

Retención de agua en suelos de cítricos con manejo ecológico y con manejo convencional. Modelos de regresión

F. Ingelmo*, **M. Villalba*** y **F. Pomares****

*Centro de Investigaciones sobre Desertificación, CIDE (CSIC-UV-GV). Apartado Oficial. 46470, Albal (Valencia).

**Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, IVIA. Apartado Oficial. 46113 Moncada (Valencia)

RESUMEN

Hemos estudiado con un método experimental normalizado las características de retención de agua de 43 muestras de tierra fina compactadas y sin compactar, procedentes de suelos dedicados al cultivo de cítricos con manejo ecológico (22) y con manejo convencional (21), así como sus características intrínsecas relativas a: textura; contenido en carbonatos; y materia orgánica. El % de arcilla varió entre un 5% y un 49%, siendo ligeramente más arenosas las muestras del manejo ecológico, que sin embargo presentaron un mayor contenido en materia orgánica, con los valores más frecuentes comprendidos en el intervalo 1,5% - 3,5%. La compactación supuso un aumento de la porosidad útil pero no dio lugar a un aumento de la precisión del método de caracterización hídrica de las muestras. Realizamos un análisis de regresión lineal múltiple paso a paso con la humedad volumétrica a cada succión mátrica como variable dependiente, y con las características intrínsecas como variables independientes. Previamente, los valores de cada parámetro fueron normalizados en relación con su media armónica. La mayor explicación de la varianza se consiguió en las muestras del manejo ecológico (>90%) con la textura y con la materia orgánica, para succiones mayores que 20 KPa, tanto en muestras compactadas como sin compactar.

INTRODUCCIÓN

El suelo, junto con el clima y el sistema de manejo del cultivo, constituyen un sistema dinámico del que depende su fertilidad para el desarrollo de las plantas. La producción vegetal está en función de la interacción de los componentes de dicho sistema y, por lo tanto, de la naturaleza y características de cada uno de ellos (Monnier, Stengel y Guerif, 1982). El agua en las condiciones climáticas mediterráneas es un recurso natural escaso; por ello, su uso racional y eficiente, implica el conocimiento de los caracteres físicos del suelo, en especial los relacionados con la naturaleza de sus constituyentes y con la distribución de su espacio poroso, que condicionan las características de su retención y de su movimiento (Ingelmo y Cuadrado, 1986).

En el contexto de la producción agrícola, ya sea convencional, ecológica o integrada, es importante poder conocer la capacidad de retención del agua en el suelo para la correcta administración del riego. Es necesario por lo tanto elaborar protocolos normalizados para su determinación. Bruand *et al.* (1996) proponen que la determinación de la capacidad de retención de agua en el suelo se realice sobre muestras sin alteración de su estructura, lo cual, para suelos de diferente textura, desde arenosos a arcillosos, por tener diferentes sistemas de porosidad, exigiría trabajar con muestras de muy diferente volumen y, como señala McKeague *et al.* (1984) con muy diferentes tiempos de equilibrio para cada valor de succión en la curva característica de humedad del suelo, con lo cual la normalización experimental no sería posible.

Rose (1991) asume que la estructura de un suelo es una propiedad lábil y transitoria del mismo que, sobre todo en suelos agrícolas, puede alterarse por el manejo, de manera que la determinación de las propiedades físicas del suelo *in situ* o en muestras inalteradas en el laboratorio representa sólo uno de los muchos posibles estados estructurales del suelo y que además puede estar afectada por el estado de humedad del suelo durante el muestreo o durante la determinación. Sobre esta base, propone que se determine la curva característica de humedad del suelo sobre muestra alterada, constituida por partículas o agregados de tierra fina (<2 mm), que configuran un modelo bimodal de la distribución de la porosidad entre microagregados y macroagregados en el cual la microporosidad es una propiedad esencialmente invariante ligada a las características intrínsecas y al sistema de manejo del suelo, y la macroporosidad puede variarse experimentalmente (por ejemplo, al compactar las muestras).

Por otra parte, desde el punto de vista de la influencia del sistema de manejo del cultivo de cítricos en las características intrínsecas del suelo, Albiach (1997) encontró diferencias significativas al nivel del 99%, favorables al manejo ecológico en relación con el manejo convencional, en el contenido de materia orgánica, de ácidos húmicos, de carbohidratos, y de gomas microbianas, que indican una mayor integración de la materia orgánica en el suelo, lo que da lugar a un mayor contenido de agregados estables con un mayor diámetro medio ponderado, a una mayor actividad enzimática, y a una mayor biomasa microbiana. Cabe esperar por ello que dicha mayor integración de la materia orgánica, debida al manejo ecológico del cultivo de cítricos, en suelos de similares características texturales y de localización que los relativos al manejo convencional, incida también en las características de retención de agua de los mismos.

