

Cultivo de caña en Famaillá: Estudio de caso. Indicadores de la fertilidad física y de la vulnerabilidad del suelo: Consolidación unidimensional.

Omar Tesouro¹ / Enrique Fernández de Ullivari² / Leonardo Venturelli¹ / Marcos Roba¹ / Ángel Romito¹ / Otto Neiman¹

Instituto de Ingeniería Rural - CIA - CNIA

¹Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos

²EEA Famaillá (Tucumán)

Informe Técnico N° 31
Marzo 2017



Ediciones

Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria



Informe Técnico Nº 31
ISSN 1852-3080
Marzo 2017

Cultivo de caña en Famaillá: Estudio de caso.
Indicadores de la fertilidad física y de la vulnerabilidad del suelo:
Consolidación unidimensional

Programa Nacional de Cultivos Industriales

Proyecto Integrador
Estrategias de manejo de sistemas productivos resilientes

Proyecto Específico
Optimización del ciclo de vida de los cultivos industriales

Módulo
Alternativas tecnológicas y optimización de los sistemas de manejo en cultivos industriales.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Instituto de Ingeniería Rural

Editor responsable: Ing. Agr. Mario Omar Tesouro

Av. Pedro Díaz 1798
Hurlingham - Buenos Aires - Argentina
C.C. 25 B1712 JHB Castelar
Tel. 4665-0495/0450/2115

iir.cd@inta.gob.ar
www.inta.gob.ar/unidades/222000

ÍNDICE GENERAL

Resumen	3
1. Introducción	4
2. Materiales y Métodos	6
3. Resultados	8
4. Consideraciones Finales	13
5. Bibliografía	14

Cultivo de caña en Famaillá: Estudio de caso.

Indicadores de la fertilidad física y de la vulnerabilidad del suelo: Consolidación unidimensional

RESUMEN

Entre los meses de junio y julio de 2013 se inició un ensayo de larga duración en la EEA Famaillá (Tucumán) a fin de probar diferentes tecnologías de cultivo en caña de azúcar. El área experimental posee suelos argiudoles ácuicos, con un prolongado historial de monocultivo de caña con el manejo tradicional de la zona. Los dos años anteriores al inicio del ensayo, en el sitio experimental se realizó un cultivo de soja implantado con siembra convencional, siendo posteriormente abandonado durante aproximadamente un año a la vegetación natural de pastizal.

La estructura del suelo tiene influencia en la mayoría de los factores de crecimiento de las plantas, siendo en determinados casos, un factor limitante en la producción. La compactación excesiva del suelo puede tener efectos adversos sobre la emergencia de las plántulas y el desarrollo radical. Provoca reducción en la difusión del oxígeno favoreciendo la denitrificación. Puede también aumentar el riesgo de escurrimiento superficial del agua debido a la disminución de la infiltración. La prueba de compresión uniaxial es un método de diagnóstico de este fenómeno y se utiliza para caracterizar la compresibilidad del suelo.

Se determinaron la relación carga-deformación, las tensiones de precompresión y los índices de compresión de muestras de suelo inalteradas, obtenidas en la situación de base. El procedimiento de prueba utilizado se basó en la metodología descrita en la Norma ASTM D 2435-03. Las muestras de suelo fueron puestas en contacto con una película de agua durante 48 horas, a fin de alcanzar el estado de saturación antes de ser colocadas en el aparato de compresión uniaxial y sometidas como mínimo a presiones verticales de 6, 19, 34, 62, 113, 210, 400, 760 y 1478 kPa. Luego de haber sometido cada muestra de suelo a la totalidad de las cargas preestablecidas se estableció la relación de vacíos en función del logaritmo de la presión y, a partir de esta función, fueron calculados los parámetros mencionados.

Los primeros resultados obtenidos de las pruebas de consolidación parecen evidenciar el efecto del historial de cargas ejercido sobre el suelo. En lo referente a las consecuencias que puede provocar el continuar con el sistema de manejo convencional, existe un elevado gradiente de reducción de la relación de vacíos que tiende a comprometer a futuro la integridad física del suelo.

1. INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo es una de las formas más importantes de degradación física de los suelos (Pagliai et al., 2004). Este fenómeno altera la estructura de los suelos cultivados, modificando varias propiedades clave para el mantenimiento del ambiente y la producción de los cultivos (Soane and van Ouwerkerk, 1994; Chan et al., 2006). La compactación excesiva del suelo puede tener efectos adversos sobre la emergencia de las plántulas y el desarrollo radical. Causa una reducción en la difusión del oxígeno favoreciendo la denitrificación (Czyz, 2004). Puede también aumentar el riesgo de escurrimiento superficial del agua debido a la disminución de la infiltración.

