

## Indicadores de la labranza basados en la curva de retención de humedad del suelo <sup>a</sup>

*Indexes for tillage based on the soil water retention curve*

Maiby Pérez Darniz<sup>1</sup> y Adriana Florentino<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería Agrícola, [perezma@agr.ucv.ve](mailto:perezma@agr.ucv.ve). <sup>2</sup>Instituto de Edafología [florentinoa@agr.ucv.ve](mailto:florentinoa@agr.ucv.ve). Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela.

### RESUMEN

Basado en la premisa de que la curva de retención de humedad del suelo refleja adecuadamente los cambios en la trabajabilidad de suelos no plásticos o bien en condiciones naturales, se realizó esta investigación con el objetivo de estimar la trabajabilidad ( $H_{\text{inflex}}$ ), el límite húmedo para la labranza del suelo (LHL), el potencial mátrico de agua en el suelo en el punto de inflexión ( $pF_{\text{inflex}}$ ), el pF en el punto de inflexión ( $\log_{\text{inflex}}$ ) y la relación entre la capacidad de campo y el límite húmedo (CC/LHL) directamente de la curva ajustada de humedad de van Genuchten de muestras superficiales de suelos de la Colonia Agrícola de Turén. Conjuntamente, se generaron funciones de pedotransferencia (FP) que expresaron la relación entre los parámetros de la curva ajustada de humedad y el tamaño de partículas, densidad aparente y materia orgánica del suelo para la estimación de  $H_{\text{inflex}}$  y LHL. Los resultados mostraron una mayor humedad de trabajabilidad y LHL en los suelos con mejor condición estructural. Los indicadores  $pF_{\text{inflex}}$  y PMI evidenciaron una menor fuerza de retención en la condición de trabajabilidad de suelos de textura gruesa y media, superior en el suelo arcilloso e intermedio en el suelo bajo la condición natural de bosque preservado. A través del índice (CC/LHL) se reflejó la mayor dificultad para labrar el suelo compactado de textura arcillosa. Las funciones de pedotransferencia mostraron una alta efectividad para estimar indicadores de labranza.

**Palabras clave:** trabajabilidad, propiedades del suelo, límite húmedo, labranza, curva de retención de humedad

### ABSTRACT

Based on the hypothesis that the soil water retention curve is a good indicator to reflect changes in the workability of non plastic soils and those from natural conditions, a study was done to estimate the workability ( $H_{\text{inflex}}$ ), the upper tillage limit (UTL), the matric potential at the inflexion point ( $pF_{\text{inflex}}$ ), the pF at the inflexion point ( $\log_{\text{inflex}}$ ) and the relation between field capacity and the upper tillage limit (FC/UTL) estimated directly from the van Genuchten water retention curve of superficial layers of soils from Colonia Agrícola de Turén. At the same time, pedotransfer functions (FP) relating soil volumetric water content fitted by van Genuchten and particle size distribution, bulk density and organic matter were determined to estimate  $H_{\text{inflex}}$  and UTL. The results showed the highest water contents for workability and upper tillage limit ( $H_{\text{inflex}}$  and UTL) in better structured soils. The  $pF_{\text{inflex}}$  and PMI indicators showed a lower water retention force at the workability condition in most of the coarse and medium texture soils, higher in clay soil and medium in soil from natural condition under forest. Index FC/UTL showed the highest limitations for tillage in clay compacted soil and lower for the rest of the soils. Pedotransfer-functions showed to be highly effective to estimate  $H_{\text{inflex}}$  and UTL as workability indexes.

**Key words:** workability, soils properties, upper workability limit, tillage, water retention curve

## INTRODUCCIÓN

El contenido óptimo de humedad del suelo para la labranza (trabajabilidad) permite identificar el momento apropiado para realizar las operaciones de preparación del suelo, sin producir degradación física (Rounsevell y Jones, 1993; Droogers *et al.*, 1996; Dexter y Bird, 2001; De la Rosa *et al.*, 2003). La trabajabilidad se ubica dentro del intervalo de humedad del suelo comprendido entre los límites húmedo y seco para la labranza, siendo la misma comúnmente estimada a partir de las propiedades de plasticidad de los suelos, entre los que se menciona el 0,9 del límite inferior de plasticidad y el índice de consistencia (Utomo y Dexter, 1981; Mueller *et al.*, 1990; Mueller *et al.*, 2003). También se refiere ampliamente, al valor de la relación entre la capacidad de campo y el límite húmedo para la labranza (CC/LHL) como un buen indicador de los riesgos de deterioro del suelo frente al manejo mecanizado (Dexter *et al.*, 2005). A pesar que estos estimadores mencionados parecen adecuarse bien a algunas condiciones y tipos de suelos, las propiedades de plasticidad, en particular, no resultan adecuadas para estimar la humedad del suelo en la condición óptima y en los límites húmedo y seco para la labranza de suelos no plásticos (arenosos) o con amplio rango de distribución de poros (suelos no degradados o en condiciones naturales) (Dexter y Bird, 2001). Basado en ello, Dexter *et al.* (2005) proponen la predicción de indicadores de labranza a partir de la curva ajustada de humedad del suelo y de ecuaciones de pedotransferencia, estas últimas generadas de la relación funcional entre la curva ajustada de humedad y propiedades del suelo de fácil medición. De allí que, esta investigación realizada en suelos agrícolas no disturbados de la Colonia Agrícola de Turén, estado Portuguesa, se orientó a: i) caracterizar las propiedades y degradación física del suelo; ii) caracterizar indicadores de labranza estimados a partir de la curva ajustada de humedad; iii) analizar la relación de la capacidad de campo con el límite húmedo para la labranza estimados a partir de la curva ajustada de humedad y como un indicador del riesgo frente al manejo mecanizado y, iv) determinar la efectividad de las funciones de pedotransferencia en la estimación de la trabajabilidad y límite húmedo para la labranza.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento fue llevado a cabo en muestras superficiales de suelos representativos de la Colonia Agrícola de Turén estado Portuguesa, con características contrastantes desde el punto de vista de los contenidos de arena, limo y arcilla, materia orgánica y densidad aparente del suelo. Como base para el diseño del muestreo en campo, se siguió el criterio de los autores Da Silva *et al.* (1994). El muestreo en campo del suelo no alterado se realizó mediante un toma muestras tipo "Umland" (cilindros de 5 cm de diámetro x 5 cm de altura) en la condición de humedad del suelo cercana al límite inferior de plasticidad y en la capa superficial a la profundidad de 0-6 cm en 17 sitios de muestreo (Pérez, 2008). Durante el procedimiento, se tomaron 10 cilindros de suelo por sitio, para un total de 170 cilindros de suelo no alterado. Las muestras alteradas de suelo, fueron recolectadas posteriormente a la toma de muestras no alteradas y a la misma profundidad del suelo en cada sitio. Para la determinación de las curvas de humedad en laboratorio, se siguió la metodología descrita por Da Silva y Kay (1997). Los distintos potenciales mátricos de agua en el suelo ( $\psi$ ) para la curva de retención de humedad correspondieron a -3,3, -10, -33, -100, -500 y -1500 kPa, utilizando los cilindros de suelo no alterados, mediante las técnicas estandarizadas de mesa de tensión y platos de presión (Klute, 1986). Para ello, los 10 cilindros de suelo de cada sitio fueron divididos en cinco grupos de 2 cilindros cada uno, a los cuales les fueron asignados los distintos  $\psi$  al azar. Los suelos de textura arenosa fueron equilibrados a -10 kPa y los suelos de textura más fina a -33 kPa. También se determinó la distribución del tamaño de partículas por el método de hidrómetro (Gee y Bauder, 1986), el contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (1934) y el límite plástico de Atterberg (LIP) en muestras alteradas de suelo pasado por tamiz de 475  $\mu\text{m}$  y por cuadruplicado (British Standard 1377, 1975). La densidad aparente fue determinada posteriormente a las curvas de humedad (Blake y Hartge, 1986). La caracterización de propiedades físicas y nivel de degradación del suelo se hizo según Florentino (1998).

