

# RESISTENCIA TRACCIONAL DEL SUBSOLADOR EN FUNCIÓN DEL ANCHO DE TRABAJO

## TRACTIONAL FORCE OF THE PLOW SUBSOILER AS A FUNCTION OF WORK WIDTH

Eugenio Romantchik K.<sup>1\*</sup>; Ismael Sandoval Assia<sup>2</sup>; Noel Chávez Aguilera<sup>1</sup>;  
José Gaytán Ruelas<sup>1</sup>; Pedro Mayans Céspedes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230, MÉXICO.

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías, Universidad De Sucre, COLOMBIA  
Correo-e: eugenior@correo.chapingo.mx (\*Autor responsable)

### RESUMEN

Se determinó la fuerza de tracción a la barra de tiro demandada por un subsolador con puntas tipo ala y tipo formón, cuando la distancia entre cuerpos varía de 80 a 160 cm. Las ecuaciones obtenidas con los dos tipos de punta en los dos tipos de suelo, pueden ser utilizadas para calcular la potencia entregada por el motor del tractor para seleccionarlo. El experimento fue realizado en dos parcelas, con suelo arcilloso y suelo franco arcilloso. De acuerdo a las mediciones realizadas, para el subsolador provisto con puntas tipo ala la mejor distancia de separación entre cuerpos es 120 cm con una fuerza de tracción demandada de 26.20 kN en el suelo arcilloso y de 27.58 kN en el suelo franco arcilloso. Si el subsolador es equipado con puntas tipo formón, la fuerza de tracción requerida no cambia al variar la distancia de separación entre cuerpos, siendo la fuerza de tracción demandada de 20.37 kN en el suelo arcilloso e incrementada en un 7 % en el suelo franco arcilloso.

**Palabras clave adicionales:** maquinaria agrícola, fuerza de tracción a la barra de tiro, suelo arcilloso, suelo franco arcilloso.

### ABSTRACT

The demanded drawbar pull by a subsoiler fitted with wing and chisel tines was determined when the item-item distance varies of 80 to 160 cm. The obtained equations in both kinds of tine in the two soil textures can be used to assess the delivery power of the tractor engine to select it. The field experiment was carried up in two plots, having clay soil and clay loam soil textures. According to the accomplished measures, for the subsoiler with wing tine the best item-item distance is 120 cm with a demanded drawbar pull of 26.20 kN on the clay soil and 27.58 kN on the clay loam soil. When the subsoiler is fitted with chisel tines, the required drawbar pull does not vary with the item-item distance varying, being the drawbar force of 20.37 kN on the clay soil and increased the 7 % on the clay loam soil.

**Additional key words:** farm machinery, drawbar pull, clay soil, clay loam soil.

### INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo en condiciones de campo es comúnmente causada por la labranza, lo que trae como consecuencia la frecuente aparición de una capa sobrecompactada en horizontes ubicados por debajo de la superficie arable anualmente, reduciéndose la porosidad del

suelo, la retención de agua y la actividad radicular (Jorajuría y Draghi, 1997). Los subsoladores son aperos de labranza vertical empleados en la labranza primaria del suelo. Tienen la misión de remover las capas profundas del terreno sin voltearlas ni mezclarlas sin efectos apreciables sobre la vegetación o rastrojo superficial (Saens, 2000; Márquez, 2004). Hasta el presente, investigadores como Reece (1965), Hettiaratchi y Reece (1967),

Godwin y Spoor (1977) y Mouazen y Ramón (2002) han tratado de establecer modelos matemáticos y una serie de ecuaciones para simular la fuerza de tracción obtenida durante la operación de la labranza. Estas ecuaciones se han aplicado a un tipo de suelo en particular; es por ello que aplicando métodos empíricos cada grupo de suelo debe tener su propio sistema de ecuaciones que le permitan determinar las necesidades de tracción de las herramientas de labranza más utilizadas.