Soane and van Ouwerkerk (1994) concluyen que la intensidad de la compactación es debida a dos tipos de factores: (I) las cargas aplicadas que dependen de las características de la maquinaria (peso por eje, dimensiones del neumático, presión de inflado y velocidad de avance) y (II) la resistencia mecánica del suelo, que está condicionada por sus características intrínsecas como la textura, sus propiedades casi permanentes como el contenido de carbono y por otras más dinámicas, como su tenor de humedad y su estado de agregación. En referencia a lo anterior, Trautner and Arvidsson, (2000) informan que las tensiones observadas en un suelo expansivo arcillo limoso, sometido a cargas de 14 tn por eje, variaron de 300 a 650 kPa a 0,3 m de profundidad y de 70 a 270 kPa a 0,7 m, dependiendo del contenido de humedad. A igual carga aplicada, la relación tensión-deformación es menor bajo labranza reducida que con labranza convencional, debido a la mayor resistencia del suelo (Lipiec and Hatano, 2003; Horn and Baumgartl, 1999; Horn and Rostek, 2000). Resulta obvia la importancia de controlar el impacto del tránsito de la maquinaria agrícola sobre la estructura del suelo a fin de mantener la ocurrencia de este proceso dentro de niveles aceptables (Alakukku et al., 2003).

La compactación del suelo ha sido tema de estudio durante muchos años debido a su implicancia en el rendimiento de los cultivos. Diversos métodos fueron desarrollados para evaluar su efecto sobre la calidad del suelo (Alakukku et al., 2003; Lipiec and Hatano, 2003) y existe un creciente interés en mejorar la precisión de los métodos de diagnóstico de este fenómeno (Cavaliere et al., 2008).

La prueba de compresión uniaxial, desarrollada por Terzaghi (1936), es utilizada para caracterizar la compresibilidad del suelo. Las relaciones entre carga y deformación se describen generalmente en base a dos tipos de modelos: (I) los elastoplásticos y (II) los de forma de "S" (S shaped). En los modelos elastoplásticos, de forma bilinear, la curva de compresión definida en general como la relación de vacíos "e" en función del logaritmo de la presión vertical " σ_v " puede ser dividida

en dos partes: una elástica, a bajos niveles de tensión y que constituye el tramo de recompresión y otra lineal, a mayores tensiones, llamada la parte de compresión virgen (Figura 1.1a).

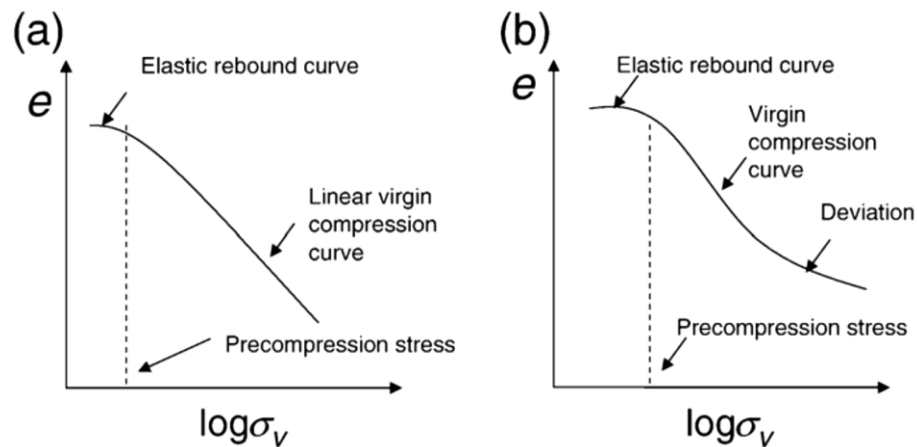


FIGURA 1.1: Formas principales de la curva de compresión uniaxial: (a) curva bilinear; (b) curva en forma de “S”.

La transición entre ambas partes se denomina *tensión de precompresión* o *carga de preconsolidación*. Los modelos elastoplásticos son los más comúnmente utilizados para interpretar los resultados de la prueba de compresión uniaxial (Défossez and Richard, 2002; Pereira et al., 2007; Mosaddeghi et al., 2007; entre otros). Estos modelos consideran que la pendiente es constante en la parte de compresión virgen. Sin embargo, algunos resultados experimentales muestran que en ciertos tipos de suelos la pendiente de este tramo disminuye a elevadas tensiones (modelos en forma de “S” figura 1.b). Distintos métodos son utilizados para determinar la tensión de preconsolidación (Dawidowski and Koolen, 1994; Arvidsson and Keller, 2004; Imhoff et al., 2004), y pueden cometerse errores significantes en su estimación si la curva de compresión se desvía de su tendencia lineal a elevadas tensiones. Algunos autores (Keller et al. 2004) no consideran esta parte de la curva en dicha determinación, o utilizan funciones polinomiales o sigmoideas para ajustar su forma (Baumgartl and Köck, 2004; Gregory et al., 2006).