*Estimación de indicadores de labranza a partir de la curva ajustada de humedad del suelo*

Los suelos se localizaron en una planicie aluvial reciente, en donde ocurren 3 ambientes deposicionales (eje, napa y cubeta) con texturas diferenciales. La información general de los mismos se muestra en el **Cuadro 1**.

Una vez obtenidos los valores de los parámetros optimizados de van Genuchten, 1980 ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_r$ ), que permitieron el mejor ajuste de las curvas de retención de humedad del suelo (Pérez, 2008) se procedió a la estimación del contenido volumétrico de agua trabajable ( $\theta_{inflex}$ ), potencial de presión de agua en el suelo en el punto de inflexión ( $h_{inflex}$ ), potencial mátrico de agua en el suelo en el punto de inflexión (PMI), pF en el punto de inflexión ( $pF_{inflex}$ ) y límite húmedo ( $\theta_{LHL}$ ). Los indicadores  $\theta_{inflex}$ ,  $pF_{inflex}$  y PMI fueron estimados de la curva ajustada de humedad, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{inflex} = (\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-m} + \theta_r \quad (1)$$

$$h_{inflex} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left(\frac{1}{m}\right)^{1/n} \quad (2)$$

$$pF_{inflex} = \log(h_{inflex}) \quad (3)$$

$$PMI \text{ (kPa)} = h_{inflex}/10 \quad (4)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (5)$$

Siendo:  $\theta_{inflex}$  el contenido volumétrico de agua del suelo en el punto de inflexión de la curva ajustada de humedad ( $\text{cm cm}^{-3}$ );  $\theta_r$ : el contenido volumétrico de agua residual en la curva ajustada de humedad ( $\text{cm cm}^{-3}$ );  $\theta_s$ : el contenido volumétrico de agua a saturación del suelo (10/sitio) ( $\text{cm cm}^{-3}$ ),  $m$ : la restricción de Mualem (1976) y,  $\alpha$ ,  $n$ : los parámetros de van Genuchten de la curva ajustada de humedad.

La estimación del límite húmedo para la labranza ( $\theta_{LHL}$ ) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_{LHL} = \theta_{inflex} + 0,4(\theta_s - \theta_{inflex}) \quad (6)$$

La  $\theta_{CC}$  dentro de la curva ajustada de van Genuchten correspondió al potencial mátrico -10 kPa o -33 kPa, dependiendo de la textura del suelo. La conversión de los valores volumétricos a gravimétricos para obtener  $H_{inflex}$ , LHL y CC, se realizó considerando la densidad aparente del suelo.

*Estimación de la trabajabilidad y límite húmedo para la labranza a partir de las funciones de pedotransferencia*

Después de generarse las FP para distintos grupos texturales de suelo (Pérez, 2008) que mostraron la mayor dependencia de  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , y  $n$  en función de las propiedades del suelo se procedió a estimar  $\theta_{inflex}$  y  $\theta_{LHL}$ . Para ello, se estimaron previamente los parámetros  $\theta_r$ ,  $\alpha$  y  $n$  a partir de las FP del grupo de todos los suelos ( $FP_{suelos}$ ) y FP de los suelos de textura franca ( $FP_{textura\ franca}$ ), respectivamente. Se incorporaron en las  $FP_{suelos}$  (ecuaciones 7 y 8)

y  $FP_{textura\ franca}$  (ecuaciones 9 y 10) los valores promedios de las características y propiedades de los suelos. Los valores obtenidos de  $\theta_r$ , y  $n$  se incorporaron en las ecuaciones 1, 5 y 6 para el cálculo de  $\theta_{inflex}$  y  $\theta_{LHL}$ .

$$\theta_r = -0,01585 + 0,00482A - 0,01842Da - 0,00104MO + 0,00373I + 0,00301af \quad (7)$$

$$\log n = 0,30422 - 0,0056A + 0,04669Da - 0,04921MO + 0,00374l \quad (8)$$

$$\theta_r = 0,42348 - 0,00318A - 0,08366Da + 0,03061MO - 0,00261lamf \quad (9)$$

$$\log n = 0,3571 - 0,00649A + 0,05649Da - 0,06917MO + 0,00288lamf \quad (10)$$

donde:  $\theta_r$ : el contenido volumétrico de agua residual ( $\text{cm cm}^{-3}$ ); n: parámetro de van Genuchten; af: arena fina; l: limo; lamf: limo-arena muy fina; A: arcilla; Da: densidad aparente ( $\text{Mg.m}^{-3}$ ); MO: materia orgánica (%).

