

## Compactación de un suelo vertisol producida por tránsito repetido de un tractor agrícola pesado Compaction of a clay soil by repeated traffic of a heavy agricultural tractor

Francisco Gutiérrez Rodríguez<sup>1\*</sup>, Verónica Landeros Flores<sup>1</sup>, Andrés González Huerta<sup>1</sup>, Rodolfo Serrato Cuevas<sup>1</sup>, Héctor Bastida Estrada<sup>2</sup>, Sindy Valdez Escamilla<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del estado de México (UAEMéx.) Tel. y Fax: (52)(722) 296 55 18, México.

<sup>2</sup> Estudiante de Tesis, Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMéx., México.

E-mail: [fgrfca@hotmail.com](mailto:fgrfca@hotmail.com)

---

**RESUMEN.** En un suelo vertisol, en el cual la preparación primaria de suelos fue realizada con un multiarado modelo M-250, se realizaron diferentes evaluaciones con distintas intensidades de tráfico y condiciones de lastre del tractor modelo J.D.6603 y presión de aire en los neumáticos. Los resultados indicaron que en este tipo de suelo, en época de sequía, en los primeros 15 cm de profundidad la compactación no es seriamente afectada por la intensidad de tráfico en comparación con el testigo, sin embargo, la resistencia a la penetración (Rp) dada en kPa entre repeticiones fue altamente significativa, así como en los niveles de 5 a 15 cm y de 30 a 45 cm de profundidad, fue significativa al 5 %. La interacción lastre del tractor por número de pasadas, fue significativa en el nivel de 30 a 45 cm al 5 %. En el análisis de comparación de medias no existieron diferencias estadísticas, pero sí numéricas y su comportamiento estuvo acorde con las variables lastre y presión de aire empleada en los neumáticos del tractor. En el análisis de correlación el valor -0,42 fue altamente significativo entre las variables Rp (15 cm) y Rp (45 cm). La densidad aparente se mostró muy por debajo (1,30 g/cm<sup>3</sup>) en las diferentes intensidades de tránsito del tractor con respecto a lo mostrado por los testigos (1,41 g/cm<sup>3</sup>).

**Palabras clave:** Compactación, tránsito, densidad aparente, tractor.

**ABSTRACT.** In a clay soil (vertisol), the primary preparation was done with a multiplow M-250; different assessments were conducted in different intensities and traffic conditions ballast tractor model JD.6603 and air pressure in the tires. The results in this type of soil during drought in the first 15 cm deep showed that, compaction is not seriously affected by the intensity of traffic in relation to conditions control, however resistance to penetration (Rp) given in kPa between replicates were highly significant, as well as levels from 5 to 15 cm and 30 to 45 cm deep, were significant (5%). Tractor ballast by number of passes, interaction was significant (5%) in the level from 30 to 45 cm. The comparison between treatment means showed that there were no statistical differences, but this behavior and its digital line with the variables ballast and air pressure used in the tractor tyres showed numerical differences. In correlation analysis of the value -0.42 was highly significant between Rp (15cm) and Rp (45cm) variables. The bulk density was well below (1,30 g/cm<sup>3</sup>) at different intensities transit tractor regarding shown by the witnesses (1,41 g/cm<sup>3</sup>).

**Key words:** Compaction, transit, bulk density, tractor.

---

## INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente utilización de técnicas más modernas, como la siembra directa o labranza cero y la labranza reducida, el tema de la compactación física de los suelos ha sido objeto de un sin número de conjeturas y discusiones entre agricultores y científicos.

El tráfico de tractores y máquinas agrícolas sobre el suelo produce hundimiento de la capa arable y compactación del suelo y, por lo tanto afectación de la densidad aparente, que aunado a una mayor o menor humedad ocasiona un daño que podría permanecer por muchos años. La magnitud de esta

afectación tiene relación con la masa de las máquinas y los tractores utilizados, presión de inflado de los neumáticos, lastres utilizados en los tractores, humedad, tipo de suelo y sus propiedades físicas y químicas, y con la velocidad de desplazamiento del conjunto máquina tractor, entre otros.