La *tensión de precompresión* es considerada por numerosos autores como la capacidad del suelo de soportar carga y consecuentemente, como el riesgo de compactación de los sitios cultivados (Veenhof and McBride, 1996; Horn and Fleige, 2003; Imhoff et al., 2004; Rucknagel et al., 2007). Otros lo interpretan como un indicador de la resistencia y la estabilidad mecánica del suelo (Arvidsson et al., 2001; Berli, 2001). En un sentido más estricto, la tensión de precompresión representa el historial de cargas que ha sufrido el suelo a lo largo de su historia geológica mientras que, la pendiente del tramo virgen o compresibilidad del suelo, indicaría el riesgo de compactación (Terzhagui, 1936; Juárez Badillo y Rodríguez, 1972). Independientemente de la interpretación que se haga de este punto, existe una opinión casi unánime acerca de que si las cargas aplicadas son menores a la tensión de

preconsolidación, el suelo se deforma y se recupera elásticamente. Si en cambio, las cargas ejercidas exceden la tensión de preconsolidación, la deformación sufrida en el suelo a expensas de la reducción de su espacio poroso es irreversible (Lebert and Horn, 1991).

El objetivo de este trabajo fue realizar pruebas de consolidación unidimensional en la situación de base, a fin de evidenciar el historial de cargas ejercidas sobre el suelo y el riesgo de compactación del mismo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los pruebas se realizaron utilizando muestras de suelo inalteradas obtenidas antes del inicio del ensayo que se lleva a cabo en la EEA Famaillá (Tucumán) desde el año 2013. El sitio experimental presentaba un prolongado historial de monocultivo de caña de azúcar, bajo el método tradicional de producción. En los últimos dos años previos a la preparación de las parcelas y subparcelas, fue realizado un cultivo de soja implantado con siembra convencional y laboreo del suelo, siendo posteriormente abandonado durante aproximadamente un año a la vegetación natural de pastizal. La secuencia de horizontes y el resultado del análisis textural del sitio experimental se detallan en la siguiente tabla:

Horizonte	Ap	A	Bt ₁	Bt ₂	BC
Profundidad (cm)	0 - 5	5 - 25	25 - 40	40 - 62	62 - 85
Arena (%)	20,7	20,7	18,7	14,7	14,7
Limo (%)	46,0	46,0	42,0	46,0	70,0
Arcilla (%)	33,3	33,3	39,3	39,3	15,3
Clase textural	Franco arcilloso	Franco arcilloso	Franco arcillo limoso	Franco arcilloso	Franco limoso

TABLA 2.1: Secuencia de horizontes y clases texturales del suelo del área experimental.



FIGURA 2.1: a) Muestra de suelo después de la prueba de precompresión, cilindros de acero inoxidable y una muestra de suelo extraída del sitio experimental, antes de la inmersión. b) Vista del equipo en su conjunto

Las muestras de suelo utilizadas en esta prueba fueron obtenidas en la zona más profunda del horizonte A y del Bt₁ debido a que, en esta capa de suelo, se presenta una densificación característica en el sitio experimental y en prácticamente la totalidad del área cañera de Tucumán (Informe Técnico N° 25). Para su extracción fueron utilizados cilindros de acero inoxidable tarados de 110 milímetros de diámetro interno por 32 milímetros de altura, permaneciendo contenidas en estos aros durante todo el proceso de preparación de muestras y de prueba. Para obtener las curvas de presión - deformación, las cargas de preconsolidación y el índice de compresión se siguió la metodología descrita en la Norma ASTM D 2435-03. Previamente a su colocación en el aparato de compresión uniaxial, desarrollado en el Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos (IIR-CIA-CNIA-INTA), las muestras de suelo fueron puestas en contacto con una película de agua durante 48 horas a fin de alcanzar el estado de saturación.

Posteriormente fueron sometidas como mínimo a presiones verticales de 6, 19, 34, 62, 113, 210, 400, 760 y 1478 kPa. Se relevaron más puntos cuando se lo juzgó necesario a partir de las deformaciones observadas en el transcurso de cada una de las pruebas. El tiempo de aplicación de cada nivel de carga fue el necesario para permitir el drenaje, tanto por la cara superior como por la inferior del agua excedente de la muestra de suelo. El avance del pistón, equivalente a la compresión de la muestra, se midió con un comparador electrónico digital con una resolución de 0,01 mm y los datos se enviaron mediante una interfaz a una PC donde fueron almacenados. Cuando el avance del pistón se aproximó a cero para cada nivel de carga, se determinó gráficamente la deformación de la muestra de suelo en función del logaritmo del tiempo.