Bajo estas consideraciones, el objetivo del trabajo que presentamos es doble: por una parte queremos desarrollar un protocolo experimental estándar para la determinación de la curva característica de humedad del suelo en muestras con alteración de la estructura, que impone las mismas condiciones experimentales para el conjunto de las muestras, y por otra, investigar modelos de regresión lineal múltiple que sirvan para la predicción de la retención de agua de los suelos, en función la textura, la materia orgánica y el contenido en carbonatos, como características intrínsecas de la matriz del suelo que condicionan su estructura.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se han muestreado los 15 primeros cm del perfil de 43 suelos de la Comunidad Valenciana dedicados al cultivo de cítricos. Dentro de la misma localización zonal se muestrearon suelos manejados convencionalmente y suelos manejados con el sistema de manejo ecológico, de manera que, en conjunto, 21 muestras de suelo correspondieron al sistema de manejo convencional y 22 al sistema de manejo ecológico. Secamos dichas muestras al aire, las tamizamos individualmente para conseguir agregados de suelo de diámetro equivalente <2 mm, y determinamos su textura, su contenido en carbono oxidable

y su contenido en carbonatos siguiendo los protocolos correspondientes de los Métodos Oficiales de Análisis de Suelos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 1986).

Para la determinación normalizada de la curva característica de humedad de las muestras, con los agregados secos al aire de cada una de ellas llenamos anillos de 4,70 cm de diámetro y 1,65 cm de altura, añadiendo sobre los mismos muestra en exceso y enrasando. Antes de enrasar, la mitad de los anillos se sometieron a una compactación normalizada que se logró ejerciendo sobre cada muestra la presión de 6 KPa durante 10 s. Con este modo de proceder estándar conseguimos para cada muestra de cada sistema de manejo alícuotas del mismo volumen aparente inicial, pero con diferente macroporosidad según que las mismas se compactasen o no.

Utilizamos para todos los puntos de la curva característica de humedad la técnica estándar de la cámara de presión de Richards (Klute, 1986), con placas de presión de cerámica porosa con valores de presión de entrada de aire comprendidos entre 100 KPa y 1500 KPa. Todos los contenidos de agua de las muestras se determinaron gravimétricamente y se expresaron después como contenido volumétrico multiplicando aquél valor por el de la densidad aparente final en equilibrio con cada valor de diferencia de presión (0,1 KPa; 1 KPa; 10 KPa; 20 KPa; 50 KPa y 1500 KPa). En cada una de las determinaciones, cada placa de presión contenía un mínimo de 12 anillos, correspondientes a ambos sistemas de manejo para muestras compactadas y sin compactar. Los tiempos de equilibrio para cada valor de diferencia de presión fueron acumulativos por períodos de 24 h.

Para efectuar el análisis de regresión paso a paso (SPSS, 1993) los valores experimentales de humedad volumétrica en equilibrio con cada una de las diferencias de presión para cada sistema de manejo en muestras compactadas y sin compactar (variable dependiente), así como los correspondientes a los porcentajes de limo + arcilla; de materia orgánica y de carbonatos (variables independientes) fueron previamente normalizados mediante un procedimiento que consiste en hallar primero la media armónica de cada conjunto de datos y después los factores de escala (Ahuja *et al.* 1991), que resultan del cociente entre dicha media armónica y el valor puntual de cada muestra. De esta manera, la media aritmética de cada conjunto de factores de escala es igual a la unidad. Este análisis se realizó para los cuatro siguientes grupos de muestras: 1) muestras del manejo ecológico, sin compactar. 2) muestras del manejo ecológico, compactado. 3) muestras del manejo convencional, sin compactar. 4) muestras del manejo convencional, compactado.

RESULTADOS

Parámetro estadístico	Arcilla	Limo	Arena	Carbonatos	Materia orgánica	Densidad aparente inicial (*)	
						Sin compactación	Con compactación
	%	%	%	%	%		
Media aritmética	27,5	35,0	37,5	24,3	1,97	1047	1145
Valor máximo	49,4	54,9	74,3	67,5	4,70	1176	1288
Valor mínimo	12,4	13,3	12,3	0,2	0,91	932	1013
Desviación estándar	9,0	10,0	16,2	19,4	0,85	70	86
Media armónica	24,5	31,5	29,8	3,3	1,72	1043	1139

Tabla 1a. Análisis estadístico de las características intrínsecas y de la densidad aparente inicial de las muestras del sistema de manejo convencional. Número de muestras 21. (*) Valor medio de 12 repeticiones.