**Cuadro 1.** Localización, tipos de uso y manejo y clases texturales de los suelos

Sitio/suelo <sup>a</sup>	Localidad/Finca	Uso y Manejo del suelo	Clase textural
AT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.	FL
D1	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.	F
BT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.	Fa
CT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.	Fa
DT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva. Camellones de drenaje	FL
ET	Asentamiento Mata e Palo (MP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva.	F
FT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva	F
GT	Detrás del Aeropuerto (DA)	MB: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Barbecho en norte verano por tres años.	F
HT	Detrás del Aeropuerto (DA)	MC: maíz convencional preparación con rastra - cuatro a seis pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva	FL
IT	Detrás del Aeropuerto (DA)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva	FL
JT	El Ají (EA)	BN: Bosque natural con diversidad de árboles gran tamaño	FL
KT	El Palmar (EP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva	FAL
LT	El Palmar (EP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva	Fa
MT	El Palmar (EP)	BN: Bosque natural con diversidad de arboles de mediano a gran tamaño	F
NT	El Palmar (EP)	BN: Bosque natural con diversidad de arboles de mediano a gran tamaño	F
ÑT	El Ají (EA)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva	F
OT	Detrás del Aeropuerto (DA)	BN: Bosque natural con diversidad de arboles de mediano a gran tamaño	FL

<sup>a</sup>El suelo fue identificado con el nombre del sitio al cual pertenece.

**Fuente:** Pérez y Florentino (2013b)

La conversión de los contenidos volumétricos de agua a gravimétricos para obtener  $H_{inflex}$  y LHL se realizó considerando la densidad aparente del suelo. Se determinó la efectividad de las FP en la estimación de  $H_{inflex}$  y LHL mediante la correlación de los valores estimados de FP y los ajustados de van Genuchten. La trabajabilidad fue considerada igual a 0,90 LIP, según lo propuesto por Dexter y Bird, (2001).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Caracterización de las propiedades y degradación física del suelo en el área bajo estudio*

La estadística descriptiva (Cuadro 2) de los valores promedios de todos los suelos, muestra una considerable variación de las características y propiedades. El triángulo textural de los suelos (Figura 1) revela una amplia variabilidad textural, con presencia de texturas franco arenosa (Fa), franca (F), franco limosa (FL) y franco arcillo limosa (FAL) en el área de suelos bajo estudio, con predominancia de suelos francos y franco limosos.

**Cuadro 2.** Estadística descriptiva de características y propiedades de los suelos

Variable	N	Mínimo	Máximo	Promedio
<b>a</b>	170	12	69	41
<b>amf</b>	170	8	26	18
<b>af</b>	170	2	30	14
<b>afmg</b>	170	4	59	22
<b>l</b>	170	25	66	46
<b>lamf</b>	170	35	77	64
<b>lamff</b>	170	52	87	78
<b>A</b>	170	6	31	14
<b>Da</b>	168	1,0	1,7	1,4
<b>MO</b>	170	1,7	7,8	4,3

**N:** número de observaciones (total de muestras); **a:** arena; **amf:** arena muy fina; **af:** arena fina; **afmg:** arena fina-arena media- arena gruesa-arena muy gruesa; **l:** limo; **lamf:** limo-arena muy fina; **lamff:** limo- arena muy fina-arena fina; **A:** arcilla; **Da:** densidad aparente ( $Mg\ m^{-3}$ ); **MO:** materia orgánica (%).

**Fuente:** Pérez (2008)

El cuadro 3 muestra las propiedades físicas (densidad aparente, espacio poroso total y de aireación, materia orgánica y tipo de uso y manejo de los suelos agrupados en clases texturales. Se destaca que, dentro del grupo de suelos de textura FL, el suelo DT, bajo labranza convencional en maíz, presenta la mayor densidad aparente del suelo ( $> 1,4\ Mg\ m^{-3}$ ) y los menores valores de espacio poroso total y de aireación, que reflejan una alta limitación por degradación física del suelo, de acuerdo a la guía de evaluación práctica de Florentino (1998).

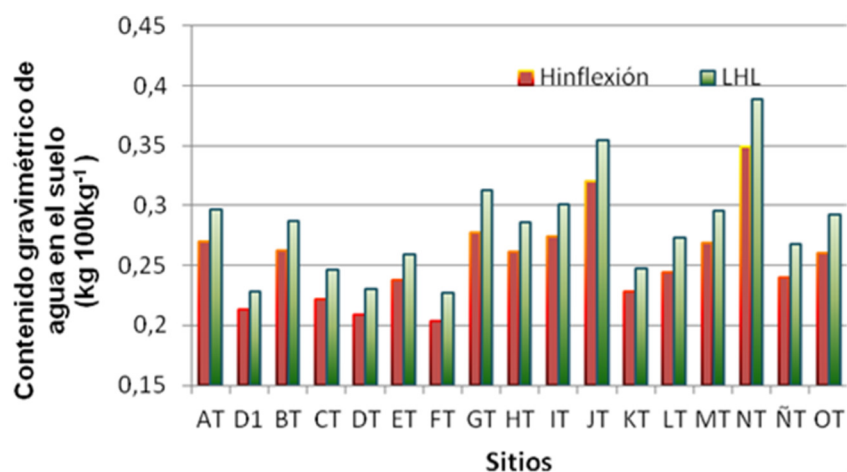
En el resto de los suelos de textura FL no se evidencia degradación estructural. En especial, el suelo JT, bajo bosque natural, muestra las mejores propiedades físicas del suelo, evidenciado por su baja densidad aparente y valores altos de espacio poroso total y de aireación (52 y 14 %, respectivamente). En los suelos de texturas F (D1, ET, FT, GT, MT, NT y ÑT), la mayor densidad aparente y los valores más bajos de espacio poroso total y de aireación se observan en los sitios D1 y FT, que reflejan una alta compactación superficial de estos suelos. En contraste, las menores densidades aparentes, los valores mayores de espacio poroso total y de aireación y, por ende, la evidencia de ninguna limitación por degradación física se presenta en GT y NT (NT bajo bosque natural).