FIGURA 2.2: Comparador centesimal para medir deformación de la muestra de suelo. Puede verse la interfase para conexión a PC.

Luego de haber sometido cada muestra de suelo a la totalidad de las cargas preestablecidas, fue graficada la relación de vacíos en función del logaritmo de la presión utilizando polinomios de cuarto grado para el ajuste de los resultados. A partir de estas funciones se determinó matemáticamente el punto de curvatura máxima. En este punto se calculó la pendiente de la tangente, se trazó una línea

paralela al eje de las abscisas y se estableció la bisectriz del ángulo conformado por dichas rectas. La carga de preconsolidación quedó definida en el punto de intercepción de la bisectriz y la tangente a la parte de la curva correspondiente al tramo de compresión virgen. La pendiente de la tangente, equivalente al índice de compresión (C_c), fue calculada en todas las muestras de suelo ensayadas.

3. RESULTADOS

En las figuras 3.1 y 3.2 pueden observarse las relaciones presión-deformación de las muestras de suelo obtenidas en la parte más profunda del horizonte A, entre 100 y 200 mm. La presión de preconsolidación resultó prácticamente igual en ambos casos y de reducida magnitud, fluctuando entre 13,5 y 14,5 kPa. Bajos valores de presiones de preconsolidación implican un muy breve rango de tensiones dentro del cual el suelo tiene un comportamiento elástico ya que, una vez superado ese umbral, ocurren deformaciones plásticas.

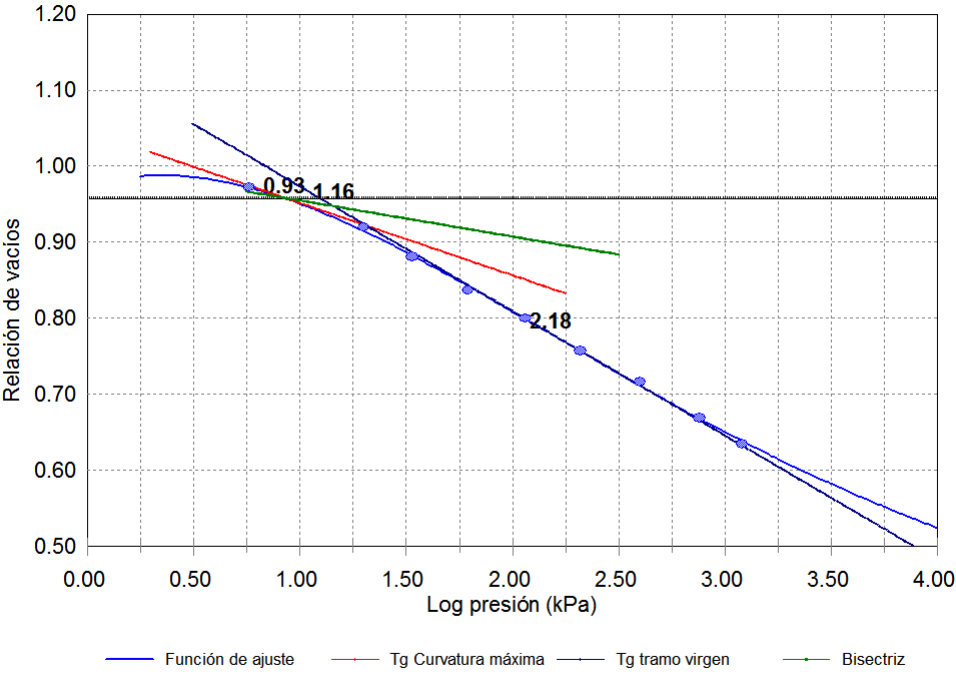


FIGURA 3.1: Relación presión-deformación, expresada como relación de vacíos, de la muestra 1 obtenida en el horizonte A en el rango de profundidad de 100 a 200 mm.

Muestra	Relación de vacíos en el origen	Punto de máxima curvatura	Presión de preconsolidación (Pc)		Relación de vacíos en Pc	Índice de compresión (Cc)	
	cm ³ /cm ³	(log kPa)	(log kPa)	(kPa)	cm ³ /cm ³	($\Delta y/\Delta x$)	(grados)
1	0,99	0,93	1,16	14,5	0,93	-0,1638	-9,30
2	0,91	0,75	1,13	13,5	0,85	-0,1617	-9,18

TABLA 3.1: Principales parámetros obtenidos de la relación presión-deformación de las muestras obtenidas en el horizonte A en el rango de profundidad de 100 a 200 mm.