Parámetro estadístico	Arcilla	Limo	Arena	Carbonatos	Materia orgánica	Densidad aparente inicial (*) Kg.m ³	
	%	%	%	%	%	Sin compactación	Con compactación
Media aritmética	23,5	33,4	43,2	21,5	2,47	1044	1142
Valor máximo	40,0	57,6	87,6	63,0	3,70	1285	1352
Valor mínimo	5,0	7,4	12,1	0,5	0,73	913	1001
Desviación estándar	8,1	12,9	19,1	18,9	0,75	88	91
Media armónica	18,7	26,7	34,9	3,9	2,14	1037	1135

Tabla 1b. Análisis estadístico de las características intrínsecas y de la densidad aparente inicial de las muestras del sistema de manejo ecológico. Número de muestras 22. (*) Valor medio de 12 repeticiones.

En las Tablas 1a y 1b se muestran los resultados del análisis estadístico de las características intrínsecas y de los valores de la densidad aparente inicial de las muestras sin compactación y con compactación normalizada de cada sistema de manejo. Las muestras del manejo ecológico son menos arcillosas que las del convencional pero, su contenido medio de materia orgánica es un 25% más alto que en el convencional. En ambos tipos de manejo destacan los valores muy bajos de los valores medios armónicos del contenido en carbonatos, como consecuencia de la alta diferencia entre los valores máximo y mínimo del mismo. La mayor presencia de la materia orgánica en las muestras del sistema de manejo ecológico explica sus menores valores medios, mínimos y armónicos de la densidad aparente inicial; el mayor porcentaje de muestras de la clase textural arenosa en este sistema de manejo explica los valores máximos más altos de la densidad aparente inicial. Destaca también que la desviación estándar de los valores de la densidad aparente inicial son superiores cuando se compactan las muestras.

En la Tabla 2 se presentan los valores armónicos de la humedad volumétrica (%; v/v) en equilibrio con cada una de las diferencias sucesivas de presión, para las muestras compactadas y sin compactar de los sistemas de manejo convencional y ecológico.

Succión (KPa)	Humedad volumétrica (%; v/v)			
	Manejo convencional		Manejo ecológico	
	Sin compactación	Con compactación	Sin compactación	Con compactación
0,1	52,5	53,4	53,1	54,0
1	43,4	43,3	41,9	41,5
10	32,6	34,7	29,2	32,0
20	27,1	29,5	23,7	26,3
50	22,3	25,2	19,5	21,7
1500	11,8	12,3	10,3	10,5
Porosidad de drenaje	25,4	23,9	29,4	27,7
Porosidad útil	15,3	17,2	13,4	15,8

Tabla 2. Valores medios armónicos de la humedad volumétrica a cada valor de succión, de las muestras sin compactación y con compactación normalizada de los sistemas de manejo convencional y ecológico.

En general, el conjunto de los valores son superiores para el sistema de manejo convencional, debido posiblemente a su mayor contenido en arcilla. Sin embargo si consideramos la variación con la succión de la capacidad diferencial de cesión de agua, deducimos que en el punto correspondiente a 20 KPa se alcanza el punto de inflexión de las curvas, de manera que podemos considerar dicho valor de succión como un valor límite en la distribución por tamaños de la porosidad de las muestras: por debajo de dicho límite, y hasta la saturación (0,1 KPa), la macroporosidad o porosidad de drenaje, y por encima del mismo, y hasta el punto de marchitamiento permanente (1500 KPa), la microporosidad o porosidad útil (Ingelmo y Cuadrado, 1986). Al respecto, Bruand *et al.*

(1996) señala que en muestras sin alteración de la estructura, para una amplia gama textural de suelos, el valor de succión que delimita ambos sistemas de porosidad, se alcanza para 10 KPa.

Del análisis comparativo de estos dos parámetros para ambos sistemas de manejo deducimos que las muestras del manejo ecológico presentan una macroporosidad superior en un 16% a la correspondiente a las del manejo convencional, y que éstas presentan mayor porosidad útil debido a su mayor contenido en arcilla. Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Albiach (1997), que indican una mayor integración de la materia orgánica en el suelo, contribuyendo a formar agregados de mayor tamaño y más estables, y por lo tanto a un aumento de la macroporosidad. En relación con el contraste experimental de si las muestras se compactan o no se compactan deducimos que con la compactación disminuye la porosidad de drenaje y aumenta la porosidad útil para las muestras de ambos sistemas de manejo, lo que coincide con lo señalado por Shafiq *et al.* (1994).