Lo anteriormente señalado conlleva a una correcta selección de las máquinas a utilizar, por lo que en el presente estudio se evaluaron diferentes condiciones en las cuales el tractor transita por un suelo donde se aplicó inicialmente una preparación primaria con multirado modelo M-250 y después se hizo transitar un tractor J.D. modelo 6603 de destinación común con diferentes lastres, con tracción en las cuatro ruedas (4X4) y diferentes presiones de inflado en los neumáticos. Se evaluó la compactación del suelo por medio de la resistencia a la penetración o índice de cono modelo SC-900.

Los suelos vertisol son los más difíciles de elaborar y presentan cambios muy bruscos en las épocas de sequía y abundante precipitación pluvial; en estas condiciones son muy susceptibles a la compactación por el tráfico de maquinaria agrícola (Jorajuría y Draghi, 2000), por lo que la compactación es la desaparición del espacio poroso, especialmente de los macro poros, que trae como consecuencia una menor aireación a nivel de raíces, menor capacidad para obtener agua y nutrientes, así como una mayor impedancia para el desarrollo de las raíces. (McGarry, 2001)

Algunos investigadores definen la compactación superficial (Urgen y Kaspar, 1994) como la producida en el horizonte arable y la sub superficial como la producida por debajo de la profundidad normal de labranza.

Al respecto Botta *et al.* (2006a), señalan cómo en una primera distinción de efectos corresponde diferenciar compactación superficial de subsuperficial. La primera involucra la capa arable,

siendo producida por ciclos anuales de aflojamiento y preparación de la cama de siembra, a la que se agregan las operaciones posteriores. Esto ocurre normalmente por el empleo de maquinaria de bajo peso y presión sobre el suelo, utilizada en condiciones de alta humedad o sobre suelos con mayor susceptibilidad a la compactación. Por otra parte, Horn *et al.* (2001), expresan que la compactación producida por el tráfico de tractores sobre suelos de cultivo, está dada en grado extremo por la carga en cada rueda del tractor, por el tipo de neumático y la presión ejercida sobre el suelo. En general la utilización de altas cargas en rueda, el uso de neumáticos angostos y con altas presiones de inflado, contribuye a agravar los problemas de compactación (Ridge, 2002)

Según Botta *et al.* (2002), el tráfico vehicular es el principal responsable de la compactación inducida en los suelos bajo siembra directa, siendo la textura y su contenido de humedad los aspectos más relevantes en relación con la reducción del espacio poroso. En tal sentido, establecen que en suelos arcillosos son mayores los riesgos de compactar el subsuelo a niveles que limiten la producción agrícola y también será mayor la persistencia del daño realizado. El número de veces en que el sustrato es transitado, también es un factor determinante de la compactación inducida, por lo que la densidad aparente, la profundidad y la superficie del suelo compactado, aumentan progresivamente con el número de pasadas del sistema de rodaje de los tractores (Jorajuría *et al.*, 1997 y Botta *et al.*, 2004). Terminiello *et al.* (2000), determinaron que la compactación inducida por el tránsito de vehículos agrícolas se detecta con mayor claridad utilizando la evolución de la resistencia a la penetración a través de la densidad aparente e, inclusive, señalan que con el aumento del número de pasadas del sistema de rodaje del tractor por el campo de cultivo de col (repollo) (*Brassica oleracea* L), disminuye la biomasa aérea y la materia seca; lo que no se especifica en el estudio es el tipo de suelo utilizado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo en enero de 2008, en el periodo sin precipitación pluvial. Se utilizó un terreno de la Facultad de Ciencias Agrícolas

de la Universidad Autónoma del Estado de México, en un suelo vertisol, donde cinco años atrás se hizo una nivelación espacial con rayo

láser y donde predominó la siembra de trigo.

Esta Facultad está localizada en el Cerrillo, Piedras Blancas, estado de México, México, dentro de la región conocida como el Valle de Toluca, a 60 km de la ciudad de México.

La clasificación del suelo según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norte América (USDA), se encuentra en el orden vertisol, subgrupo Entic pelluderts. El lote experimental tuvo un contenido de arcilla superior al 30 % hasta los 50 cm de profundidad, presentando la formación de grietas de más de un centímetro de anchura hasta una profundidad de 50 cm. Esta cantidad de arcilla provoca la formación de superficies de fricción propias de los suelos que se encuentran dentro de este orden. El análisis del perfil del suelo vertisol donde se realizó la investigación fue caracterizado y hecho en el laboratorio de suelos de esta Facultad por Valencia Becerril en 2004.