En los suelos BT, CT, y LT con texturas Fa, se observan valores de densidad aparente cercanos a  $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$  y espacios porosos total (alrededor de 45%) y de aireación (mayor de 10%) que revelan una moderada a baja limitación por degradación física en estos suelos. El sitio CT presenta el mayor espacio poroso de aireación de los suelos de textura Fa (24 %), asociado posiblemente a la distribución de las arenas, con mayor % de arena gruesa y media (Cuadro 3). Finalmente, el suelo del sitio KT con la textura más fina (FAL) de todos los suelos, evidencia una alta degradación superficial, puesta de manifiesto por una densidad aparente superior a  $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$  y por espacio poroso total y de aireación reducidos (42 y 8%, respectivamente). Se presume por esta razón, que la compactación del suelo KT, podría ocasionar problemas de exceso de humedad en el cultivo y una mayor dificultad para la labranza del suelo. Los mayores valores de espacio poroso de aireación del suelo ( $> 18\%$ ) se observan en los suelos AT, CT, GT Y NT con texturas FL, Fa y F, respectivamente, bajo los sistemas maíz siembra directa (AT y CT), maíz-barbecho (GT) y bosque (NT). Particularmente el suelo NT bajo bosque (28%), al igual que JT, ambos constituyen suelos de referencia, que debido a sus condiciones físicas ideales hace presumir sobre la alta calidad física del mismo. El suelo del sitio BT muestra la menor porosidad de aireación de los suelos Fa (12%) atribuido posiblemente a un efecto de consolidación del mismo como resultado del manejo convencional previo. Los resultados de materia orgánica, no evidencian la relación esperada del descenso de la densidad aparente con incrementos de la misma en algunos de los suelos bajo estudio, ni en relación con los sistemas de cultivos.

#### Caracterización de indicadores de labranza estimados de la curva ajustada de humedad del suelo

En la Figura 2, se muestran los valores del contenido gravimétrico de agua en el punto de inflexión de las curvas de humedad ( $H_{\text{inflex}}$ ) y límite húmedo para la labranza (LHL) obtenidas de la curva ajustada de humedad de van Genuchten.



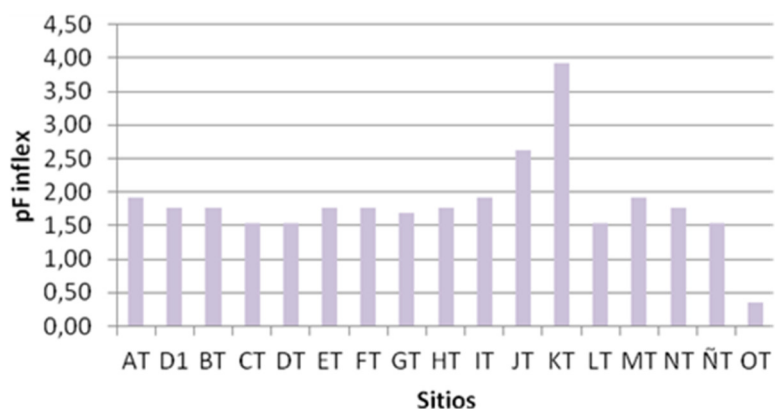
**AT:** maíz siembra directa, FL; **D1:** maíz siembra directa, F; **BT:** maíz siembra directa, Fa; **CT:** maíz siembra directa, Fa; **DT:** maíz convencional, FL; **ET:** maíz siembra directa, F; **FT:** maíz convencional, F; **GT:** maíz con barbecho- F; **HT:** maíz convencional, FL; **IT:** maíz convencional, FL; **JT:** bosque natural, FL; **KT:** maíz convencional, FAL; **LT:** maíz convencional, Fa; **MT:** bosque natural, F; **NT:** bosque natural, F; **ÑT:** maíz convencional, F; **OT:** bosque natural, FL

**Figura 2.**-Contenido gravimétrico de agua en la condición de trabajabilidad ( $H_{\text{inflex}}$ ) y límite húmedo para labranza (LHL) estimados a partir de la curva ajustada de humedad