Por lo que se refiere al análisis de regresión lineal múltiple paso a paso (SSPS, 1993), la expresión general de la ecuación de regresión lineal múltiple con los factores de escala a, es la siguiente:

$$\alpha_{Hv} = a \alpha_{CO_3} + b \alpha_{L+A} + c \alpha_{MO} + d \quad (1)$$

Donde a, b y c son los coeficientes de carga de las tres características intrínsecas de las muestras consideradas como variables independientes explicativas de su capacidad de retención de agua, y d es una constante. En las Tablas 3a, 3b, 4a, y 4b se muestran los valores de los mismos, junto con los de sus correspondientes errores, los valores de la varianza explicada y del error estándar, para las muestras del manejo convencional y para las muestras del manejo ecológico, en los casos en los que la retención de agua se ha determinado experimentalmente en muestras sin compactar y en los que dicha determinación se realizó con compactación normalizada.

Parámetro estadístico	Succión (KPa)					
	0,1	1	10	20	50	1500
a	0,0037	0,0165	0,0437	0,0288	0,0210	0,0108
Error de a	0,0139	0,0195	0,0113	0,0168	0,0186	0,0277
b	-0,0275	0,0227	0,0401	0,3319	0,5357	0,6313
Error de b	0,1351	0,1892	0,1093	0,1632	0,1803	0,2693
c	0,1343	0,0998	0,0204	-0,0103	-0,0652	-0,1144
Error de c	0,0819	0,1147	0,0662	0,0989	0,1093	0,1632
d	0,8895	0,8610	0,8959	0,6496	0,5086	0,4722
Error de d	0,1015	0,1421	0,0821	0,1227	0,1355	0,2023
r ² (ajustado)	0,0522	0,1241	0,7568	0,7096	0,7476	0,5525
Error estándar	0,0994	0,1393	0,0805	0,1202	0,1328	0,1983

Tabla 3a. Parámetros estadísticos del análisis de regresión paso a paso para las muestras no compactadas del sistema de manejo convencional.

Parámetro estadístico	Succión (KPa)					
	0,1	1	10	20	50	1500
a	0,0031	0,0099	0,0232	0,0197	-0,0047	0,0102
Error de a	0,0130	0,0204	0,0107	0,0172	0,0197	0,0278
b	-0,0092	0,1061	0,1693	0,3955	0,6868	0,6937
Error de b	0,1266	0,1976	0,1037	0,1665	0,1911	0,2697
c	0,1175	0,1101	0,0106	-0,0190	-0,1150	-0,0880
Error de c	0,0768	0,1198	0,0628	0,1009	0,1159	0,1635
d	0,8886	0,7738	0,7969	0,6038	0,4329	0,3841
Error de d	0,0952	0,1475	0,0779	0,1251	0,1436	0,2026
r ² (ajustado)	0,0537	0,1822	0,7182	0,6904	0,6815	0,6047
Error estándar	0,0932	0,1455	0,0760	0,1226	0,1407	0,1986

Tabla 3b. Parámetros estadísticos del análisis de regresión paso a paso para las muestras compactadas del sistema de manejo convencional.

Parámetro estadístico	Succión (KPa)					
	0,1	1	10	20	50	1500
a	-0,0070	0,0274	0,0088	0,0059	0,0006	-0,0120
Error de a	0,0076	0,0131	0,0184	0,0133	0,0135	0,0211
b	0,0051	0,0296	0,4332	0,5047	0,5921	0,4874
Error de b	0,0350	0,0601	0,0846	0,0611	0,0620	0,0972
c	0,1557	0,2259	0,2290	0,2576	0,2338	0,1533
Error de c	0,0452	0,0776	0,1093	0,0790	0,0801	0,1256
d	0,8462	0,7171	0,3290	0,2319	0,1734	0,3713
Error de d	0,0287	0,0493	0,0695	0,0502	0,0509	0,0799
r ² (ajustado)	0,6149	0,7367	0,8954	0,9557	0,9614	0,8519
Error estándar	0,0583	0,1002	0,1411	0,1020	0,1035	0,1622

Tabla 4a. Parámetros estadísticos del análisis de regresión paso a paso para las muestras no compactadas del sistema de manejo ecológico.