Se efectuaron mediciones de la compactación del suelo ocasionada por el tránsito de un tractor J.D. modelo 6 603, con tracción delantera asistida y cubiertas delanteras 13.6-24 y las traseras 18,4-34. Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar con tres repeticiones con un arreglo de parcelas. La resistencia a la penetración ( $R_p$ ) fue medida a la profundidad de 5 a 15; 15 a 30 y 30 a 45 cm; también se determinó la humedad del suelo ( $H_o$ ) para cada medición (en la capa superficial de 0 a 5 cm la resistencia a la penetración siempre superó los 500 kPa). Las variantes utilizadas en el tractor fueron las siguientes: a) aire completo en los neumáticos traseros (140 kPa) y delanteros (110 kPa) con contrapesos; b) aire incompleto en los neumáticos traseros (75 kPa) y delanteros (110 kPa) con contrapesos; c) aire completo sin contrapesos y d) aire incompleto sin contrapesos. La masa del tractor sin contrapesos fue de 4 160 kg y la masa con contrapesos y líquido en las cubiertas fue de 5 772 kg. El tránsito realizado por el tractor en cada una de estas variantes en las parcelas fue de tres, cinco y diez pasadas, en el escalón de velocidad A-2 igual a 4,0 km/h. Las

mediciones realizadas se efectuaron sobre la huella del neumático del tractor y para cada nivel se realizaron cinco mediciones, las cuales se promediaron considerando los índices de cono obtenidos y la humedad del suelo en cada nivel de profundidad; las mediciones hechas en el testigo se realizaron en las calles laterales de la parcela experimental.

Para el análisis e interpretación de los datos se utilizaron el análisis de varianza, la comparación de medias de tratamientos con la prueba de Tukey ( $p < 0,01$ ) y los coeficientes de correlación lineal entre parejas de variables. Estas técnicas estadísticas están descritas en Martínez (1988)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar estadísticamente las diferentes variables medidas en los tratamientos (tabla 1) se encontró que existen diferencias altamente significativas entre repeticiones para los diferentes niveles de resistencia a la penetración; también se detectaron diferencias significativas para la humedad del suelo en los intervalos de 5 a 15 y de 30 a 45 cm de profundidad. Para las diferentes cargas del tractor (Factor A) estas fueron significativas al 5 % en la resistencia a la penetración ( $R_p$ ) en los niveles de 5 a 15 y de 30 a 45 cm de profundidad; en este nivel la compactación registrada corrobora lo expresado por Urgan y Kaspar (1994). Otros efectos altamente significativos también se observaron en la humedad del suelo en el nivel superior e inferior y significativos al 5 % en el nivel intermedio.

En las diferentes intensidades de tráfico por las parcelas ningún resultado tuvo significación, lo cual niega lo señalado por Jorajuría y Draghi (2000) para los suelos vertisoles, ya que en esta época de sequía el comportamiento de la compactación sólo presentó diferencias numéricas entre tratamientos; en estas condiciones el lastre que tenga el tractor no es importante. Sin embargo, al observar la interacción lastre por tránsito (tipo A x B), las diferencias fueron significativas al nivel de 30 a 45 cm en la  $R_p$  y al nivel intermedio de humedad del suelo ( $H_o$ ). Los bajos coeficientes

de variación se consideran dentro de los parámetros normales de trabajo (tabla 1) y permiten una interpretación confiable de los resultados.

