J. Cook, J.M. Kirby, y M.R. Carter, 1997. Physical attributes of soil quality. *En: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (eds.), Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Dev. Soil Sci., vol. 25. Elsevier, New York, NY, pp. 21-58.*
- Tormena, C.A., A.P. da Silva, S. Del Carmen-Imhoff, y A.R. Dexter, 2008. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 65 (1), 56-60.
- van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- van Ranst, E., S.R. Utami, y J. Shamshuddin, 2002. Andisols on volcanic ash from Java Island, Indonesia: Physico-chemical properties and classification. *Soil Sci.*, 167 (1), 68-79.
- Vieira, K.M., A.P. da Silva, C.A. Tormena, T. Paiva, A.R. Dexter, y I. Håkansson, 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.*, 103, 158-164.
- Walkley, A. y I.A. Black, 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37, 29-38.