El comportamiento del horizonte A frente a la aplicación de cargas superficiales, obedece a su historial de manejo. Las labranzas poco profundas realizadas en el año 2011, previas a la implantación de la soja y el posterior abandono del suelo a la vegetación natural, favorecieron la persistencia del efecto de las labores. La porosidad artificial remanente ocasionada por la labranza, generó un mejor estado físico del suelo en el momento de realizar el muestreo para estas pruebas que el correspondiente a su condición de equilibrio, pero lo hizo más susceptible a las deformaciones plásticas.

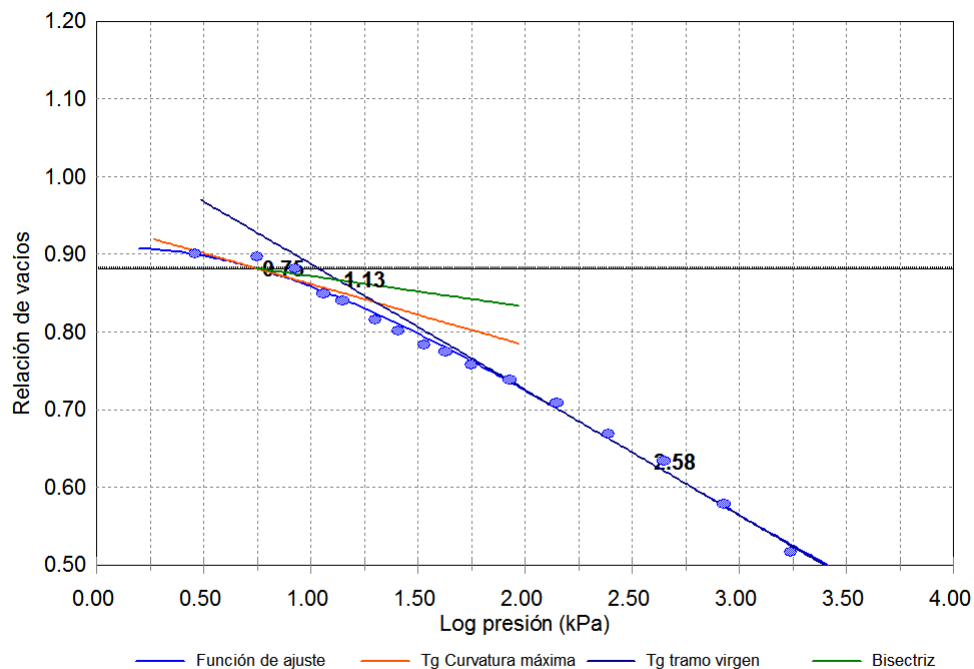


FIGURA 3.2: Relación presión-deformación, expresada como relación de vacíos, de la muestra 2 obtenida en el horizonte A a una profundidad de 100 a 200 mm.

La situación es diferente en el horizonte Bt₁, mucho menos disturbado que el A. En este caso las presiones de preconsolidación fluctuaron en un rango de 80 a 200 kPa, lo cual puede apreciarse en las

figuras 3.3 y 3.4 y en la tabla 3.2. Estos valores deberían reflejar la presión que ejerce la capa tierra suprayacente, el efecto de la desecación y el de un posible efecto antrópico.

La presión ejercida por el horizonte superficial actual, la capa de tierra de un espesor medio de 300 mm, pudo ser estimada a partir de los datos de densidad aparente (Informe Técnico N° 25) y alcanzó a 4,0 kPa. La mecánica de suelos sostiene que las tensiones capilares que se desarrollan durante la desecación, las cuales generan en gran parte la fuerza necesaria para que se produzca la contracción, provocan una consolidación irreversible del suelo. La tensión neutra al inicio de la entrada de aire en el suelo y de su fase de contracción residual, a una humedad gravimétrica de 37,2 % se estimó en 30 kPa. En el final de la contracción residual, la tensión neutra puede llegar los 140 kPa. Aunque se considere que en condiciones naturales este valor de tensión pudiera ser alcanzado y que permaneciese fijado en la matriz del suelo, la presión de preconsolidación de una de las muestras supera ampliamente ese valor, indicando la posible presencia del factor antrópico.