**Tabla 1. Suma de cuadrados y valores de F para la resistencias a la penetración Rp a diferentes profundidades y humedad del suelo Ho, con cuatro diferentes lastres (métodos) en el tractor y diferentes intensidades de tráfico en un suelo vertisol, en el Cerrillo, Piedras Blancas, EDOMEX. Año 2008**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Rp (kPa) (15 cm)	Rp (kPa) (30 cm)	Rp (kPa) (45 cm)	Ho (%) (15 cm)	Ho (%) (30 cm)	Ho (%) (45 cm)
Repetición	2	7,3320**	3,8155**	7,6594**	13,5442*	12,8832ns	26,2700*
Lastre (A)	4	3,898*	0,4679ns	3,6056*	166,15**	132,36*	98,6272**
Error A	8	2,6236	1,8943	5,6910	95,0569	231,06	102,29
Tránsito (B)	2	0,1929ns	0,0287ns	0,7072ns	6,6350ns	0,6200ns	3,2105ns
Lastre x tránsito (AxB)	6	2,1494ns	2,3172ns	3,8795*	10,5661ns	137,66*	22,9850ns
Promedio Aritmético	---	371 kPa	249 kPa	258 kPa	13,94	20,33	22,09
C.V. (%)	---	15,20	17,83	17,12	8,81	13,66	7,41

En la tabla 2 se observa que a una profundidad de 5 a 15 cm, los valores para las diferentes tratamientos de uso del tractor están relacionados con el lastre que se le impone al mismo durante las diferentes pasadas (tránsito) por la parcela experimental; en este nivel de profundidad sólo el testigo registró un valor de 400 kPa, el cual se tomó en la calle donde no se había preparado el suelo con multiarado y se considera alto, pero debe tenerse en cuenta el lugar donde se realizó

el muestreo y la época de sequía, que es justificable, pues al realizar las pruebas de laboratorio su densidad aparente fue de 1,41 g/cm<sup>3</sup>, en los demás niveles el valor de la densidad aparente estuvo por debajo de 1,30 g/cm<sup>3</sup>, lo cual muestra que a veces se puede justificar la compactación de un suelo no sólo a través de la penetrometría, también con el valor de la densidad aparente del suelo, estos resultados difieren de los de Terminiello *et al.* (2000).

**Tabla 2. Comparación de medias del tractor modelo 6603, promediando la información de las variables de resistencia a la penetración (Rp) y humedad del suelo (Ho), por niveles de profundidad evaluados en el Cerrillo Piedras Blancas, Mexico. Año 2008**

variables	Rp (15cm) (kPa)	Ho (15cm) (%)	Rp (30cm) (kPa)	Ho (30cm) (%)	Rp (45cm) (kPa)	Ho (45cm) (%)
ACC	406 a	13,6 a	243 a	17,68 a	245 a	21,27 a
AIC	378 a	13,43 a	260 a	19,88 a	223 a	20,68 a
ACS	373 a	12,32 a	259 a	20,44 a	297 a	22,51 a
AIS	318 a	14,16 a	242 a	22,14 a	281 a	22,27 a
testigo	400 a	20,74 a	224 a	23,89 a	217 a	27,02 a

Las medias con la misma literal dentro de cada columna son iguales estadísticamente (Tukey, p<0,01)

ACC = tractor con aire completo y contrapesos; AIC = tractor con aire incompleto en los neumáticos y contrapesos; ACS = tractor con aire completo en los neumáticos y sin contrapesos; AIS = tractor con aire incompleto en los neumáticos y sin contrapesos.

En la Figura 1 se muestra el comportamiento de las variables en el nivel de profundidad de 15 a 30 cm; en esta se puede observar que la humedad del suelo tuvo un papel preponderante, ya que en la mayoría

de los casos al aumentar la humedad del suelo disminuyó el índice de cono y sólo se observó un comportamiento diferente en aire incompleto con contrapeso, esto podría estar relacionado con la

cantidad de humedad retenida en el ciclo agrícola por los suelos vertisoles.

En la Figura 2 se observa un aumento del índice de cono (Rp), tendencia contraria a la esperada en función del lastre que tiene el tractor en cada una de las variantes; en este nivel de profundidad, aun cuando la humedad fue mayor, la resistencia a la penetración o índice de cono también aumentó inversamente, esto

último corrobora lo determinado por Botta *et al.* (2006a), quienes indicaron que a veces la mayor compactación que se observa en los suelos se registra en la capa subsuperficial y es ocasionada por sistemas de rodaje con tractores de bajo peso. Las variantes aire completo sin contrapeso y aire incompleto sin contrapesos, fueron las que presentaron menor masa y las que corresponden a los resultados observados por estos investigadores.