Parámetro estadístico	Succión (KPa)					
	0,1	1	10	20	50	1500
a	-0,0036	0,0111	0,0026	0,0044	0,0046	-0,0151
Error de a	0,0078	0,0131	0,0162	0,0152	0,0171	0,0233
b	-0,0179	0,0680	0,3821	0,5497	0,6542	0,5460
Error de b	0,0358	0,0605	0,0747	0,0698	0,0786	0,1074
c	0,1876	0,2591	0,1862	0,2267	0,1761	0,1152
Error de c	0,0462	0,0781	0,0965	0,0901	0,1015	0,1387
d	0,8339	0,6618	0,4291	0,2192	0,1652	0,3540
Error de d	0,0293	0,0497	0,0614	0,0573	0,0645	0,0882
r ² (ajustado)	0,6449	0,7714	0,8876	0,9462	0,9437	0,8382
Error estándar	0,0596	0,1009	0,1246	0,1164	0,1311	0,1792

Tabla 4b. Parámetros estadísticos del análisis de regresión paso a paso para las muestras compactadas del sistema de manejo ecológico.

Como puede observarse en las Tablas 3a y 3b en las muestras del manejo convencional, las ecuaciones de regresión explican muy poca varianza para valores de succión inferiores a 10 KPa. Para valores mayores o iguales que 10 KPa la varianza explicada alcanza valores próximos al 70%, siendo la variable (L+A) la de mayor carga para succiones mayores o iguales que 20 KPa. La MO no es significativa ya que el valor de su coeficiente de carga es muy bajo o negativo y casi siempre inferior al valor de su error. La misma tendencia se observa para las muestras convencionales compactadas, sólo que en este caso, desde los 10 KPa de succión, la contribución textural (L+A) a la explicación de la varianza es mayor. El análisis de correlación demostró que los factores de escala del contenido de carbonatos y los del contenido en materia orgánica se correlacionaron significativamente con los de textura (% L+A), con coeficientes de correlación respectivos de 0,82 (99,9% de probabilidad) y 0,552 (99% de probabilidad). No encontramos correlación significativa entre el factor de escala del contenido en carbonatos y el del contenido en materia orgánica.

En las muestras de manejo ecológico (Tablas 4a y 4b), la varianza explicada por las ecuaciones de regresión es mayor del 60% desde valores de succión de 0.1 KPa, siendo la M.O la variable con mayor coeficiente de carga para succiones inferiores a los 10 KPa, y alcanza sus máximos valores para las succiones de 20 y 50 KPa, donde llega al 95-96%, tanto en muestras compactadas como sin compactar. El mayor efecto explicativo de la varianza lo ejerce la variable (L+A) para succiones mayor que 10 KPa seguida de la variable MO. Los menores errores de los factores de carga de ambas variables se alcanzan para las succiones mayor o igual a 10 KPa e inferiores a 1500 KPa. Cabe observar que la acción de compactación normalizada de las muestras da lugar a que, a partir de succiones mayores o iguales que 20 KPa, la contribución de la variable textura sea mayor que en el caso de no compactación, y con errores similares, si bien la explicación de la varianza es algo menor desde succiones mayores o iguales que 10 KPa.

El análisis de correlación realizado para las muestras del sistema de manejo ecológico demostró que los factores de escala del contenido en carbonatos y los del contenido en materia orgánica se correlacionaron con los de textura (% L+A), con coeficientes de correlación respectivos de 0,574 (99% de probabilidad) y 0,837 (99,9% de probabilidad). Además, los factores de escala del contenido en carbonatos y los del contenido de materia orgánica se correlacionaron entre sí con un coeficiente de correlación de 0,574 (99% de probabilidad).

DISCUSIÓN

La determinación experimental normalizada de la curva característica de humedad en muestras con alteración de su estructura dentro de una amplia gama textural ha permitido obtener resultados reproducibles que muestran la influencia de la textura y de la materia orgánica de los suelos en su comportamiento hídrico y en relación con la distribución por tamaños de los sistemas de porosidad. Al respecto hemos demostrado que la compactación de las muestras altera únicamente su macroporosidad y da lugar a una menor precisión en los resultados. A semejanza de lo hallado por Bruand *et al.* (1996), el punto de inflexión de las curvas características de humedad, equivalente a la situación de capacidad de campo, se ha encontrado para valores inferiores a los 33 KPa.