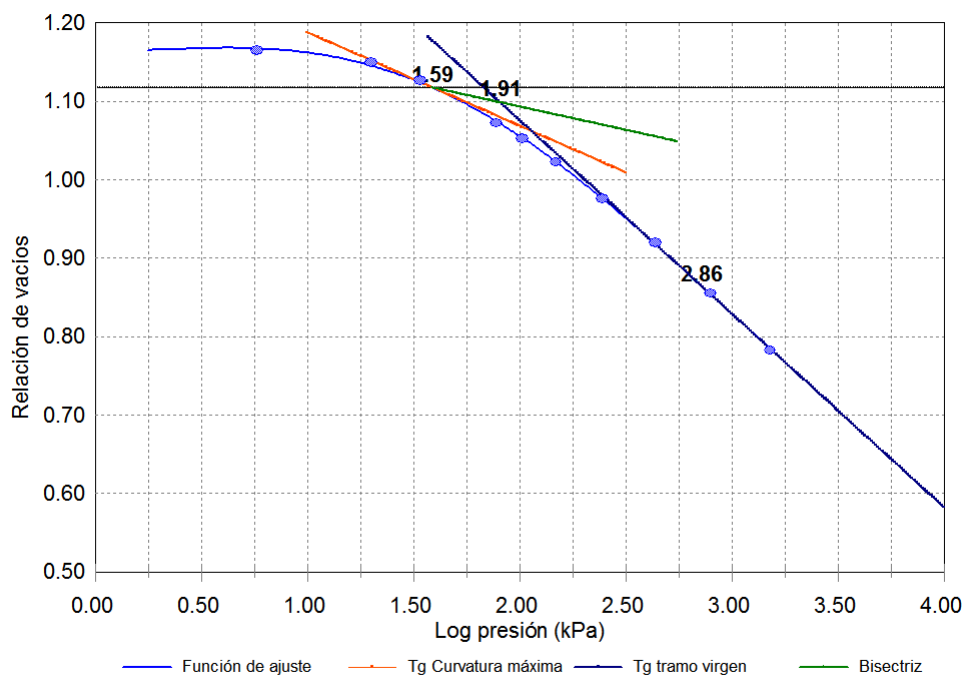


FIGURA 3.3: Relación presión-deformación, expresada como relación de vacíos, de la muestra 1 obtenida en el horizonte Bt₁ a una profundidad de 300 a 400 mm.

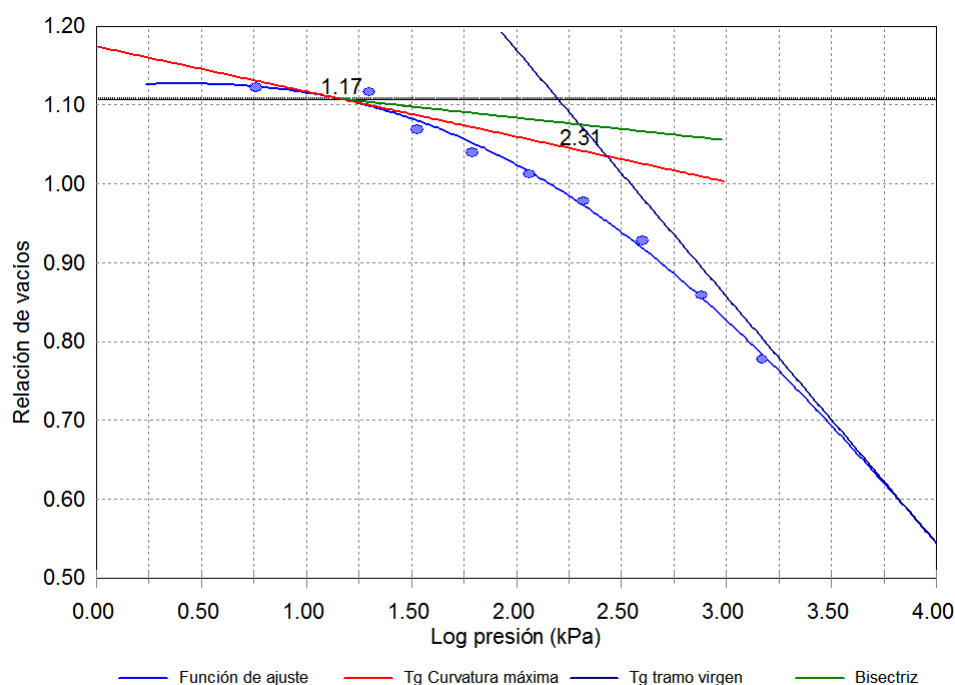


FIGURA 3.4: Relación presión-deformación, expresada como relación de vacíos, de la muestra 2 obtenida en el horizonte Bt1 a una profundidad de 300 a 400 mm.