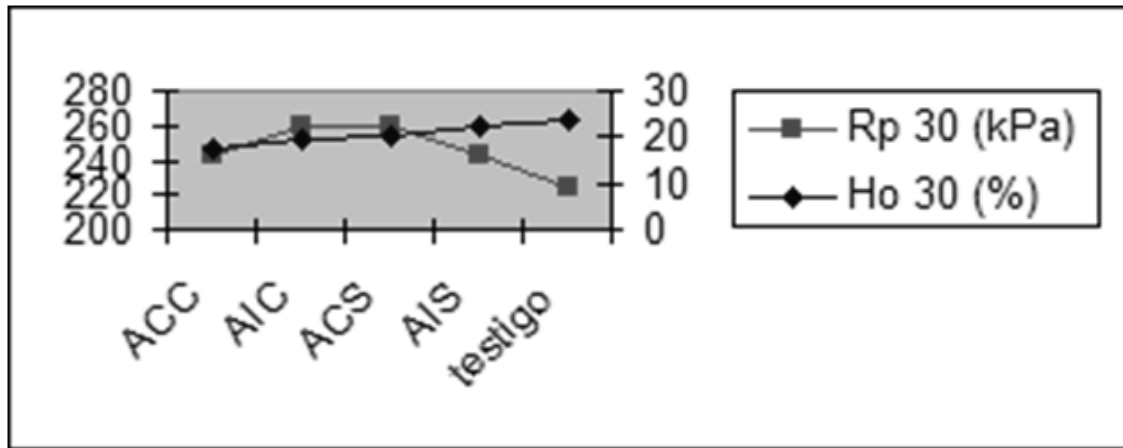


Figura 1. Gráfica de la resistencia a la penetración y humedad del suelo a una profundidad de 15 a 30 cm

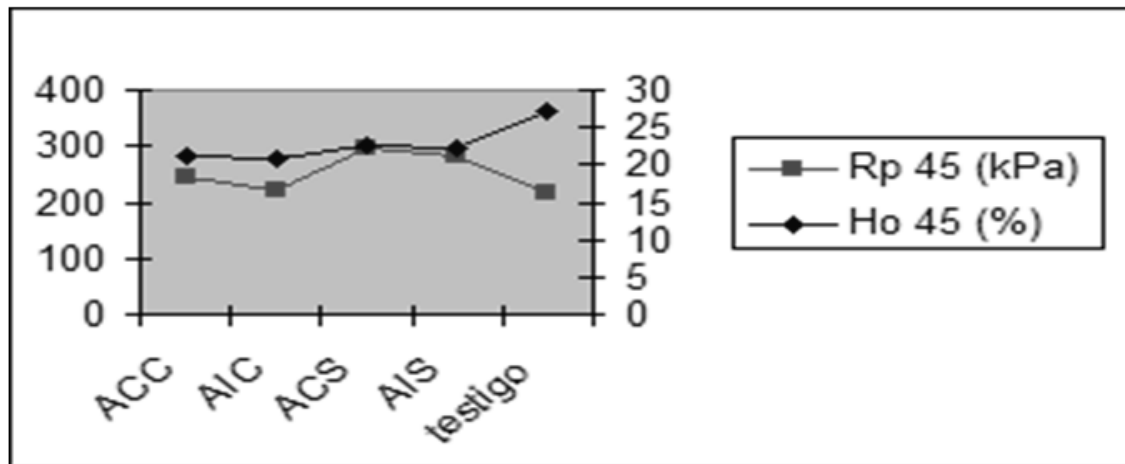


Figura 2. Gráfica de la resistencia a la penetración y humedad del suelo a una de profundidad de 30 a 45 cm

Tabla 3. Análisis de correlación entre resistencia a la penetración y humedad del suelo a diferentes niveles de profundidad, en el Cerrillo, Piedras Blancas, Edomex. Año 2008

Variables	Rp (kPa) (30 cm)	Rp (kPa) (45 cm)	Ho (%) (15 cm)	Ho (%) (30 cm)	Ho (%) (45 cm)
Rp 15 cm	- 0,327*	-0,424**	-0,289ns	-0,023ns	0,184ns
Rp 30 cm		0,295ns	0,036ns	-0,366*	-0,235ns
Rp 45 cm			0,014ns	-0,068ns	-0,204ns
Ho 15 cm				0,250ns	0,613**