Los requerimientos energéticos de los implementos de labranza se incrementan o disminuyen en proporción directa con la densidad aparente del suelo, estando también directamente relacionados con la profundidad de trabajo, el ancho del implemento, velocidad de trabajo y las propiedades del suelo (Mouazen y Ramón, 2002). Entre las propiedades del suelo que están directamente relacionadas con el consumo energético de una herramienta de labranza, está el contenido de humedad, la densidad aparente, el índice de cono y la textura del suelo (Upadhyaya *et al.*, 1984)

La ASAE (2005a, 2005b) en sus publicaciones ha venido proponiendo modelos matemáticos para el cálculo de la fuerza demandada por una herramienta de labranza (Ecuación 1):

$$F = f_i (A + B \cdot V + C \cdot V^2) \cdot W \cdot T \quad (1)$$

donde:  $f_i$  es un parámetro adimensional de ajuste de la textura del suelo;  $A$ ,  $B$  y  $C$  son parámetros específicos del subsolador. Para el tipo formón ( $A=226$ ,  $B=0$  y  $C=1.8$ ), para el tipo ala ( $A=294$ ,  $B=0$  y  $C=2.4$ ). Por otro lado  $W$  es el ancho de corte del subsolador (m),  $T$  es la profundidad de trabajo (cm),  $V$  es velocidad de operación ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) y  $F$  es fuerza de tracción (N).

Dicho modelo, al igual que el propuesto por autores anteriores, no indica el rango de variación entre brazos para el cual  $W$  es válido, y tampoco los parámetros de ajuste del modelo relacionados con las características de la herramienta para el caso de arados subsoladores se dan cuando el arado subsolador tiene punta tipo formón con un ancho de 5 cm y punta tipo ala con ancho de 30 cm, no indicando la forma de calcular la fuerza demandada por la herramienta cuando el ancho de la punta es diferente.

Según Saens (2000), el espaciamiento entre los brazos variará con la profundidad del trabajo, el número de pasadas y la potencia del tractor; realizándose una buena labor cuando la separación entre brazos equivalente a 1.1 veces la profundidad de trabajo, requiriéndose dos pasadas cuando la profundidad de trabajo es superior a los 30 cm, el cual es un valor muy cercano al obtenido por Godwin (2003) con dientes simples y alados, quien mostró que la cantidad de suelo disturbado depende de la separación entre dientes y que el mejor aflojamiento del suelo ocurre cuando los dientes son alados. Según este autor, para dientes simples los espaciamientos prácticos recomendados para un buen aflojamiento del suelo son de aproximadamente 1.5 veces la profundidad de trabajo y dos veces la profundidad de trabajo para dientes alados.

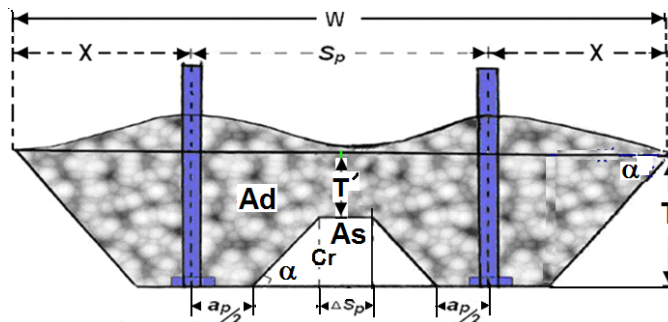


Figura 1. Ancho de trabajo del subsolador.

Con el presente trabajo se pretendió determinar teórica y prácticamente la fuerza de tracción demandada por un subsolador con puntas tipo ala y formón con variación de su ancho de puntas, así como con diferentes separaciones entre brazos, cuando trabaja en dos tipos de suelo a una profundidad de 40 cm, para seleccionar el tractor correspondiente y/o velocidad de trabajo, aumentar eficiencia y reducir costos en las labores de remoción de suelos.

Para determinar teóricamente la fuerza de tracción de un subsolador con diferentes anchos de punta y separación entre brazos se analizó el esquema presentado en la Figura 1. El ancho de trabajo teórico ( $W$ ) se calculó teniendo presente el área removida por cada uno de los brazos por medio de la Ecuación (2) o bien la Ecuación (3):

$$W = S_p + 2X \quad (2)$$

$$W = 2T \left[ \frac{1 + K_1}{\tan(\alpha)} \right] + 2a_p + \Delta S_p \quad (3)$$

donde:  $S_p$  es la separación entre brazos (cm);  $X=(1+K_1)/\tan(\alpha)$  es parte lateral de ancho de trabajo (cm),  $K_1 = Cr/T$  es la relación entre altura de cresta y profundidad de trabajo;  $Cr = T - T'$  es altura de cresta no disturbada, o bien, la diferencia entre la profundidad de trabajo ( $T$ ) y la profundidad mínima de trabajo ( $T'$ ) o suelo disturbado en el punto medio de  $S_p$  (cm);  $j$  es el ángulo de rozamiento interno del suelo (grados); [ $j < 8^\circ$ ] para suelo arcilloso y [ $10 < j < 20$ ] para suelo arenoso;  $a_p$  es el ancho de la punta utilizada en el subsolador (cm) y  $\Delta S_p$  es la longitud de suelo removida en la dirección perpendicular al avance de la máquina, medida en el centro de la separación entre puntas (cm). Al sustituir la Ecuación (3) en la Ecuación (1) se obtuvo la Ecuación (4):

$$F = f_i T \left( A + BV + CV^2 \right) \left[ 2a_p + \frac{2T}{\tan(\alpha)} \times (1 + K_1) + \Delta S_p \right] \quad (4)$$

Calculando la fuerza de trabajo para una velocidad determinada se puede seleccionar la potencia del tractor o para un tractor dado seleccionar la velocidad de trabajo. Uno de los objetivos de trabajo fue validar la Ecuación (4) comparando con los datos de los experimentos en el campo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Organización general experimental

Se estableció un experimento utilizando un diseño experimental de bloques al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones por tratamiento, donde cada tipo de punta y cada separación entre brazos representaron un tratamiento y cada longitud de 60 m representó una repetición.

En cada tratamiento se midieron propiedades físicas de suelo como textura, contenido de humedad, densidad aparente y densidad real. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio del Departamento Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y las pruebas de campo se realizaron en el lote experimental (1 ha para cada tipo de suelo) denominado "La Xerona" en la misma UACH.

### Características generales del equipo agrícola

El equipo que se empleó en este trabajo fue: tractor marca Massey Ferguson Modelo 592T, con una potencia de 64.8 kW y un peso con lastre de 47431 N; arado subsolador marca Newholland Modelo M250 con dos brazos: puntas tipo ala, un peso de 7306 N, puntas tipo formón y un peso de 6913 N; dinamómetro de enganche en tres puntos, marca UACH modelo DIMA; sistema de adquisición de datos (*datalogger*) marca Madgetech modelo M7777; medidor de combustible marca Onosoki, modelo FP213 y 210-A y Perfilómetro.

### Determinación de los índices y parámetros que califican la calidad de trabajo, desempeño y funcionamiento técnico del agregado tractor-subsolador

Se determinó la fuerza demandada por el subsolador (N), el ancho de trabajo promedio (m), la velocidad de trabajo promedio ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ), la profundidad de trabajo (cm), el perfil transversal, el tamaño de los agregados del suelo (mm), el área disturbada, el consumo de combustible ( $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$  y  $\text{L}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Con valores promedio de ancho y velocidad de trabajo se calculó la capacidad teórica de campo de los implementos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar el cálculo teórico de la fuerza demandada por un implemento agrícola utilizando la Ecuación (1), propuesta por la ASAE, se observó que para una velocidad teórica de  $3.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  se presentó una variación de  $\pm 50 \%$  en comparación con los resultados de campo, mientras los cálculos realizados por la Ecuación (4) propuesta dio un error entre 2 y 15 %. Empleando la Ecuación (4) utilizamos los siguientes valores:  $T = 40 \text{ cm}$ ;  $V =$

$3.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $f_i = 1$ ;  $A, B$  y  $C$  dados en Ecuación (1);  $K_f = 1$ ;  $a_p = 5$  y  $50 \text{ cm}$  para subsolador tipo formón y tipo ala respectivamente;

$DS_p = 10 \text{ cm}$ ;  $\acute{\alpha} = 49^\circ$  y  $\phi < 8$  para suelo arcilloso; y  $\alpha = 51^\circ$

$8 < \phi < 16$  para suelo franco arcilloso. Para el suelo arcilloso la fuerza calculada demandada por el subsolador con puntas tipo formón fue de  $19.6 \pm 0.04 \text{ kN}$  y para el subsolador con puntas tipo ala la fuerza demandada fue de  $26.2 \pm 2.5 \text{ kN}$  para las separaciones entre los brazos 80 a 160 cm, correspondientemente. Para el suelo franco arcilloso la fuerza calculada demandada por el subsolador con puntas tipo formón varió de 20.82 hasta 23.48 kN y para el subsolador con puntas tipo ala la fuerza demandada varió de 23.65 hasta 30.97 kN para las separaciones entre los brazos 80 a 160 cm respectivamente. Los resultados muestran que existió una diferencia de los cálculos de la fuerza demandada determinados por las Ecuaciones (1) y los resultados de experimento en 50 %, mientras la comparación de los cálculos por la Ecuación (4) nos dio la diferencia de 2 hasta 15 %.

Los resultados del experimento en el campo se muestran el Cuadro 1 y en las Figuras 2 y 3. El Cuadro 1 muestra las

Cuadro 1. Características de las parcela de prueba.

Profundidad (cm)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Drel ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Da ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	H %
<b>Parcela 1. Suelo arcilloso</b>						
0 – 25	124	19.64	67.96	2.36	1.16	9.5
25 – 50	12.76	20.28	66.96	2.35	1.19	9.4
<b>Parcela 2. Suelo franco arcilloso</b>						
0 – 25	40.76	21.28	37.96	2.5	1.32	7.6
25 – 50	42.76	20.28	36.96	2.5	1.32	7.6

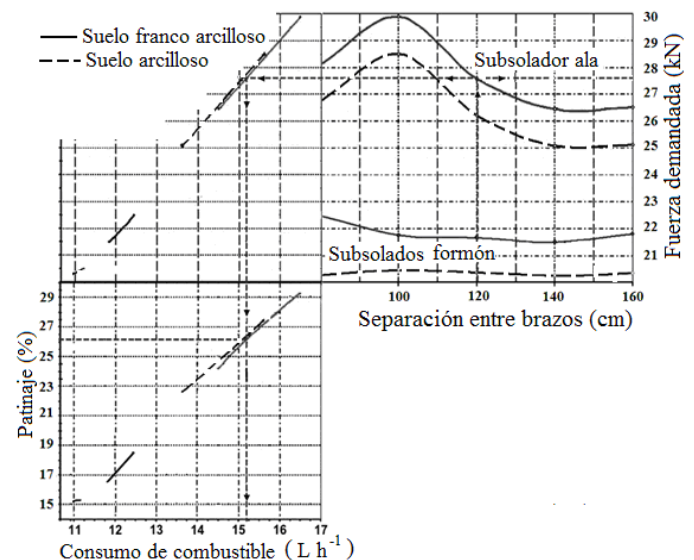
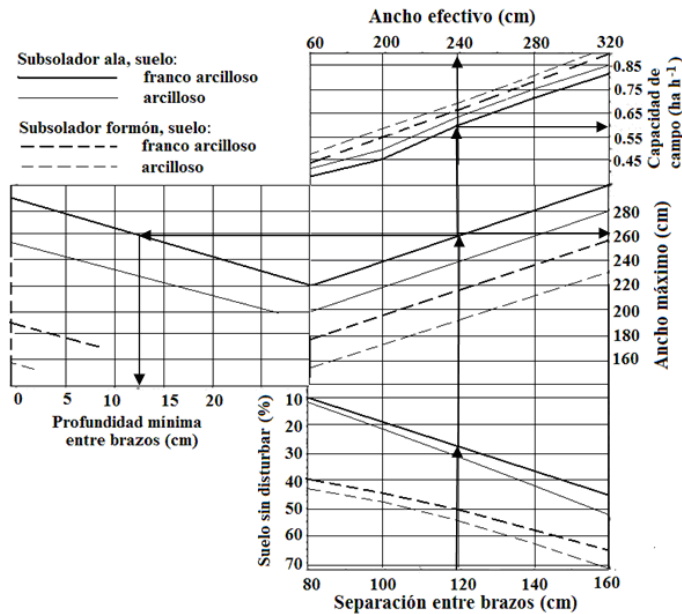


Figura 2. Fuerza demandada por el subsolador, consumo de combustible y patinaje en función de la separación entre brazos.



**Figura 3. Profundidad mínima entre brazos, ancho y porcentaje de suelo sin disturbar en función de la separación entre brazos.**

propiedades físicas del suelo como identificación del tipo de suelo, contenido de humedad ( $H$ ), densidad real ( $D_{real}$ ), y densidad aparente ( $D_a$ ). La diversidad entre las propiedades físicas provocó la diferencia en las fuerzas de resistencia de trabajo, lo que observa en la Figura 2, donde se muestran los siguientes resultados: fuerza demandada por el subsolador (kN) con puntas tipo ala y tipo formón para los dos tipos de suelo (arcilloso y franco arcilloso) a diferentes separaciones entre brazos y una profundidad de trabajo de 40 cm; el combustible consumido por el tractor ( $L \cdot h^{-1}$ ) y el porcentaje de patinaje, para cada tipo de subsolador y tipo de suelo. Asimismo, en la Figura 3 se muestra la profundidad mínima entre brazos, ancho efectivo de trabajo y porcentaje de suelo sin disturbar en función de la separación entre brazos.

El cuadrante superior derecho de la Figura 2 muestra la fuerza demandada por los dos subsoladores en ambos tipos de suelo en la medida en que la separación entre brazos se incrementa, presentando muy pocas variaciones la fuerza demandada por el subsolador con puntas tipo formón al realizar el trabajo en un suelo arcilloso; esta situación contrastó con la labor realizada en el suelo franco arcilloso, en donde hubo un incremento poco significativo en la fuerza demandada por el subsolador (de 22.8 kN a 21.5 kN) cuando la separación entre brazos pasa de 80 a 100 cm.

Si se calcula la fuerza con la Ecuación (1), ésta se incrementaría proporcionalmente al ancho de trabajo. En cuanto al consumo de energía, el suelo franco arcilloso consumió más que el suelo arcilloso, lo cual pudo deberse a que en el momento de realizar el ensayo, el suelo franco arcilloso estaba un 2 % más seco que el suelo arcilloso y su densidad aparente era mayor en comparación con el suelo arcilloso. En la Figura 2 se presenta un

ejemplo de una relación entre los parámetros de trabajo para la separación de 120 cm entre los brazos para un subsolador de punto de ala trabajando en el suelo franco arcilloso. Se observa que para el subsolador con puntas tipo ala la fuerza demandada por el implemento es mínima cuando la separación entre brazos es superior a 140 cm, lo cual, según la Figura 3, se caracteriza por no tener suelo labrado entre dos brazos consecutivos (la profundidad mínima es cero). En la misma Figura 3 se observa que en la medida en que la separación entre brazos se incrementa en el rango de 80 a 120 cm, el porcentaje de suelo sin disturbar se incrementa del 7 al 26 %, siendo este incremento lineal, no ocurriendo así con la fuerza demandada por el implemento, en donde ésta es máxima cuando la separación entre brazos es 100 cm. También se observa que el menor porcentaje de suelo sin disturbar (menos del 26 %) se consigue cuando la separación entre puntas es inferior a 120 cm.

Para el trabajo realizado con el arado subsolador con puntas tipo ala en los suelos arcilloso y franco arcilloso se presentó diferencia significativa en las separaciones entre puntas de 80 cm y 100 cm comparadas con las demás, no encontrándose diferencia significativa en las separaciones entre puntas de 120, 140 y 160 cm. Esto se explica por remover más el suelo entre los brazos con menor superación.

Con la separación entre brazos de 120 cm, en un suelo franco arcilloso con un contenido de humedad del 9 %, el subsolador con puntas tipo ala, trabajando el tractor a una velocidad teórica de  $3.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , presentó la fuerza de 27.6 kN, un patinaje del 26.2 % y un consumo de  $15.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  de combustible diesel (Figura 2), un rendimiento de  $0.58 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ , removiendo el 74 % del suelo con profundidad mínima de trabajo de 12.3 cm (Figura 3). Del suelo removido el 67.7 % de los agregados presentó un diámetro mayor de 76 mm, el 17.3 % de los agregados un diámetro entre 76 y 5 mm y el 15 % de los agregados un diámetro menor de 5 mm.

La diferencia entre los implementos con relación a las fuerzas se vio influenciada por la forma geométrica, la intensidad de corte y la manipulación de suelo que éstos realizan, lo cual fue congruente con los resultados hallados por Zapata (2004).

## CONCLUSIONES

La Ecuación (4) modificada empleada en el cálculo de la fuerza demandada por un subsolador con dos brazos con puntas tipo ala o tipo formón en un suelo arcilloso o franco arcilloso introdujo en los cálculos parámetros del diseño de un subsolador y del suelo y pudo utilizarse para determinar la potencia necesaria del motor para seleccionar el tractor o la velocidad de trabajo. La mejor separación entre brazos se dio cuando el subsolador con puntas tipo ala trabaja con una separación entre brazos de 120 cm; demandando una fuerza en la barra de tiro menor en el suelo arcilloso que en el suelo franco arcilloso y con mayor área de suelo disturbado entre brazos. Cuando el subsolador tuvo puntas tipo formón la fuerza demandada no varió con la separación entre brazos.

### LITERATURA CITADA

- Anónimo. 2005a. ASAE Standard. EP291.3-FEB05. Terminology and Definitions for Soil Tillage and Soil-Tool Relationships. 52nd Edition USA. 347 p.
- Anónimo. 2005b. ASAE Standard. D497.4 FEB03. Agricultural machinery management data. 52nd Edition USA. 398 p.
- Godwin R.J. 2003. A review of the effect of tillage implement geometry on soil failure and implement forces. *In: Proceedings of the 16th International Conference of ISTRO on Soil Management for Sustainability*. Brisbane. Australia. pp. 471-483.
- Godwin R.J.; Spoor G. 1977. Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research* 4(22): 213-218.
- Hettiaratchi D.R.; Reece A.R. 1967. Symmetrical three-dimensional soil failure. *Journal of Terramechanics* 3(4): 45-67.
- Jorajuría D.; Draghi L.M. 1997. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66: 261-265.
- Márquez L. 2004. *Maquinaria Agrícola*. Editorial Black & Helsey. EspañaS L Editores. pp. 171-187.
- Mouazen A.M.; Ramon H. 2002. A numerical-statistical hybrid modelling scheme for evaluation of draught requirements of a subsoiler cutting a sandy loam soil, as affected by moisture content, bulk density and depth. *Soil and Tillage Research* 63: 155-165.
- Reece A.R. 1965. The fundamental equations of earth-moving mechanics. *In: Proceedings of the Symposium on Earth Moving Machinery* 179 (3F). London, U.K.: Institute of Mechanical Engineering. pp. 8-14.
- Saens P.R. 2000. Manual de Prácticas Integradas de Manejo y Conservación de Suelos. Boletín de Tierras y Aguas. FAO No. 66. 121 p.
- Upadhyaya S.K.; Williams T.H.; Kemble L.J.; Collins N.E. 1984. Energy requirements for chiselling in costal plain soils. *Transactions of the ASAE* 27(6): 1643-1649.
- Zapata M.C.; Gaytán T.M.; Zermeño A.G. 2004. Desempeño de implementos de labranza en términos de consumo de energía y calidad de trabajo. *Revista Agraria-Nueva Epoca*. 1(3): 12-17.