Muestra	Relación de vacíos en el origen	Punto de máxima curvatura	Presión de preconsolidación (Pc)		Relación de vacíos en Pc	Índice de compresión (Cc)	
	cm ³ /cm ³	(log kPa)	(log kPa)	(kPa)	cm ³ /cm ³	($\Delta y/\Delta x$)	(grados)
1	1,17	1,59	1,91	81,3	1,07	-0,2466	-13,85
2	1,13	1,17	2,31	204,2	0,98	-0,3127	-17,36

TABLA 3.2: Principales parámetros obtenidos de la relación presión-deformación de las muestras obtenidas en el horizonte Bt1 en el rango de profundidad de 300 a 400 mm.

El método tradicional de cosecha conlleva a utilizar máquinas cosechadoras de gran peso y el tránsito de camiones en el área de cultivo. Las máquinas cosechadoras de mayor uso en la zona cañera de Tucumán pesan entre 12 y 16 tn y la mayoría de su masa gravita sobre el tren trasero. Estas máquinas circulan a escasa velocidad y cosechan de a un surco, por lo cual cada entresurco o trocha es pisada dos veces en el transcurso de la labor. Además, el acarreador que transporta el material cosechado hacia los carros tolva o los camiones en el transcurso de la labor, desplaza lateralmente el centro de gravedad provocando que más de la mitad del peso total de la máquina sea ejercido alternativamente sobre una de las dos ruedas traseras. Debido a esto, las máquinas se encuentran equipadas con neumáticos extraviarios no agrícolas ya que, no existe un neumático agrícola que sea

capaz de soportar cargas semejantes. En cualquier tipo de neumático, su capacidad de soportar carga es función de la presión de inflado. Los neumáticos agrícolas utilizan bajas presiones de inflado debido a que éstos cumplen una función de amortiguación, que se logra a partir de la deformación de sus flancos. Los extraviarios por el contrario, usan presiones de inflado del orden de 350 a 400 kPa comportándose entonces como una rueda rígida, por lo cual no tienen prácticamente condiciones para amortiguar cargas ni vibraciones y las transmiten por completo al suelo. Peor aún es el caso de los neumáticos viales utilizados por los camiones, en los cuales la presión de inflado puede alcanzar valores de 650 a 700 kPa. Si se hace una simplificación de esta temática y se asume que la presión de inflado es la que se transmite al suelo, es notable que se superan holgadamente las presiones de preconsolidación encontradas y las cargas que puede tolerar el suelo sin reducir su relación de vacíos.

A partir del índice de compresión, puede estimarse la relación de vacíos en equilibrio ante la aplicación de un determinado nivel de carga, utilizando la siguiente expresión:

$$e_1 = e_0 + tg\alpha(\log_{10} P_1 - \log_{10} P_0)$$

donde e_1 y e_0 son la relación de vacíos final e inicial respectivamente, $tg\alpha$ es el índice de compresión y P_1 y P_0 son las presiones correspondientes a e_1 y e_0 . Si haciendo un cálculo conservador, se considera que la presión actuante es del orden de los 400 kPa, se alcanzaría una relación de vacíos en equilibrio (e_1) de 0,66 a 0,68 en la capa más profunda del horizonte A y de 0,90 a 0,88 en el Bt_1 , en ambos casos en condiciones de saturación hídrica. En el primero de ellos, la disminución de la porosidad fluctúa entre 29 y 38 % mientras que en el segundo, lo hace entre un 9 y un 16 %. Sin embargo, se observaron mayores índices de compresión en el horizonte Bt_1 que en el A (Tablas 3.1 y 3.2), presumiblemente por su mayor contenido de arcilla. Existe entonces una aparente contradicción entre los índices de compresión y el estado final estimado de la relación de vacíos ya que, por su mayor pendiente, sería esperable también una mayor reducción del espacio poroso en el Bt_1 . La diferencia radica en las presiones de preconsolidación calculadas, que determinan el punto de origen de la deformación plástica del suelo. El horizonte A tuvo un comportamiento similar al de una muestra remoldeada, posiblemente por la acción de las labranzas, no siendo posible visualizar su historial de cargas e iniciando su fase de compresión virgen casi desde el origen. En el horizonte Bt_1 , en cambio, se manifestó claramente el proceso de consolidación, reduciendo en consecuencia su etapa de deformación plástica.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Los primeros resultados obtenidos de las pruebas de consolidación parecen evidenciar el efecto del historial de cargas ejercido sobre el suelo. Si bien se prevé continuar con este estudio en el transcurso del ensayo, a fin de obtener mayor información antes de llegar a conclusiones definitivas, el relevamiento realizado en el área experimental sobre otros parámetros físicos tales como la porosidad, la capacidad de aireación, la disponibilidad hídrica y los perfiles de resistencia del suelo, también manifiesta resultados compatibles con una excesiva aplicación de cargas. En lo referente a las consecuencias que puede provocar el continuar con el sistema de manejo convencional, existe un elevado gradiente de reducción de la relación de vacíos que tiende a comprometer a futuro la integridad física del suelo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Alakukku, L., P. Weiskopf, W.C.T. Chamen, F.G.J. Tjink, J.P. van der Linden, S. Pires, C. Sommer and G. Spoor. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.* 73, 145-160.