El análisis de correlación ( $r$ ) entre los pajas de variables (resistencia a la penetración  $R_p$  y humedad del suelo  $H_o$ ) arrojó un coeficiente de  $-0,32$   $R_p(15\text{cm})$  y  $R_p(30\text{cm})$  detectándose una asociación significativa al 5%. Entre las variables  $R_p(15\text{cm})$  y  $R_p(30\text{cm})$  con coeficiente de  $-0,42$  la correlación también fue significativa al 5%. Otras correlaciones significativas también se detectaron entre la  $R_p(30\text{cm})$  y la  $H_o(30\text{cm})$ ; con un valor de  $-0,36$ ; y entre  $H_o(15\text{cm})$  y  $H_o(45\text{cm})$ , con un valor de  $0,61$  (tabla 3). En todos los casos, las correlaciones negativas que se observaron en el estudio indicaron que los mayores valores de resistencia a la penetración se atribuyen a los bajos valores de la humedad en el suelo.

## CONCLUSIONES

1. Al observar el comportamiento de la compactación en los diferentes tratamientos, se concluye que los suelos vertisoles son altamente inestables.
2. El lastre que se adiciona al tractor para la preparación de suelo afecta la resistencia a la penetración en la capa superficial y la subsuperficial; la capa intermedia del suelo presentó menores daños.
3. En la capa superficial del suelo tiene una gran influencia el lastre en el tractor y la presión de aire en el neumático.
4. En algunos casos el valor de la densidad aparente se relacionó con la compactación experimentada en el suelo por el tránsito del tractor.
5. La compactación del suelo aumentó en los primeros 15 cm de profundidad conforme aumentó el número de pasadas del sistema de rodaje del tractor.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Botta, G.; D. Jorajuría and L. Draghi: "Influence of the axle load, tyre seze and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil," *Journal of Terramechanics*. Vol. 39, pp. 47-54, 2002.
2. Botta, G.; D. Jorajuría; R. Balbuena and H. Rosatto: "Mechanical behavior o fan agricultural soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glicine max* L.) yields," *Soil and Tillage Research*. Vol.78, pp. 53-58, 2004.

3. Jorajuría, D.; L. Draghi and A. Aragon: "The effect of vehicle weigth on the distribution of compactation with depth and the yield of a Lolium/Trifolium grassland." *Soil and Tillage Research*. Vol.41, pp. 1-12, 1997.

4. Jorajuría, D. y L. Draghi: "Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte 1: Influencia del peso y el número de pasadas," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4(3): 445-452, 2000.

5. Botta, G.; D. Jorajuría; H. Rosatto and C. Ferrero: Light tractor frequency on soil compaction in the rolling Pampa region of Argentina. Vol. 86, pp. 19-24, 2006.

6. Martínez G., A.: *Diseños Experimentales, Métodos y elementos de teoría*. 1<sup>ra</sup> edición Editorial Trillas, México, D.F, 756 pp., 1988.

7. McGarry, D.: Tillage and soil compactaction, in García-Torres, L., Benítes, F., Martinez-Vilela, A. (eds), First World Congress on Conservation Agriculture, 1-5 October, 2001, Madrid, Spain, Natural Resource Sciences, pp. 281-291, 2001.

8. Unger, P. W. and T.C. Kaspar: "Soil compactation and rooth growth: A review," *Agron J.* 86: 759-766, 1994.

9. Horn, R.; T. Way and J. Rostek: "Effect of repeated wheeling on steess/strain properties and ecological consequences in structured arable soils," *Revista de las Ciencias del Suelo y Nutrición Vegetal* vol. 1, pp. 34-40, 2001.

10. Ridge, R.: "Trends in sugar cane mechanization," *Int.Sugar J.* 104: 164-166, 2002.

11. Terminiello, A. M.; H. R. Balbuena; J.A. Claverie y J.P. Casado: "Compactación inducida por el tránsito vehicular sobre un suelo en producción hortícola," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(2): 290-293, 2000.

Recibido: 15/octubre/2008

Aceptado: 05/diciembre/2008