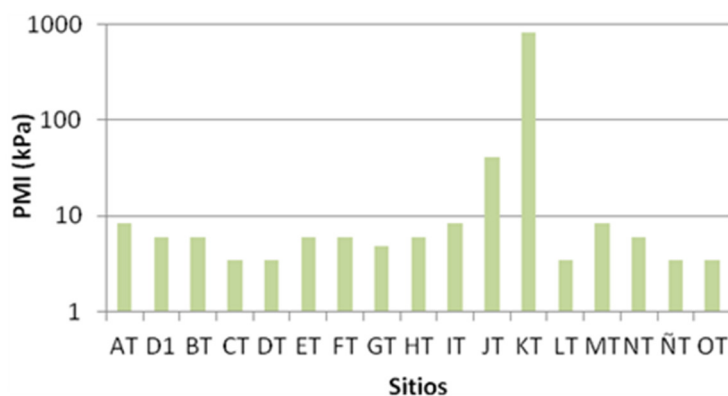
En los suelos GT, JT y NT (Figura 2) se alcanzaron los valores más altos de  $H_{\text{inflex}}$  y LHL, indicando una mayor humedad para la labranza de estos suelos y un riesgo menor de deterioro estructural frente al manejo mecanizado del suelo. Adicionalmente, se presume la influencia del alto contenido de materia orgánica que al producir efectos positivos sobre la densidad aparente (Cuadro 3), aumenta la humedad trabajable del suelo (Zhang *et al.*, 1997) y disminuye su compactabilidad (Ball *et al.*, 2000; Mosaddeghi *et al.*, 2000). Por otra parte, la menor humedad del suelo para la labranza en D1, DT, FT y KT podría

estar asociada a las evidencias de alta degradación de estos suelos (Cuadro 3) y, posiblemente, al establecimiento de una mayor limitación para la recuperación de la condición estructural del suelo frente a un manejo convencional altamente mecanizado. En este sentido, las tendencias de comportamiento reportadas por Dexter y Bird (2001), también predicen un incremento de la trabajabilidad ( $H_{inflex}$ ) con la arcilla y un descenso de la misma con el aumento de la densidad aparente en suelos con un tamaño de partículas similar, lo cual contribuye a explicar los valores menores de humedad para la trabajabilidad en D1, DT, FT y KT y superiores en GT, JT y NT, asociado a las diferencias en densidades aparentes de ambos grupos (mayor para los primeros).

En las Figuras 3(a) y 3(b), se observan los valores de  $pF_{inflex}$  (entre 1,54 y 1,92) y sus correspondientes valores de PMI superiores a -10 kPa ( $h_{inflex} < 100$  cm) de la mayoría de los suelos con texturas media y gruesa. Los  $pF_{inflex}$  se muestran inferiores a los valores de trabajabilidad, entre  $pF_{LHL} 1,92$  y  $pF_{LSL} 3,1$ , reportados por Hoogmoed *et al.* (2003) en suelos de textura franca, lo que revela una menor fuerza de retención del agua en la condición de trabajabilidad de estos suelos de la Colonia Agrícola de Turén.



**Figura 3(a).** Valores de  $pF_{inflex}$  ( $\log_{h_{inflex}}$  en el punto de inflexión de la curva de humedad ajustada de suelos de la Colonia Agrícola de Turén



**AT:** maíz siembra directa, FL; **D1:** maíz siembra directa, F; **BT:** maíz siembra directa, Fa; **CT:** maíz siembra directa, Fa; **DT:** maíz convencional, FL; **ET:** maíz siembra directa, F; **FT:** maíz convencional, F; **GT:** maíz con barbecho- F; **HT:** maíz convencional, FL; **IT:** maíz convencional, FL; **JT:** bosque natural, FL; **KT:** maíz convencional, FAL; **LT:** maíz convencional, Fa; **MT:** bosque natural, F; **NT:** bosque natural, F; **ÑT:** maíz convencional, F; **OT:** bosque natural, FL

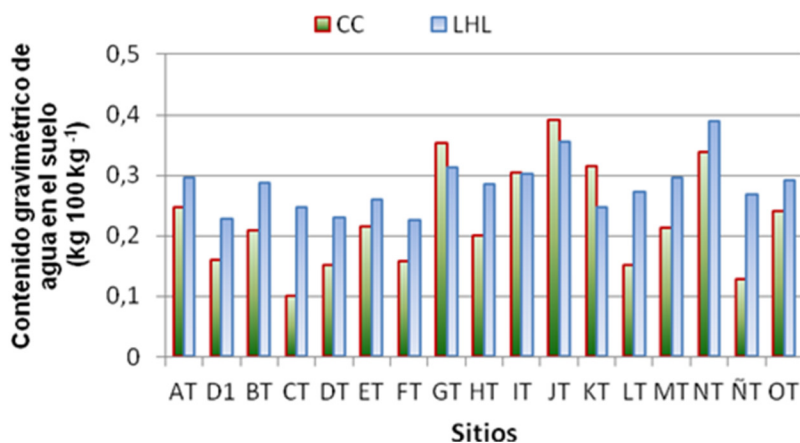
**Figura 3(b).** Potencial mátrico de agua en el suelo en el punto de inflexión de la curva ajustada de humedad (PMI) de suelos de la Colonia Agrícola de Turén



Al contrario, los resultados muestran mayor coincidencia con los pF reportados por Droogers *et al.* (1996) en la condición de trabajabilidad de suelos de textura franca bajo pasto convencional (pF 1,6) y barbecho (pF 1,5), indicando una ligera variación de este indicador debido al efecto del sistema de manejo. Por otra parte destaca el suelo JT al presentar un valor intermedio de  $pF_{inflex}$  (2,62) entre el grupo de suelos de la Colonia Agrícola de Turén, a pesar de representar un bosque natural muy preservado y con muy alto contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo (Cuadro 2). Este valor de  $pF_{inflex}$  también resulta superior al reportado por Droogers *et al.* (1996) en el punto de trabajabilidad de un suelo bajo manejo ecológico (pF 2,09) caracterizado por el uso de abonos orgánicos y rotación de cultivos. Lo anterior refleja un incremento de la fuerza de retención de la humedad trabajable del suelo JT altamente preservado. En el suelo con alto contenido de arcilla (KT), los resultados muestran un incremento importante de los valores de  $pF_{inflex}$  (3,9) y PMI (-8320 kPa), resultando coherente con lo referido por Buitendijk (1985) y con los valores de trabajabilidad (entre  $pF_{LHL}$  2,1 y  $pF_{LSL}$  4,1) obtenidos por Hoogmoed *et al.* (2003) en suelos arcillosos y a más bajos potenciales mátricos de agua en el suelo. Adicionalmente, es necesario resaltar que los riesgos de compactación o deterioro del suelo se presentan asociados al balance de agua en el suelo y la relación entre el balance de humedad del suelo y los potenciales mátricos en la condición de trabajabilidad, lo cual conlleva a exigir una mayor habilidad de los agricultores para mantener el potencial productivo del suelo (Droogers *et al.*, 1996). Particularmente, las dificultades de drenaje externo podrían incrementar los riesgos mencionados en suelos de Turén, al mantenerse de manera frecuente un balance de alta humedad en el suelo (Florentino, 1989) muy cercano a LHL o por encima de éste durante el período húmedo.