Respecto al análisis de regresión lineal múltiple efectuado con factores de escala normalizados para las diferentes características intrínsecas (variables explicativas) y de los contenidos volumétricos de humedad en equilibrio con los diferentes valores de succión (variables dependientes), hemos encontrado resultados similares a los de Vereecken *et al.* (1989) y Kern (1995) que realizaron estimaciones de la retención de agua en suelos de diferente textura pero sin alteración de la estructura mediante regresión lineal múltiple, considerando como variables explicativas la densidad aparente, la textura y el contenido de carbono orgánico, con unos resultados interesantes desde el punto de vista de la fiabilidad de la predicción. En nuestro caso, al partir de muestra alterada, la influencia de la densidad aparente inicial de las muestras se ha considerado implícitamente al separar el análisis de cada sistema de manejo para muestras sin compactar o compactadas.

CONCLUSIONES

Hemos desarrollado un procedimiento experimental para la determinación de la curva característica de humedad de muestras de suelo correspondientes a diferentes sistemas de manejo dentro de una amplia gama textural y de materia orgánica. Paralelamente hemos demostrado que los suelos de cítricos con manejo ecológico tienen un mayor contenido de materia orgánica, que además se halla más integrada en la fracción mineral del suelo. Este hecho se traduce en que estos suelos soportan mejor la compactación, alcanzando valores menores de densidad aparente que las muestras de suelos del manejo convencional, y además en una respuesta hídrica más coherente. Así, las muestras del sistema de manejo ecológico presentan una mayor porosidad de drenaje por su mayor contenido en materia orgánica, y una menor porosidad útil, por ser ligeramente más arenosas que las del manejo convencional. Las ecuaciones de regresión lineal múltiple obtenidas para las muestras del sistema de manejo ecológico permiten estimar con elevada fiabilidad la capacidad de retención de agua de otros suelos dedicados al cultivo de cítricos con sistema de manejo ecológico, sustituyendo en las mismas los valores en % de las diferentes características intrínsecas y los de los valores medios armónicos de las Tablas 1b y 2.

REFERENCIAS

- Ahuja, L. R. y Williams, R. D. 1991. Scaling water characteristic and hydraulic conductivity based on the Gregson-Hector-McGowan approach. *Soil Science Society of America*, **55**: 308-319.
- Albiach, R. 1997. Estudio de varios índices de actividad biológica del suelo en relación a diferentes aportaciones de enmiendas orgánicas. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad de Valencia, 194 pp.
- Bruand, A., Duval, O., Gallimard, H., Darthout, R. y Jamage, M. 1996. Variabilité des propriétés de retention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, **3(1)**: 27-40.
- Ingelmo, F. y Cuadrado, S. 1986. El agua y el medio físico del suelo. Temas monográficos, Excma. Diputación provincial de Salamanca- Centro de Edafología y Biología Aplicada (C.S.I.C.). 18, 101 pp.
- Kern, J. S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Science Society of American Journal*, **59**: 1164-1141.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods,. En: *Methods of Soil analysis, part 1. Physical and mineralogical method* (Klute, A., ed), Chapter 26, 635-662 pp. Agronomy monograph n° 9, 2nd Ed. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison, USA.
- McKeague, J. A., Eillers, R. G., Thomasson, A. J., Reeve, M. J., Bouma, J., Grossman, R. B., Favrot, J. C., Rengel, M. y Strebel, O. 1984. Tentative assessment of survey approaches to the characterization and interpretation of air-water properties of soils. *Geoderma*, **34**: 69-100.
- Monnier, G., Stengel, P. y Guérif, J. 1982. Recherche de critères de la fertilité physique du sol et son évolution en fonction du système de culture. En *Évolution du niveau de fertilité des sols dans différents systèmes de culture: critères pour mesurer cette fertilité*. (F. Lanza, de.). Instituto Sperimentale Agronomico de Bari. Bari. 35-52 pp.
- Rose, D. E. 1991. The effect of long-continued organic manuring on some physical properties of soils. En *Advances in soil organic matter: the impact on agricultural and the environment*. (W. S. Wilson, ed.). Royal Society Chemical; Cambridge, 197-205 pp.
- Shafiq, M., Hassan, A. y Ahmad, S. 1994. Soil physical properties as influenced by induced compaction under laboratory and field conditions. *Soil & Tillage Research*, **29**: 13-22.
- SPSS. 1993. SPSS for Windows. Base system user's guide. Release 6.0. M. J. Norusis (de.). SPSS Inc. Chicago, Illinois, USA. 18, 311-365.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J. y Darius, P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. *Soil Science*, **148**: 389:403.