

ESTUDIO DEL ESFUERZO DE RODADURA EN TRACTORES ARTICULADOS (4WD) Y DE TRACCIÓN DELANTERA ASISTIDA (FWA)

G. BOTTA^{1*}; M. TOURN¹; O. POZZOLO²; E. SOZA¹; D. RIVERO³; A. TOLÓN BECERRA⁴;
D. AGNES¹; F. BELLORA MELCÓN¹ Y M. BOMBEN⁵

Recibido: 24/05/07

Aceptado: 26/12/07

RESUMEN

En el autotransporte del tractor se producen tres tipos de pérdidas: pérdidas de transmisión, pérdidas por rodadura y pérdidas por patinaje. Las pérdidas por transmisión conciernen al diseño de la misma, las pérdidas por patinaje y rodadura son las que más preocupan al productor. Esta última fue motivo de estudio en este trabajo. Para esto se ensayaron, sobre suelo Argiudol Típico, dos tractores (FWA y 4WD) comunes en nuestro mercado agrícola, sobre tres condiciones de suelo diferentes, suelo arado, cama de siembra y siembra directa. Los parámetros evaluados fueron: esfuerzo de rodadura, profundidad de huella, presión en el área de contacto rueda suelo y peso sobre el eje. Los resultados de esfuerzo de rodadura fueron contrastados con las fórmulas de predicción de Wismer y Luth y de MCallister. Las conclusiones obtenidas fueron: 1) La potencia perdida en rodadura se incrementó en suelos de baja capacidad portante; 2) Para predecir esfuerzo de rodadura en tractores (FWA y 4WD) cuando transitan sobre suelos arados se puede utilizar la ecuación de predicción de Wismer y Luth; 3) El porcentaje de potencia del motor perdida por rodadura fue mayor para el tractor FWA cuando transitó sobre suelos de baja capacidad portante; 4) La menor relación potencia perdida en rodadura/potencia motor fue mejor para el 4WD en suelo cama de siembra y suelo arado, no así en siembra directa y 5) Se encontró, sobre los suelos blandos, una relación directa entre profundidad de huella y el peso del tractor que lo transitó.

Palabras clave. Eficiencia tractiva, neumáticos, capacidad portante.

ROLLING RESITANCE STUDY IN 4WD AND FWA TRACTORS

SUMMARY

Tractor's auto propelled produce three kinds of losses: loss of transmission, loss of rolling resistance and loss of slippage. The loss of transmission depends on their design, the loss for slippage are the more concerning for the farmer. The last one is studied in this work, which was carried out over a Typic Argiudol with two tractors (FWA and 4WD), common in our market, on three different soil conditions, tilled soil, seed bed and direct drill. The parameters evaluated were: rolling resistance, rut depth, ground pressure and axle load. The results for rolling resistance were tested with Wismer and Luth and MCallister prediction formulas. The conclusions were: 1) The power lost in rolling resistance was increased in low bearing capacity. 2) For both tractors (FWA and 4WD), Wismer and Luth prediction formulas can be used. 3) The engine power loss percentage for rolling resistance was higher for the FWA when trafficked over low bearing capacity. 4) The lower relation rolling resistance power loss/engine power was better for the 4WD on seed bed and tilled soil, but not on direct drill soil. 5) On freshly tilled soils there was a direct relation between rut depth and tractor load.

Key words. Tractive efficiency, tyre, bearing capacity.

¹Cátedra de Maquinaria Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. ²Cátedra de Maquinaria Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. ³Cátedra de Maquinaria Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa. ⁴Departamento de Ingeniería Rural, Universidad de Almería, España.

*Av. San Martín 4453, (1417), Buenos Aires, Argentina, gfbotta@agro.uba.ar.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En los últimos 15 años se han ido incorporando en forma creciente al mercado como nueva opción los tractores articulados (4WD) y de tracción delantera asistida (FWA). La función del tractor agrícola no termina en el autotransporte, si no que, como tarea normal, se requiere que además traccione con algún apero. En el autotransporte del tractor se producen tres tipos de pérdidas: pérdidas de transmisión, pérdidas por rodadura y pérdidas por patinamiento. Sobre las primeras pérdidas la injerencia del operador es casi nula, solo bastará con un buen mantenimiento según el manual del operador para evitar que éstas se incrementen, sin embargo, sobre las restantes es mucho lo que se puede hacer.

En los ciclos de labranza convencional (una arada, seguido de rastra de casquetes esféricos o vibrocultivador) se pone al suelo en una condición de alta compactabilidad; es en estos suelos de baja capacidad portante donde se produce el incremento de uno de los factores principales de pérdidas en el cálculo de la potencia disponible en la barra de tiro, la resistencia a la rodadura.

La energía introducida en el sistema por la circulación de la rueda produce cambios en las propiedades estructurales que influyen los contenidos de aire y agua así como la facilidad en que éstos y los nutrientes están disponibles para las plantas (Soane, 1982). El esfuerzo de rodadura está conformado principalmente por la energía utilizada para la formación de una huella al deformarse el suelo, al empuje de la tierra y a la deformación del rodado mismo. La resistencia a la rodadura se incrementa debido a que en esta condición el suelo no puede proveer demasiado soporte al neumático, de esta manera éste producirá el hundimiento y la deformación del suelo (Perdock *et al.*, 1990).

Woody y Burt (1987) definen al esfuerzo de rodadura como la suma de las componentes horizontales de las tensiones normales al neumático. Los mismos autores, en un ensayo realizado en canales edafométricos con cubiertas 18.4-34 en suelos firmes y arados, utilizando cargas dinámicas de 10 y 20 kN y presiones de inflado de 110 y 140 kPa, demuestran que la presión de inflado controla la magnitud de las componentes horizontales en el centro del área de contacto rueda/

suelo y el peso dinámico en el borde del área de contacto. Al mismo tiempo determinaron que el esfuerzo de rodadura es mayor en el suelo arado, ya que en éste el hundimiento fue tal que el espacio entre tacos contribuyó a aumentar las componentes horizontales de las fuerzas normales. La formación de una huella como fuente del incremento del esfuerzo para trasladarse en suelo blando, ha sido estudiada desde principio de este siglo. Con el correr del tiempo se han desarrollado diversos modelos empíricos predictivos del coeficiente de rodadura (K), que introducen bajo distintas formas una caracterización adimensional tal como el valor numérico de la rueda (Cn) de Wismer y Luth (1973) y el similar Bn de Brixius (1987), o bien el número de movilidad (M) de Turnage (1972), Gee Glough *et al.* (1978) y McAllister (1983). Tanto el Cn, como el M, tienen una relación directa con el índice de cono (CI) dentro del modelo primitivo del coeficiente de rodadura (K) y este a la vez tiene una relación directa con el esfuerzo de rodadura. Por lo tanto, es posible inferir que en aquellas condiciones de suelo de baja capacidad portante, que producen un incremento de la huella tanto en profundidad como en empuje de tierra (bulldozing) la resistencia a la rodadura será, junto al patinamiento, la principal pérdida de potencia disponible en la barra de tiro.

Wismer y Luth (*op. cit.*), Zoz (1972), Wong y Dormier (1989) tratan de predecir la rodadura basándose en la resistencia a la penetración en el suelo de un cono de acero con un vértice de 30° y un área de base de 3,23 o 1,23 cm² (ASAE S 313.2); este sistema de medición es fácilmente repetible a campo, y permite lograr valores representativos del lote que se analiza. Wismer y Luth (*op. cit.*) calculan un número de rueda (Cn) basado en la utilización del índice de cono (CI), el ancho del neumático (b), el diámetro del neumático (d) y el peso adherente sobre la rueda (carga total que recae sobre el eje motriz producto de la sumatoria del peso estático más el dinámico = Q_{adh}).

$$C_n = \frac{CI \times b \times d}{Q_{adh}/2}$$

Esta fórmula fue generada empleando un parámetro obtenido por el número de movilidad de Freitag (1965)

y propone la siguiente expresión para el cálculo del coeficiente de resistencia a la rodadura:

$$K = \frac{1,2}{C_n} + 0,04$$

Para el caso que el suelo a transitar fuera excesivamente deformable sugieren no utilizar el valor de resistencia a la penetración antes del tráfico, sino que aconsejan hacerlo con el valor de índice de cono dentro de la huella después del pasaje del vehículo, coincidiendo en este consejo con McAllister (*op. cit.*) y Gee Glough *et al.* (*op. cit.*). Del producto entre coeficiente de rodadura (K) y el peso adherente en el eje trasero del tractor (Q_{adh}), se obtiene el esfuerzo de rodadura o la resistencia a la rodadura (RR). Wong y Dommier (*op. cit.*) proponen utilizar la ecuación de Wismer y Luth (*op. cit.*) para calcular el C_n cuando el tractor lleva cubiertas duales en el eje trasero y el suelo, entre 0-150 mm de profundidad, posee un índice de cono promedio superior a 1.113 kPa (suelo firme). Los mismos autores realizan una modificación de esta ecuación cuando el suelo, en cambio, posee un índice de cono promedio inferior a 446 kPa (suelo blando) considerando el ancho de las duales como la sumatoria de las dos simples quedando entonces el valor numérico de la rueda como:

$$C_n = \frac{CI \times 2b \times d}{Q_a}$$

Para situaciones de capacidad portante intermedia $446 \text{ kPa} < CI < 1.113 \text{ kPa}$ proponen extraer el valor de ancho equivalente, b , obtenido de una relación entre CI , suelo firme y blando y dos constantes, que fueron determinadas por una recta de regresión; de esta manera incorporan el concepto de ancho equivalente para duales en función de la capacidad portante del suelo. McAllister (*op. cit.*) condujo un ensayo en el que demostró que el coeficiente de rodadura varía con el diámetro, la carga, el rodado y tipo de neumático, la humedad del suelo y la presión de inflado. En este tra-

bajo el autor consigue predecir el coeficiente de rodadura a partir del número de movilidad (M) de Turnage (*op. cit.*), y obtiene la siguiente fórmula de predicción:

$$K = (0,322 / M) + 0,054$$

Draghi (1989) y Botta (1997) coinciden en que la ecuación de predicción del esfuerzo de rodadura de un tractor agrícola que más se ajustó en trabajos predictivos similares fue la de McAllister; lo fundamentan en el hecho de que éste obtuvo su modelo a partir de situación de ruedas remolcadas, proponiendo el último autor, la siguiente corrección para neumáticos anchos:

$$M = \left(\frac{CI \times b \times d}{Q_{adh} / 2} \right) \times \delta/h \times \left\{ 1/1 + \left(\frac{b}{2d} \right) \right\}$$

Donde δ/h es la deflexión del neumático

Si bien existen estos antecedentes y otros que avalan el problema, aún no se ha podido predecir lo que sucede con los tractores articulados y los de tracción delantera asistida con ruedas de gran diámetro en su parte delantera.

Los objetivos del presente trabajo son: a) validar o no los principales modelos propuestos para predecir el esfuerzo de rodadura en tractores FWA y 4WD y b) proponer cambios que tengan posibilidad cierta de ser tomados en cuenta por fabricantes y usuarios para dicha pérdida, que ocasiona elevado consumo de combustible.

Las hipótesis de trabajo son:

H1. El tamaño de los rodados modales de los tractores FWA y 4WD del parque argentino es el factor limitante para trabajar eficientemente a bajas velocidades de avance.

H2. La pérdida por rodadura depende de la condición mecánica del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó en un lote del establecimiento "El Campo" ubicado en el partido de Luján, Argentina, sobre un Argiudol típico, fino, illítico, térmica (Soil Taxonomy 1994) perteneciente a la serie Mercedes, localizado a 34° 32' Sur, 59° 07' Oeste, a una altitud de 14,8 m sobre el nivel del mar, en la Región Pampeana, en el límite sur de la subregión Pampa Ondulada, con pendiente clase 1, gradiente de 0,5 a 1%; escurrimiento grado 3, medio; permeabilidad grado 3, moderadamente lenta; drenaje clase 4, suelo bien drenado; rocosidad y pedregosidad grado 0.

La humedad gravimétrica al momento del tráfico, entre 0-200 mm de profundidad y para las condiciones de suelo traficada fue de 24%.

La historia previa del lote: campaña 2002/2003 trigo/soja de segunda; 2003/2004 trigo/soja de segunda y 2004/2005 soja de primera. Desde el año 2002 los trabajos se realizaron bajo el sistema de siembra directa, es decir sin remoción del suelo.

Los tractores utilizados en el ensayo de campo tuvieron todas sus características básicas de diseño respondiendo al

carácter modal del actual mercado argentino (Cuadro 1). Las presiones de inflado de los neumáticos y el lastrado de los tractores no se modificaron para el ensayo, asumiendo que los mismos están listos para trabajos con aperos que demandan elevados esfuerzos de tracción (paratil, cincel, rastra de casquetes pesada y otros). Antes del ensayo se llevaron dos de los mismos a balanza pública obteniendo sus pesos totales y sus pesos por cada uno de sus ejes, siendo el John Deere 7515 identificado como T1 y el Zanello 500 y identificado como T2. El tractor John Deere 3530 se utilizó solamente para remolcar a T1 y T2 y así medir el esfuerzo de rodadura.

El diseño estadístico fue de parcelas completamente aleatorizadas, la medida de cada parcela fue de 10 m de ancho por 100 m de largo (1.000 m²). De las seis parcelas (P), dos (P2 y P5) fueron aradas con arado de reja y vertedera a 200 mm de profundidad.

En las parcelas P1 y P4 el suelo se preparó en forma similar a la preparación del suelo para una cama de siembra, es decir: seis pasadas de rastra de casquetes liviana a 150 mm de profundidad y por último dos pasadas con rastra de dientes. Finalmente la condición de suelo en las parcelas P3 y P6 fue la de siembra directa. En todos los casos, donde hubo remoción, se dejó orear el suelo previo a las labores correspondientes.

En el Cuadro 2 se pueden ver las labores realizadas para cada una de las parcelas del ensayo.

CUADRO 1. Tractores utilizados en el ensayo y sus características.

Marca	J. Deere	J. Deere	Zanello
Modelo	3530	7515	500 c
Año	1979	2005	1998
Nº horas de uso	15.700	30	5.800
Tracción	2WD	FWA	4WD
Potencia	91,85 CV	140 CV	194 CV
Neumáticos delanteros	6 - 16	18,4 - 26	23,1 - 30
Neumáticos traseros	18,4 - 34	24,5 - 32	23,1 - 30
Radiales	no	no	no
Altura de tacos delanteros	—	40 mm	38 mm
Altura de tacos traseros	25 mm	50 mm	37 mm
Peso total	—	7,9 kN	9,2 kN
Peso eje delantero	—	3,3 kN	4,9 kN
Peso eje trasero	—	4,6 kN	4,30 kN

CUADRO 2. Labores realizadas sobre el lote de ensayo.

Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	P6
21/7/05	3 Rastras de casquetes	1 Arado	S.D.	3 Rastras de casquetes	1 Arado	S.D.
28/7/05	1 Rastra de casquetes	—	—	1 Rastra de casquetes	—	—
31/7/05	1 Rastra de casquetes	—	—	1 Rastra de casquetes	—	—
03/8/05	1 Rastra de casquetes	—	—	1 Rastra de casquetes	—	—
04/8/05	2 Rastras de dientes	—	—	2 Rastras de dientes	—	—

Las variables experimentales que se vincularon a la rodadura y compactación producida por el tráfico fueron: el índice de cono, el esfuerzo de rodadura y la profundidad de huella. El índice de cono, se midió a través de un penetrometro de cono (ASAE S 313 1993), hasta una profundidad de 200 mm. Las mediciones de dicho parámetro (20 muestras para cada parcela) fueron realizadas antes del tráfico del tractor, de esta manera se definió la condición mecánica de suelo según propuesta de Smith y Dickson (1990). Las mediciones de esfuerzo de rodadura (20 en total) se realizaron con un dinamómetro hidráulico que fue ubicado en la barra de tiro (tipo celda de carga) del tractor que actuó como remolcador. Ambos tractores fueron unidos por medio de un cable de acero desde la barra de tiro del tractor remolcador al centro de resistencia del tractor remolcado. Los tractores fueron remolcados a una velocidad de 1,89 ms⁻¹. El tractor remolcado circuló desplazado con respecto al remolcador, esto fue para que el tractor remolcado no transite sobre las huellas del remolcador y así no afectar las mediciones del esfuerzo de rodadura. El valor del esfuerzo de rodadura obtenido, fue corregido por el ángulo de desplazamiento entre los dos tractores. Para obtener la profundidad de huella se colocó una varilla en forma perpendicular a la huella y con regla rígida se midió el centro y los costados de la huella obteniendo 5 mediciones por cada posición de la varilla y 50 mediciones en total por cada parcela.

El análisis de las variables se realizó mediante un modelo de ANOVA independiente con el programa Statgraf 7.1. El criterio empleado para expresar los resultados fue el test de comparación de medias de Duncan (Little y Hills, 1990). En forma previa al ensayo y para ambos tractores, se predijo el esfuerzo de rodadura utilizando el modelo propuesto por Wismer y Luth (1973). No obstante dicho modelo no contempla su uso para predecir el esfuerzo de rodadura en tractores articulados o 4WD, por lo tanto se propondrá un

ajuste, mediante el uso del coeficiente de correlación (r^2) con la utilización de un factor de corrección obtenido a través de los datos de campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de esfuerzo de rodadura para el tractor John Deere 7515 (T1) y para el tractor Zanella 500 (T2) (Cuadro 3) mostraron cómo el valor de dicho esfuerzo decreció a medida que el suelo presentó mayor índice de cono (Cuadro 4). Es decir, el esfuerzo de rodadura fue mayor en suelo arado y disminuyó para la condición de suelo siembra directa presentando diferencias estadísticamente significativas entre las distintas condiciones del suelo. Esto coincide con resultados encontrados por Wood y Burt (1987) y Randall *et al.* (1986), quienes citan a la primer pasada sobre suelos sueltos como la responsable de valores de la profundidad de huella que oscilan entre el 80 y el 90% de la definitiva luego de un tráfico sostenido y a la rodadura del primer tráfico como el 70 al 80% de los valores que se registran a partir del segundo pasaje. Los mayores valores de rodadura en el suelo arado podrían haberse debido a que en esa condición de suelo el hundimiento fue tal que los tacos de los neumáticos pudieron dibujar una impronta más marcada y profunda contribuyendo a producir un esfuerzo de rodadura más elevado que en la cama de siembra. Se coincide con Wood y Burt (*op cit*) en la consideración de que ese hundimiento provocó un aumento en oposición del suelo al avance de rueda, que según estos autores es el causante de la mayor pérdida en suelos blandos.

CUADRO 3. Valores de esfuerzo de rodadura corregidos y de coeficiente de rodadura para los tractores John Deere 7515 y Zanello 500 en las tres condiciones de suelo.

Condición de suelo	Tractor J. Deere 7515 (T1)		Tractor Zanello 500 (T2)	
	Esfuerzo de rodadura (kN)	Coefficiente de rodadura	Esfuerzo de rodadura (kN)	Esfuerzo de rodadura
Siembra directa	0,384 a	0,086	0,768 a	0,185
Cama de siembra	1,103 b	0,244	1,113 b	0,265
Suelo arado	1,534 c	0,340	1,605 c	0,383

Diferentes letras, en sentido vertical, para el dato de esfuerzo de rodadura indican diferencias significativas ($P < 0,01$, Duncan) entre tratamientos.

CUADRO 4. Valores medios de índice de cono (kPa) para las tres condiciones de suelo.

Profundidad (mm)	0	25	50	75	100	125	150	175	200
Suelo arado	116a	105a	70a	35a	89a	100a	116a	128a	200a
Cama de siembra	211b	456b	526b	532b	688b	877b	807b	914b	1.088b
Siembra directa	1.298c	1.333c	1.358c	1435c	1.439c	1.579c	1.600c	1.650c	1.700c

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas ($P < 0,01$, Duncan).

El mayor esfuerzo de rodadura (R) en todas las condiciones de suelo que presentó el tractor T2 podría explicarse a partir de su mayor peso total, que supera en 1,3 kN al tractor T1. También lo anterior se puede atribuir a las mayores profundidades de huella (Cuadro 5) generadas por T2 que, si bien no presentaron diferencias estadísticamente significativas, marcaron una tendencia. En la misma tabla se puede ver que la pérdida de potencia por rodadura fue siempre

mayor para el tractor T2. Los valores de pérdida de potencia ocasionada por la rodadura fueron similares pero se debe destacar que el tractor T1 posee 140 CV y el T2 posee 194 CV. Esto concuerda ampliamente con lo citado por la bibliografía sobre que, a potencias similares en el motor, el desempeño tractivo de un tractor 4WD es siempre mayor que un FWA. Del análisis del Cuadro 3 puede observarse una relación armónica entre el ancho del rodado 24.5 - 32 y sus 4,6

CUADRO 5. Valores de profundidad de huella y pérdida de potencia por rodadura de los tractores ensayados.

Condición de suelo	Tractor J. Deere 7515 (T1)		Tractor Zanello 500 (T2)	
	Profundidad de huella (mm)	Potencia perdida en rodadura (CV)	Profundidad de huella (mm)	Profundidad de huella (mm)
Siembra directa	3,6 a	4,39 a	3,6 a	8,8 a
Cama de siembra	4,7 b	12,6 b	5,0 b	12,8 b
Suelo Arado	9,4 c	17,5 c	10,2 c	18,3 c

Diferentes letras, en sentido vertical indican diferencias significativas ($P < 0,01$, Duncan) entre tratamientos.

kN de peso sobre el eje, evidenciado por los menores valores de coeficiente de rodadura en las tres condiciones de suelo.

El rodado 23.1-30, con 4,3 kN aparece como una peor combinación de peso por eje y ancho en virtud de corresponderle el mayor coeficiente de resistencia a la rodadura (0,383) en el suelo arado. Es probable que esto se pueda atribuir a la mayor profundidad de huella sobre los suelos blandos. De todas formas, ambas cubiertas respondieron en forma directa al peso que soportaban. Botta *et al.* (1998) propusieron como ancho crítico en tractores convencionales (2WD) el neumático de 23.1 pulgadas a partir del cual el efecto "bulldozing" produce un aumento del esfuerzo de rodadura y una baja compactación superficial de suelos con baja capacidad portante. Sin embargo y puntualmente para la condición de suelo siembra directa, el valor de esfuerzo de rodadura para el tractor T2 casi duplicó al valor del T1. Esto podría deberse pura y exclusivamente al mayor peso del tractor y a la ausencia o disminución del efecto bulldozing en esta condición

de suelo. Es en este caso donde se pueden apreciar realmente las ventajas de contar con un tractor equipado con neumáticos de mayor ancho, en cuanto al esfuerzo de rodadura se refiere. Otra hipótesis podría ser que en los suelos arcillosos sueltos al utilizar una rueda muy ancha se produce una deformación lateral del suelo que aumentaría la rodadura coincidiendo así con Cisneros y Pozzolo (1996).

Se obtuvo una diferencia de un 11% (en T1 y T2) al comparar el valor de la fórmula de predicción de R de Wismer y Luth (1973) con los valores obtenidos a campo en condición de suelo arado (Cuadros 6 y 7).

Para la misma condición de suelo, pero utilizando la ecuación de McAllister modificada por Botta (1998), las diferencias ascendieron a un 30%. En las restantes condiciones de suelo, es decir, con mayores resistencias mecánicas a la penetración, las diferencias fueron mayores a un 30% al comparar los resultados obtenidos por ecuaciones con los resultados de campo (Tablas 6 y 7).

CUADRO 6. Valores de esfuerzo rodadura, para el tractor T1, obtenidos a campo y por modelos de predicción en las tres condiciones de suelo.

Condición de suelo	Valores a campo (kN)	Valores obtenidos por la ecuación de Wismer y Luth (kN)	Valores obtenidos por ecuación de McAllister modificada por Botta (kN)
Siembra directa	0,389	0,277	0,196
Cama de siembra	1,115	0,421	0,256
Suelo arado	1,551	1,681	1,096

CUADRO 7. Valores de esfuerzo rodadura, para el tractor T2, obtenidos a campo y por modelos de predicción en las tres condiciones de suelo.

Condición de suelo	Valores a campo (kN)	Valores obtenidos por la ecuación de Wismer y Luth (kN)	Valores obtenidos por ecuación de McAllister modificada por Botta (kN)
Siembra directa	0,776	0,259	0,222
Cama de siembra	0,1125	0,401	0,306
Suelo arado	1,620	1,659	1,059

CUADRO 8. Valores de coeficiente de correlación para el esfuerzo de rodadura obtenidos en las tres condiciones de suelo (a campo) y con las ecuaciones de predicción de Wismer y Luth y de McAllister modificada por Botta (1997).

Condición de suelo	Tractor J. Deere 7515 (T1)		Tractor Zanello 500 (T2)	
	Wismer y Luth	McAllister modificada por Botta (1997)	Wismer y Luth	McAllister modificada por Botta (1997)
Siembra directa	0,45	0,35	0,33	0,35
Cama de siembra	0,25	0,10	0,20	0,15
Suelo Arado	0,85	0,62	0,88	0,58

No se coincide de este modo con las recomendaciones realizadas por Hilbert y Pincu (2001). En un ensayo compararon fórmulas de predicción, entre ellas la de Wismer y Luth (1973), con valores obtenidos a campo con un tractor FWA y consideraron aceptables los valores de fórmulas de predicción para terrenos de alta y media resistencia a la penetración.

La ecuación de predicción de la rodadura que mejor se ajustó fue la de Wismer y Luth (1972) con un coeficiente de correlación r^2 de 0,88 para el suelo arado en el caso de T1 y de 0,85 para T2 (Cuadro 8). La ecuación que menos se ajustó es la de McAllister (1983) ya que tuvo los coeficientes de correlación más bajos (Cuadro 8). Dicha ecuación sufre los mayores desvíos en la predicción del esfuerzo de rodadura en los tratamientos con neumáticos de mayor ancho; esto coincide con lo que el autor encontró años atrás, referido a que la resistencia a la rodadura de neumáticos anchos no se puede predecir con las ecuaciones de Bekker (1956) o con los métodos del número de movilidad.

De la discusión generada se encontró suficiente evidencia como para validar la hipótesis 2. Sin embargo, y considerando que los tractores estaban equipados con los neumáticos indicados: (T1) con el mayor rodado posible (24.5-32) para un FWA de esa potencia,

y el (T2) con 23.1-30, se puede decir, basándose en los antecedentes recopilados y a los resultados obtenidos, que los mismos no fueron los limitantes del desempeño de los tractores a baja velocidad. Esto significa que no se encontró evidencia suficiente para validar la hipótesis 1 y sin embargo sí hay datos suficientes para rechazarla.

CONCLUSIONES

- La potencia perdida en rodadura se incrementó en suelos de baja capacidad portante.
- Para predecir esfuerzo de rodadura en tractores (FWA y 4WD) cuando transitan sobre suelos arados se puede utilizar la ecuación de predicción de Wismer y Luth.
- Se encontró, sobre los suelos blandos, una relación directa entre profundidad de huella y el peso del tractor que lo transitó.

BIBLIOGRAFÍA

- ASAE. 1993. Standard Soil Cone Penetrometer S313.2.
BEKKER, M.G. 1956. Teoría de la locomoción terrestre. Ann Arbor, Un. of Michigan Press.

- BOTTA, G. 1997. Armonización del peso y rodado del tractor para reducir la compactación del suelo. M.Sc. Tesis, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de la Plata, Argentina 70 pp.
- BOTTA, G.; D. JORAJURÍA y L. DRAGHI. 1998. El esfuerzo de rodadura en función de diferentes contrapesados y tamaño de neumáticos. *En: Memorias CADIR98*, (1): 5-10.
- BOTTA, G.; D. JORAJURÍA and L. DRAGHI. 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics* 39: 47-54.
- BRIXIUS, W. 1987. Traction prediction equations for bias ply tires. ASAE Paper N° 87-1622.
- CISNEROS, R. y O. POZZOLO. 1996. Efecto del tránsito sobre suelo inundado. Parte II: Rodado neumático R2. *En: Memorias CADIR 96* (1): 65-70.
- DRAGHI, L. 1989. Segundo Informe Científico - C.I.C Provincia de Buenos Aires, en cumplimiento de Beca de Perfeccionamiento. pp 25.
- GEE CLOUGH, D.; M. MCALLISTER and M. EVERDEN. 1978. The empirical prediction of tractor implement field performance. *Journal of Terramechanics* 15: 81-94.
- HILBERT, J. y M. PINCU. 2001. Influencia de tres dotaciones de neumáticos sobre la rodadura y la compactación. *Revista RIA* 30(1): 43 -54. ISBN 0325-8718
- LITTLE, T. y J. HILLS. 1990. Método estadístico para la investigación en la agricultura. De. Trillas. pp. 268.
- McALLISTER, M. 1983. Reduction in the rolling resistance of Tyres for Trailed Agricultural Vehicles. *J. Agric. of Engng.* 28: 127-137.
- PERDOK, U.D. and F. TIJINK. 1990. Developments in IMAG research on mechanization in soil tillage and field traffic. *Soil and Tillage Research* 16(1): 121-143.
- WOOD, R. and L. WELLS. 1986. Characterizing soil deformation by visual inspection of the profile. *Journal of Terramechanics* 22(3): 183-184.
- SOANE, B.D.; J. DICKSON and D. CAMPBELL. 1982. Compaction by agricultural vehicles a review. III Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and tillage research* 2: 3-367.
- SMITH, D.L. and J. DICKSON. 1990. Contributions of weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research* 46: 13-29.
- TAYLOR, J.; E. BURT and N. BAILEY. 1982. Multipass behaviour of a pneumatic tyre in tilled soils. ASAE Paper: 82-1549.
- TURNAGE, W. 1972. Tyre selection and performance prediction for off road wheeled vehicle operations. Proc. 4th Int. Conf. Soc. Terrain Vehicle System Stockholm. 245 pp.
- WONG, Z. and W. DOMIER. 1989. Prediction of darwbar performance for a tractos with dual tires. *Transactions of the ASAE* 32(5): 1529-1533.
- WOOD, R. and E. BURT. 1987. Thrust and motion resistant from soil tire interface Strees Measurements. *Transactions of the ASAE* 30(5): 1288-1292.
- WISMER, R. and J. LUTH. 1973. Off road traction prediction for wheeled vehicles. *J. Terramech* 10(2): 49-61.
- ZOZ, F. 1972. Predicting Tractor Field Performance. *Transactions of the ASAE* 15: 249-255 pp.