*Relación de la capacidad de campo con el límite húmedo para la labranza*

Como resultado de considerar la capacidad de campo (CC) en su relación con LHL (Figura 4) podría destacarse en primer lugar, que los suelos GT y JT (suelos bien estructurados) muestran un valor de  $CC/LHL > 1$ , que indica la susceptibilidad de estos suelos al daño estructural, si no se espera que drenen ligeramente por debajo de CC y el contenido de humedad se presente dentro del rango para labranza (Rounsevell y Jones, 1993; Dexter *et al.*, 2005). El suelo de KT, que se distingue por presentar un alto contenido de arcilla, adicionalmente a la compactación superficial del suelo, muestra una marcada dificultad para la labranza ( $CC/LHL >> 1$ ). Esto implica la necesidad de esperar todavía más tiempo para alcanzar una humedad menor a CC, que se ubique dentro del rango de trabajabilidad y evite el avance del deterioro estructural del suelo. El resto de los suelos presentan una  $CC < LHL$  que hace prever pocas dificultades para la labranza (70% de los sitios), de acuerdo a lo referido por Dexter *et al.* (2005). De acuerdo a Florentino (2013) (comunicación personal) en la práctica se ha observado que labrar a un contenido de agua equivalente a CC ha generado compactación en suelos de la Colonia Agrícola de Turén.



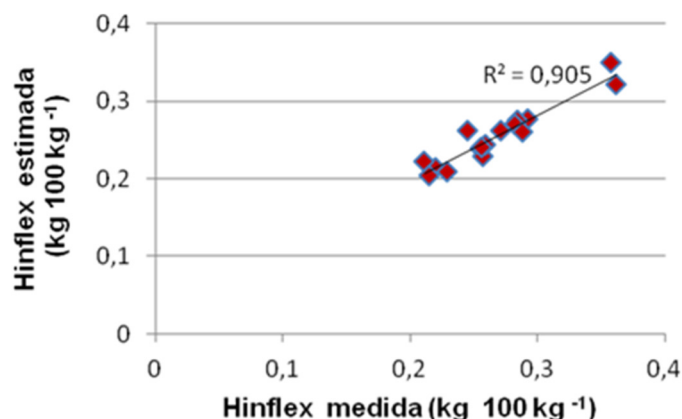
AT: maíz siembra directa, FL; D1: maíz siembra directa, F; BT: maíz siembra directa, Fa; CT: maíz siembra directa, Fa; DT: maíz convencional, FL; ET: maíz siembra directa, F; FT: maíz convencional, F; GT: maíz con barbecho, F; HT: maíz convencional, FL; IT: maíz convencional, FL; JT: bosque natural, FL; KT: maíz convencional, FAL; LT: maíz convencional, Fa; MT: bosque natural, F; NT: bosque natural, F; ÑT: maíz convencional, F; OT: bosque natural, FL

**Figura 4.** Límite húmedo para labranza (LHL) y capacidad de campo (CC) de la curva ajustada de humedad de suelos de la Colonia Agrícola de Turén

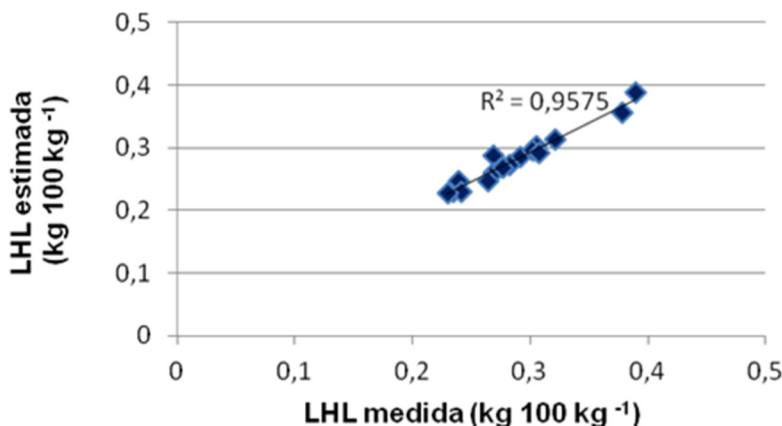
Al analizar la influencia preponderante de la materia orgánica sobre el agua adsorbida, al afectar positivamente a la estructura del suelo y a la capacidad de campo en la curva de retención de humedad (Hillel, 1982; Rawls *et al.*, 2003), se presume que los suelos GT y JT bajo la influencia de ambos factores pudieran drenar rápidamente a través de la macroporosidad asociada a potenciales mátricos de agua en el suelo más altos ( $> -100$  kPa), y por tanto, no presentar mayores problemas a los fines de una labranza que preserve su condición ideal de referencia (Jury y Horton, 2004). Los valores de capacidad de campo menores en D1, CT, DT, FT, LT, ÑT se atribuyen, principalmente, a las texturas F y Fa de estos suelos, al permitir un drenaje más rápido por gravedad (Dexter y Bird, 2001). Esta condición textural prevalece sobre la alta compactación manifiesta en algunos de estos suelos (D1, DT, FT).

*Efectividad de las funciones de pedotransferencia en la estimación de los indicadores de labranza*

Los resultados graficados de la correlación entre los valores  $H_{inflex}$  y LHL, ambos obtenidos de la curva ajustada de retención de van Genuchten y a partir de la  $FP_{suelos}$  (Figuras 5 y 6) muestran una alta aproximación de los valores de estos indicadores del suelo. De acuerdo a lo encontrado, las variables A, Da y MO contenidas en la  $FP_{suelos}$  (Ecuaciones 7 y 8) guardan una relación estrecha con la respuesta de la curva ajustada de humedad, que derivan en una adecuada consistencia de los valores de trabajabilidad y, en consecuencia, en una alta potencialidad de uso de estas ecuaciones para orientar el manejo de la labranza mecanizada en suelos de la Colonia Agrícola de Turén.

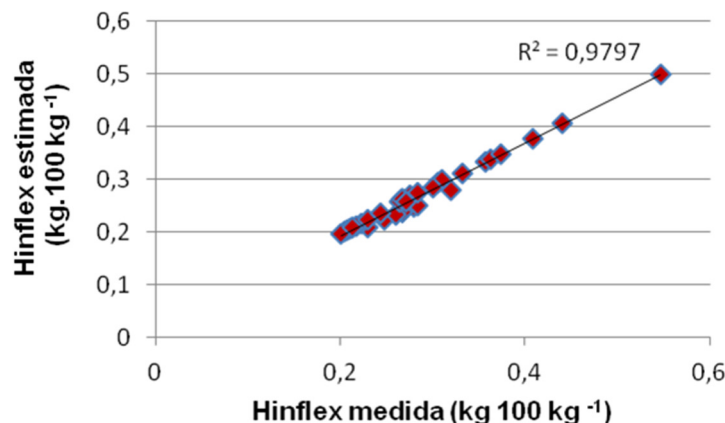


**Figura 5.** Relación entre los valores del punto de inflexión de la curva ( $H_{inflex}$ ) estimados mediante la  $FP_{suelos}$  y a partir de la curva ajustada de humedad de van Genuchten

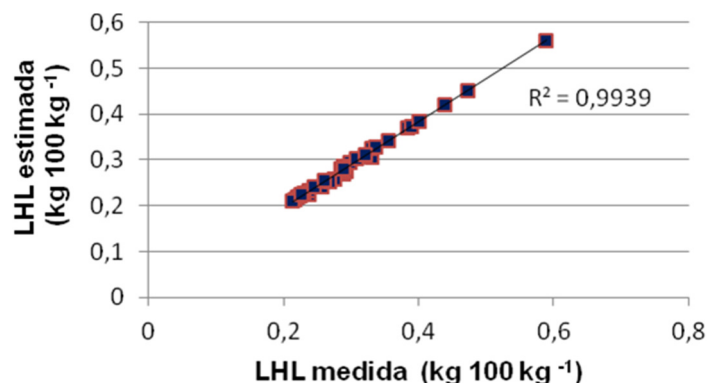


**Figura 6.** Relación entre los valores del límite húmedo para labranza (LHL) estimados mediante la  $FP_{suelos}$  y a partir de la curva ajustada de humedad de van Genuchten

De la misma manera, las Figuras 7 y 8 revelan una alta correlación entre los valores  $H_{\text{inflex}}$  y los valores LHL, obtenidos de la curva ajustada de humedad de van Genuchten y mediante las  $FP_{\text{textural franco}}$ . Lo encontrado confirma un alto grado de confianza de las  $FP_{\text{textural franco}}$  para la estimación de los indicadores de trabajabilidad, indicando, además, una alta sensibilidad de respuesta de las  $FP_{\text{textural franco}}$  a pequeñas variaciones de densidad aparente del suelo (Ecuaciones 9 y 10). Es necesario destacar que, se observó en este estudio un 41% de aproximación entre los valores de trabajabilidad ( $0,9LIP$ ) y los valores de  $H_{\text{inflex}}$ , los cuales difieren de lo referido por Pérez (2008) basado en la dificultad encontrada para estimar la trabajabilidad de suelos franco arenosos (BT, CT) mediante el valor de  $0,9LIP$  (que mostraron las mayores variaciones).



**Figura 7.** Relación entre los valores del punto de inflexión de la curva ( $H_{\text{inflex}}$ ) estimados mediante  $FP_{\text{textural franco}}$  y a partir de la curva ajustada de humedad de van Genuchten en suelos de textura franca



**Figura 8.** Relación entre los valores del Límite húmedo para labranza (LHL) estimados mediante la  $FP_{\text{textural franco}}$  y a partir de la curva ajustada de humedad de van Genuchten en suelos de textura franca

De acuerdo a los resultados del estudio, una superficie considerable de suelos de la Colonia Agrícola de Turén está representada por suelos con texturas franca y franca limosa (> 51%), con predominio de la fracción limo-arena fina –arena muy fina, y sobre los cuales, se establecen sistemas de producción agrícola altamente mecanizados. En tal sentido, Florentino (1989), señala que la baja presencia de la fracción fina de la arcilla en estos suelos, aunado al tipo de manejo y, a las limitaciones de mal drenaje superficial que impiden realizar la labranza mecanizada del suelo en el momento prudencial, condicionan una alta susceptibilidad a la degradación por la labranza, con consecuencias que han demostrado resultar negativas a través del tiempo.

Por otra parte, la producción de una amplia superficie bajo el sistema maíz convencional, conduce usualmente a una alta inversión de energía en la mecanización de los suelos en condiciones de muy poca humedad, con el propósito de anteceder los posibles excesos de humedad del suelo en la entrada del período lluvioso. Además, en el tiempo restante del período de crecimiento, la humedad del suelo resulta comúnmente muy alta para una mecanización sin daños al suelo, considerándose por esta razón, que la estimación de la trabajabilidad a partir de las FP reviste gran significación por las ventajas que tiene el cálculo rápido y de bajo costo de la trabajabilidad a los fines de planificar la labranza mecanizada y reducir el riesgo de deterioro del suelo.

### CONCLUSIONES

La mayoría de los suelos bien estructurados bajo estudio, permiten la realización de las operaciones de labranza a un mayor contenido de agua en el suelo (condición óptima para la trabajabilidad) y a valores más altos del límite húmedo para la labranza, reflejando un menor riesgo de deterioro frente al manejo mecanizado. Al contrario, los valores de los indicadores disminuyen muy notablemente en el suelo arcilloso y compactado en los que posiblemente, el contenido de arcilla y la degradación física influyen notablemente en una mayor dificultad para la labranza del suelo. Por otra parte, el índice CC/LHL, señala un riesgo moderado frente a la labranza de suelos bajo bosques, con muy alto contenido de materia orgánica, en comparación con el mayor riesgo presente en el suelo de textura arcillosa. De manera similar, los  $pF_{\text{infex}}$  y PMI indican una menor fuerza de retención de la humedad en la condición de trabajabilidad de suelos de textura gruesa y media, superior en el suelo arcilloso e intermedio en el suelo bajo la condición natural de bosque más preservado (franco limoso), reflejando en ese orden las posibles limitaciones para la labranza. Las funciones de pedotransferencia para estimar contenidos de agua en el suelo en función de propiedades de fácil medición, surgen como una herramienta interesante en la predicción de la trabajabilidad de suelos franco arenosos no plásticos o suelos no degradados para orientar el manejo sostenible del suelo en esta importante zona agrícola del país.

**AGRADECIMIENTO:** Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela y al FONACIT por el apoyo financiero brindado a través de los proyectos N° PI 00-6225-06 y G-2002000557, respectivamente.

### LITERATURA CITADA

- British Standard 1377.** 1975. Methods for testing soils for civil engineering purposes. British Standard Institution, London 134 p.
- Ball, B.; D. Campbell; E. Hunter.** 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil & Till. Res.* 57:83-91.
- Blake, J.; L. Hartge.** 1986. Bulk Density. p. 349-378. *En* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2<sup>nd</sup> ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, WI.
- Buitendijk, J.** 1985. Effect of workability index, degree of mechanization and degree of certainty on the yield of sugar beet. *Soil&Till. Res.* 5, 247-257.
- Da Silva, A.; P. Kay; E. Perfect.** 1994. Characterization of the least limiting water range of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1775-1781.
- Da Silva, A.; B. Kay.** 1997. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *SoilSci. Soc. Am. J.* 61 (3):877-883.
- De la Rosa, F.; Mayol; E. Diaz-Pereira.** 2003. Soil plasticity and workability. Online:www.microleis.com/software
- Dexter, A.; N. Bird.** 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil&Till. Res.* 57 (1-2):203-212.
- Dexter, A.; E. Czyz, M. Birka's, E. Diaz-Pereira, E. Dumitrud, R. Enache, H. Fleige, R. Horn K. Rajkaj, D. de la Rosa; C. Simota.** 2005. SIDASS project. Part 3. The optimum and the range of water content for tillage – further developments. *Soil & Till. Res.* 85 (1):29-37.

- Droogers, P.; A. Fermont; J. Bouma.** 1996. Effects of ecological soil management on workability and trafficability of a loamy soil in the Netherlands. *Geoderma* 73:131-145.
- Florentino, A.** 1989. Efecto de la compactación sobre las relaciones hídricas en suelos representativos de la Colonia Agrícola de Turén (estado Portuguesa). Su incidencia agronómica. Tesis Doctoral. Facultad de Agronomía – Universidad Central de Venezuela. 207 p.
- Florentino, A.** 1998. Guía para la evaluación de la degradación del suelo y de la sostenibilidad del uso de la tierra: selección de indicadores físicos y valores críticos. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía – Universidad Central de Venezuela. 8 p (Mimeografiado).
- Gee, R.; P. Bauder.** 1986. Particle size. *En* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, WI., pp 443-461..
- Hillel, D.** 1982. *Introduction to soil physics*. Academic Press. Orlando Florida. 201 p.
- Hoogmoed, W.; M. Cadena-Zapata; U. Perdok.** 2003. Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. *Soil & Till. Res.* 74:169-178.
- Jury, W.; R. Horton.** 2004. Water characteristic function. *In:* pp.65-69. J. Wiley & Sons, Inc, *Soil Physics*. New Jersey, NJ.
- Klute, A.** 1986. Water relations: Laboratory methods. *En* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, WI. p. 635-662.
- Mosaddeghi, M.; M. Hajabbasi; A. Hemmat; M. Afyuni.** 2000. Soil compatibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil & Till. Res.* 55:87-97.
- Mualem, Y.** 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Mueller, L.; P. Tiller; H. Kretschmer.** 1990. Workability of alluvial soils in response to drainage status. *Soil & Till. Res.* 16(1):273-287.
- Mueller, L.; U.Schindler; N. Fausey; R. Lal.** 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil&Till. Res.* 72 (1):9-20.
- Perez, M.** 2008. Relación de la trabajabilidad con la curva de humedad y propiedades del suelo. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 34:141-164..
- Pérez M.; A. Florentino.** 2013<sup>a</sup>. Cambios en el contenido de humedad para labranza y del índice S de calidad física basados en propiedades del suelo. *Revista Fac. Agron.( UCV)* 39(1):30-40.
- Pérez M.; A. Florentino.** 2013<sup>b</sup>. Intervalo de agua menos limitante en función de propiedades del suelo. *Venesuelos* 21:43-60.
- Rawls, W.; Y. Pachepsky; C Ritchie.** 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116: 61-76.
- Rounsevell, M.; R. Jones.** 1993. A soil and agroclimatic model for estimating machinery work-days: the basic model and climatic sensitivity. *Soil & Till. Res.* 26, 179-191.
- Utomo, W.; A. Dexter.** 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32, 203-213.
- van Genuchten, M.** 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Walkley, A.; I. Black.** 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Zhang, H.; K. Hartge; H. Ringe.** 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:239-245.