Arvidsson, J. and T. Keller. 2004. Soil precompression stress. I. A survey of Swedish arable soils. *Soil Till. Res.* 77, 85-95.

Arvidsson, J., A. Trautner, J.J.H. van den Akker and P. Schjønning. 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden: II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil Tillage Res.* 60, 79-89.

ASTM D2435. 2003. Standard test method for one dimensional consolidation properties of soil. American Society of testing material.

Berli, M. 2001. Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery. PhD dissertation. 14132. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. 55 pp.

Baumgartl, T. and B. Köck. 2004. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 57-65.

Cavaleri, K. M., J. Arvidsson, A., Pires da Silva and T. Keller. 2008. Determination of precompression stress from uniaxial compression tests. *Soil & Tillage Research* 98 (2008) 17-26

Chan, K.Y., A. Oates, A.D. Swan, R.C. Hayes, B.S. Dear and M.B. Peoples. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Till. Res.* 89, 13-21.

Czyz, E.A. 2004. Effect of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil Till. Res.* 79, 153-166.

Dawidowski, J.B. and A.J. Koolen. 1994. Computerized determination of the preconsolidation stress in compaction testing of field core samples. *Soil Till. Res.* 31, 277-282.

Défossez, P. and G. Richard. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Till. Res.* 67, 41-64.

Gregory, A.S., W.R. Whalley, C.W. Watts, N.R.A. Bird, P.D. Hallet and A.P. Whitmore. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil Till. Res.* 89, 45-57.

Horn, R. and T. Baumgartl. 1999. Dynamic properties of soils. In: Sumner, M.E. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, A19-A53.

Horn, R. and H. Fleige. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil Till. Res.* 73, 89-99.

Horn, R. and J. Rostek. 2000. Subsoil compaction processes. In: Horn, R.; van den Akker, J.; Arvidsson, J. (Eds.). *Subsoil compaction. Distribution, processes and consequences*. *Advances in Geocology* 32. IUSS: 44-54

- Imhoff, S., A.P. Da Silva and D. Fallow. 2004. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 17-24.
- Juárez Badillo, E. y A. Rodríguez. 1972. *Mecánica de suelos*. Editorial Limusa. 414 pp.
- Keller, T., J. Arvidsson, J.B. Dawidowski and A.J. Koolen. 2004. Soil precompression stress. II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil Tillage Res.* 77, 97-108.
- Lebert, M. and R. Horn. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Till. Res.* 19, 275-286.
- Lipiec, J. and R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116 (2003) 107-136.
- Mosaddeghi, M.R., A.J. Koolen, A. Hemmat, M.A. Hajabbasi and P. Lerink. 2007. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structured soils. *J. Terramechs.* 44, 53-63.
- Pagliai, M., N. Vignozzi and S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil & Tillage Research* 79 (2004) 131–143
- Pereira, J.O., P. Défossez and G. Richard. 2007. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *Eur. J. Soil Sci.* 58 (1), 34-44.
- Rucknagel, J., B. Hofmann, R. Paul, O. Christen and K.J. Hülsbergen. 2007. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil Till. Res.* 92, 213-220.
- Soane, B.D. and C. van Ouwerkerk. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction and Crop Production*. Developments in Agricultural Engineering, vol. 11. Elsevier, Amsterdam, 1-21.
- Terzaghi, K. 1936. Simple tests determine hydrostatic uplift *Eng. News Rec.*, 116, 872-875. 18 June, 1936.
- Trautner, A. and J. Arvidsson. 2000. Subsoil compaction caused by machinery traffic at different soil water contents. In: Arvidsson, J., van den Akker, J.J.H., Horn, R. (Eds.), *Proc. 3rd Workshop of the Concerted Action "Experiences with the Impact of Subsoil Compaction on Soil, Crop Growth and Environment and Ways to Prevent Subsoil Compaction"* 14-16 June 2000, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 122-130.
- Veenhof, D.W. and R.A. McBride. 1996. Overconsolidation in agricultural soils. I. Compression and consolidation behavior of remolded and structured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 362-373.

La presente publicación integra una serie de Informes Técnicos editada por el Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos del Instituto de Ingeniería Rural. Estos informes tienen como finalidad poner a disposición de los profesionales oficiales y privados, la información generada en los trabajos de investigación llevados a cabo por el mismo.



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación