

RENDIMIENTO DE UN TRACTOR AGRÍCOLA EN FUNCIÓN DEL SISTEMA DE LABRANZA Y LA CARGA. I. CARACTERÍSTICAS DE LA TRACCIÓN

Maiby Pérez¹

RESUMEN

La eficiencia de tracción en la barra de tiro de los tractores agrícolas puede variar en función del sistema de labranza de suelo, particularmente cuando se utiliza labranza conservacionista. En este trabajo se evaluó el comportamiento de la tracción de un tractor operando bajo diferentes condiciones de labranza (ocho niveles) y niveles de carga en la barra de tiro (tres niveles) en un diseño de parcelas grandes. Las cargas al tractor ensayo fueron aplicadas mediante el uso de un tractor freno. Las condiciones de labranza variaron desde labranza conservacionista hasta niveles moderados e intensos de mecanización. Se encontró que la mayor fuerza de tracción (Q), el más alto porcentaje de deslizamiento (δ) y la menor eficiencia de tracción del tractor se obtuvieron en los suelos intensivamente labrados (con cuatro y cinco pases de rastra al inicio de las lluvias previo rastreo en barbecho), los cuales a su vez, presentaron los valores más bajos de contenido de humedad, índice de cono, cobertura de residuos, contenido de materia seca y densidad aparente. Los mayores coeficientes de tracción (μQ) fueron obtenidos también en los suelos con laboreo intensivo y se atribuyeron a una pérdida importante del peso adherente en las ruedas de tracción en estas condiciones.

Palabras clave adicionales: Deslizamiento, labranza, propiedades del suelo

ABSTRACT

Performance of an agricultural tractor as a function of tillage system and load. I. Off-road traction

The traction efficiency on the drawbar of agricultural tractors may vary as a function of the soil tillage conditions, particularly when conservationist tillage methods are used. In this trial, the tractor performance to traction under different tillage conditions (eight levels) and drawbar load (three levels) was evaluated in a strip-plot design. The load levels at drawbar of the test tractor were applied by a braking tractor at several gears combinations. The tillage conditions went from low-tillage to moderate and intensive conventional soil preparation. The highest drawbar pull (Q) and slip (δ) and the lowest traction efficiency (TE) were found under the intensive tillage conditions (with four or five hallow passes at the beginning of the rainy season plus hallow when fallow), which in turn had the lowest soil moisture, cone index, surface residue cover, organic matter content, and bulk density. The highest traction coefficients (μQ) were also found under intensive tillage conditions which were attributed to an important loss of the tractor dynamic weight in the rear axel observed at these conditions.

Additional key words: Slip, soil tillage, soil properties

INTRODUCCIÓN

En Venezuela, la introducción de tractores ha sido realizada sin pruebas preliminares que permitan conocer el comportamiento físico de la máquina en la interacción con el suelo. Este fenómeno hace posible el aprovechamiento de una fuerza horizontal (tracción) en la barra de tiro de los tractores para realizar labores agrícolas y en cuya eficiencia de utilización, en relación a la potencia del motor (eficiencia de tracción) influyen el deslizamiento de la rueda y la

resistencia a la rodadura que se desarrollan en la interfase suelo-máquina (Brixius y Wismeir, 1978; ASAE, 2000; Zoz et al., 2002). Los parámetros de respuesta mencionados se encuentran asociados a parámetros del tractor y del suelo, tales como el tamaño de los neumáticos y construcción de los mismos, peso sobre los ejes, presión de inflado y características mecánicas y contenido de humedad del suelo, al momento del tráfico de la máquina (Wismeir y Luth, 1974; Brixius, 1987), cuya desestimación en estudios preliminares en el país ha conducido al desperdicio de la potencia de los

Recibido: Julio 25, 2005

Aceptado: Abril 21, 2006

¹ Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Apdo. 2101-4579. Maracay, Venezuela. e-mail: maiby_278@yahoo.com

tractores. En la mayoría de las pruebas de tractores realizadas para esos fines en otras latitudes se ha considerado al suelo como un cuerpo inerte caracterizado solamente desde el punto de vista mecánico (índice de cono y otras propiedades mecánicas), reportándose el comportamiento de distintos coeficientes de tracción que revelan que la capacidad de ejercer tiro de un tractor se incrementa con la dureza del suelo, en relación directa con el índice de cono y a porcentajes de deslizamiento de la rueda entre 5-15% (Linares, 1996); sin embargo, los sistemas conservacionistas en el país, con una fuerte tendencia a crecer en el ámbito agrícola, favorecen la presencia de cobertura y de raíces en el suelo que pudieran modificar considerablemente sus propiedades físicas y mecánicas así como la respuesta de los parámetros de tracción (Pérez, 2004). De allí, que el presente estudio se orientó a determinar el efecto de distintas condiciones de labranza del suelo y cargas a la barra de tiro sobre el comportamiento de la tracción de un tractor agrícola en un suelo de la serie Maracay, Venezuela.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue realizada durante los años 2001-2002 en un área localizada en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela, en Maracay, a 10°17' N. El suelo está clasificado como Fluventic Haplustolls Francosa fina, mixta, isohipertérmica de la serie Maracay. El suelo superficial hasta 15 cm presentó 30-60 % de arena, 30-50% de limo y 10-20% de arcilla. Se usó un diseño estadístico de parcelas grandes en el campo para la ejecución de las pruebas del tractor considerando dos factores: condición de labranza (con ocho niveles) y carga en la barra de tiro (con tres niveles), en un arreglo factorial 8 x 3 (Montgomery, 1994). Las pruebas se llevaron a cabo en las 24 parcelas grandes de la combinación labranza-carga con el tractor freno enganchado a la barra de tiro del tractor ensayo, ambos operando con los motores encendidos bajo tres diferentes combinaciones de marchas, identificadas como: tercera-primera (T-P), segunda-primera (S-P) y cuarta-tercera (C-T) para el tractor ensayo y freno respectivamente, conformando tres niveles de carga a la barra de tiro. Las marchas fueron establecidas en pruebas

preliminares que permitieron la selección de aquellas que produjeran una velocidad no mayor de 5 km·h⁻¹ en una franja del área más labrada del ensayo. Todo el terreno recibió pases de rotativa y se conformaron ocho parcelas con diferentes sistemas de labranza. Las cuatro primeras representaron labranza conservacionista y estuvieron constituidas por barbecho (B), barbecho con cincel (BC), barbecho con un pase de rastra (B1) y barbecho con dos pases de rastra (B2). Las cuatro siguientes recibieron labranza convencional al inicio de las lluvias previo laboreo en barbecho y estuvieron constituidas por dos pases (2R), tres pases (3R), cuatro pases (4R) y cinco pases de rastra (5R), representando niveles de labranza del suelo desde moderados hasta intensivos.

Se usó un tractor ensayo marca International modelo 986, de tracción trasera, motor Diesel de seis cilindros y potencia máxima a la toma de fuerza de 78 kW a 2071 rpm, con ocho marchas hacia adelante y neumáticos 23.1-34 18-34 PR en el eje trasero y 10.00-16 en el eje delantero. Como unidad de freno, este tractor tiró de un tractor marca Zetor 8145 con tracción delantera, pala frontal, motor Diesel de cuatro cilindros y potencia de 56 kW a 2300 rpm, con cinco marchas hacia adelante y neumáticos 18.4/15-24 8 PR en el eje trasero y de tracción 12.4/11-24 8 PR en el eje delantero.

Los parámetros físicos de tracción (Q), velocidades teóricas (VT) y reales (VR) del tractor se obtuvieron usando un equipo de instrumentación electrónica (Compañía IROT-ETSI Agrónomos-Madrid) conformado por un conjunto de sensores y acondicionador de señales, junto con un programa de adquisición de datos y un computador personal. A partir de Q, VT y VR se calcularon el deslizamiento (δ), coeficiente dinámico de tracción (μQ) y la eficiencia de tracción (TE), de acuerdo a Linares (1996). La caracterización de propiedades físicas y mecánicas del suelo se realizó después de la preparación final de las parcelas en las condiciones del suelo para las pruebas y, el muestreo consistió en nueve puntos ubicados a lo largo de los 60 m de longitud por donde se desplazaría el tractor en cada tratamiento de la combinación labranza-carga. La humedad (H) del suelo se determinó mediante gravimetría en la capa superficial de 0-15 cm en muestras secadas en estufa a 105° C por 48 horas.

Para determinar la densidad aparente (D_a) del suelo labrado con rastra previo a las pruebas a inicio de lluvias (3R, 2R, 5R, 4R) se procedió a introducir un tubo cilíndrico de PVC de 9 cm de diámetro y 15 cm de altura hasta la profundidad del estrato labrado y a tomar manualmente la masa del suelo contenido en el mismo, para determinar el peso seco (P_{ss}). Se calculó la fracción del volumen del tubo PVC ocupado por el suelo (V_s) y se obtuvo la D_a del suelo por la relación P_{ss}/V_s . La D_a del suelo no labrado a inicio de lluvias (BC, B, B1, B2), se determinó en muestras no alteradas con toma muestras tipo Uhland de 0-10 cm de profundidad, recolectadas en la fase de caracterización inicial de los lotes. El índice de cono (IC) se obtuvo mediante mediciones directas en el suelo de la resistencia a la penetración con un penetrómetro estándar de punta cónica de 30°, hasta los 15 cm de profundidad en el suelo en las parcelas. Se aplicaron las fórmulas de resistencia mecánica e índice de cono, referidas por Linares (1996). La cobertura sobre el suelo (CT) fue determinada lanzando nueve veces en forma aleatoria una cuadrata de 50 x 50 cm en cada parcela de la combinación labranza-carga y contando los puntos del entramado de la red que coincidían con los residuos presentes sobre el suelo en esa área. El porcentaje de cobertura se calculó con base en el número total de puntos de la cuadrata. La cantidad de materia seca (MS) fue obtenida lanzando la cuadrata sobre los puntos de muestreo en las parcelas grandes no labradas a inicio de lluvias, tomando el material de residuos presente dentro del marco. El valor de MS se calculó determinando el peso de los residuos luego de secados en estufa a 50° C por 48 horas. Adicionalmente, se determinó el peso dinámico del eje trasero de tracción (R1y) según Linares (1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones y propiedades del suelo en función de las condiciones de labranza

Se detectaron diferencias significativas de la humedad promedio del suelo en las distintas condiciones de labranza (Cuadro 1). Las diferencias más importantes se presentaron en suelos no labrados, como LC y LR, cuyos valores fueron muy inferiores a los encontrados en los suelos labrados.

Con relación al índice de cono, en la Figura 1 se puede observar que hubo un efecto importante de la labranza del suelo y, posiblemente de la humedad, sobre esta propiedad del suelo. Esto determinó que se obtuvieran diferencias significativas entre las condiciones de labranza que de manera general agrupan a los suelos no labrados a inicio de lluvias (B2, B1, B y BC) en un primer nivel como los de mayor “dureza”, a los medianamente labrados (2R y 3R) en un grupo intermedio y, a los intensivamente labrados (5R y 4R) en el nivel más bajo.

Cuadro 1. Humedad gravimétrica (H) del suelo en las diferentes condiciones de labranza

Condición de labranza	H (%)
3R	15,2 ab
2R	16,7 ab
5R	15,3 ab
4R	17,2 a
BC	13,1 bc
B	15,0 ab
B1	10,8 c
B2	11,6 c

Los valores que no comparten letras iguales son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tuckey ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

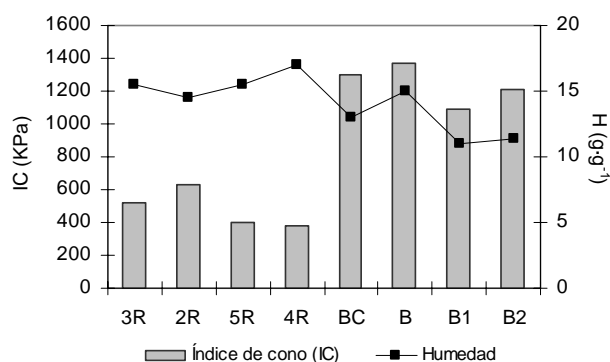


Figura 1. Índice de cono (IC) y humedad gravimétrica (H) del suelo en las diferentes condiciones de labranza. Separación de medias para el IC en tres grupos estadísticos según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$) en el orden $BC=B=B1=B2 > 3R=2R > 5R=4R$

Los resultados evidenciaron 100% de cobertura sobre el suelo (CT) en las condiciones no labradas (Figura 2) dado la alta proporción de malezas emergidas de poco tamaño y de residuos sobre el suelo, a diferencia de los suelos labrados en los

que CT difirió notablemente entre los puntos de muestreo, particularmente en aquellos con alto grado de alteración (5R y 4R) donde hubo alta incorporación de residuos en el suelo. Las diferencias más importantes ocurrieron entre las condiciones de labranza no labradas y labradas, representando los tratamientos en las primeras condiciones, un grupo significativamente superior ($P \leq 0,05$) al grupo de tratamientos con suelos intensivamente labrados. Por su parte, la acumulación de materia seca (MS) mostró dos grupos homogéneos de tratamientos (Figura 3) en los que el grupo superior ($P \leq 0,05$) se encontró en las condiciones no labradas, sin una clara diferenciación entre ellos, y el resto de las condiciones, que no presentaron residuos cuantificables debido al nivel de mecanización aplicado.

La densidad aparente (Da) disminuyó significativamente ($P \leq 0,05$) en los suelos labrados en comparación con los no labrados (Cuadro 2), atribuido al incremento diferencial del volumen del suelo hasta la profundidad promedio de 6 cm en los tratamientos (Hernández, 1998). En tal sentido, los suelos no labrados a inicio de lluvias se distinguieron significativamente del resto por presentar los valores más altos de Da (1,41-1,53 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$). En el estrato labrado de los suelos restantes la Da fue menor en SD-LR2 (0,84 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) la condición de labranza que mostró el grado de alteración más alto.

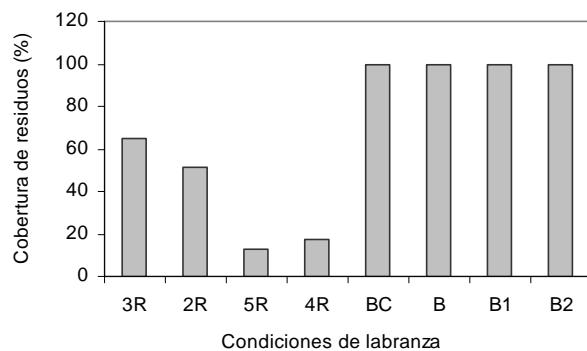


Figura 2. Cobertura de residuos (CT) sobre el suelo en función de las condiciones de labranza. Separación de medias en dos grupos estadísticos según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$) de acuerdo al orden $BC=B=B1=B2 > 5R=4R$. Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

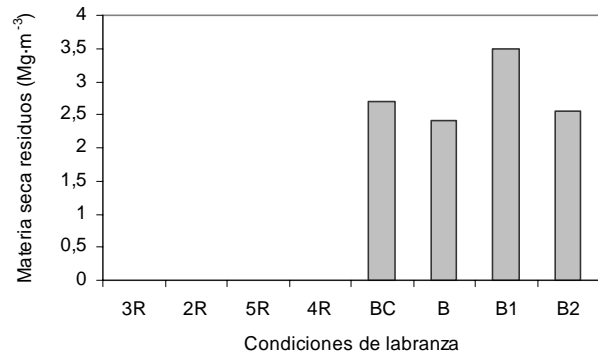


Figura 3. Materia seca (MS) de residuos sobre el suelo en función de las condiciones de labranza. Separación de medias para el MS en dos grupos estadísticos según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$) de acuerdo al orden $BC=B=B1=B2 > 3R=2R=5R=4R$

Cuadro 2. Densidad aparente (Da) del suelo en las diferentes condiciones de labranza

Condición de labranza	Da ($\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
3R	0,97 bc
2R	0,84 c
5R	0,95 bc
4R	1,01 b
BC	1,52 a
B	1,53 a
B1	1,41 a
B2	1,44 a

Los valores que no comparten letras iguales son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tuckey ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

Deslizamiento del tractor

La velocidad teórica del tractor mostró rangos de 7-8 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ en C-T, 5-6 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ en T-P y 3-4 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ en S-P. Por su parte, la velocidad real (VR) varió significativamente ($P \leq 0,05$) tanto para los tratamientos de labranza como para las distintas cargas ejercidas (Cuadro 3).

La VR fue significativamente menor en las condiciones de labranza intensa (5R y 4R) en comparación al resto de las condiciones. Se detectó mayor diferenciación de VR por efecto de las cargas ejercidas sobre el tractor, siendo menor bajo las combinaciones T-P y S-P. La VR fue mayor cuando fue más alta la selección de marchas en el tractor ensayo pero con la carga más ligera, especialmente en C-T, lo cual se muestra de acuerdo con las curvas a la barra de tiro según Linares (1996).

Cuadro 3. Velocidad real (VR) del tractor para los factores de labranza y carga

		VR (km·h ⁻¹)
Condición de labranza	3R	3,50 a
	2R	3,58 a
	5R	2,63 c
	4R	2,56 c
	BC	3,50 a
	B	3,44 ab
	B1	3,38 b
	B2	3,51 a
Carga	2S-P	2,12 b
	T8-P	2,19 b
	C-T	5,47 a

Los valores que no comparten letras iguales son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

El porcentaje de deslizamiento (δ) fue mayor ($P \leq 0,05$) en los suelos intensivamente labrados, (5R y 4R) con la carga T-P, y menor tanto en los suelos sin labranza como en los medianamente labrados (3R, 2R) (Figura 4a). Así mismo, hubo una tendencia general de acuerdo a T-P>S-P>C-T.

El δ del suelo varió en forma inversa al IC (Figura 4b), y de esta manera las combinaciones de marchas pudieron inducir mayor esfuerzo de tracción y mayor δ en suelos muy labrados de poca resistencia mecánica (menor IC) y menores Da y CT. Es decir, el deslizamiento fue mayor en los suelos más alterados, con menor dureza. El δ fue muy alto en todas las pruebas (por encima de 20%) aparentemente debido a la pérdida de peso adherente del tractor (R1y), ocasionado al hecho de que el tiro actuó inclinado hacia arriba durante las pruebas, lo cual se estima que contribuyó a obtener un valor de δ significativamente más alto en suelos intensivamente labrados.

Tracción del tractor

Los valores más altos de tracción (Q) ($P \leq 0,05$) se dieron lugar en los suelos intensivamente labrados (Cuadro 4). Para los suelos no labrados a inicio de lluvias, la Q en B1 y B2 fue mayor que en BC y B, lo que pudiera atribuirse a la menor humedad del suelo en los primeros (Cuadro 1), en concordancia con lo encontrado por Voorhees y Walker (1977).

No se observaron diferencias en los valores de Q con relación a las cargas, a pesar de que se

esperaban valores más altos en T-P y S-P como respuesta a la mayor carga resultante ejercida sobre el tractor.

Es de destacar que Q mostró un comportamiento inverso al esperado en relación al peso dinámico del eje trasero de tracción (R1y) (Figura 5), lo cual se atribuye a la inclinación del tiro hacia arriba como ya se indicó. Esto pudo desviar el patrón general de respuesta de acuerdo a lo cual la capacidad del tractor de ejercer tracción se incrementa en relación directa con la mayor resistencia mecánica promedio del suelo en el estrato superficial donde la rueda actúa (Brixius y Wismeir, 1978).

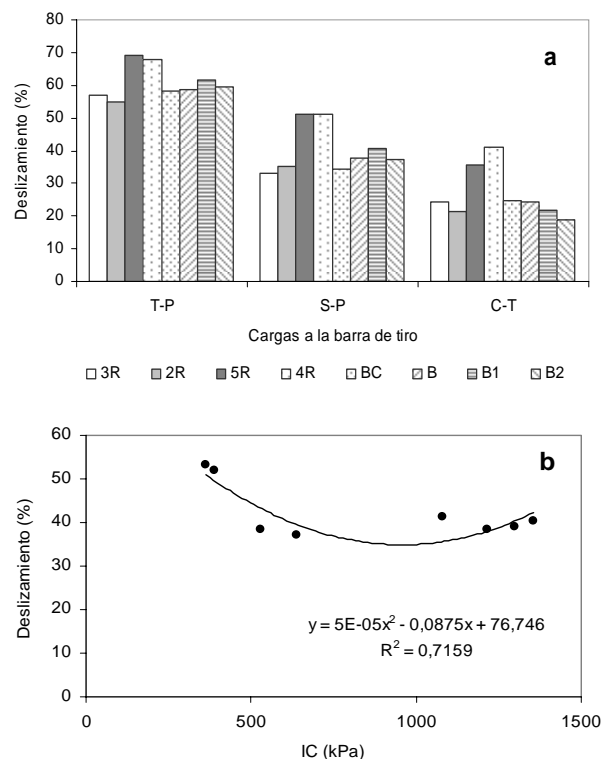


Figura 4. Deslizamiento del tractor en función de: a) las cargas ejercidas en las diferentes condiciones de labranza y b) el índice de cono (IC) del suelo. Separación de medias según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

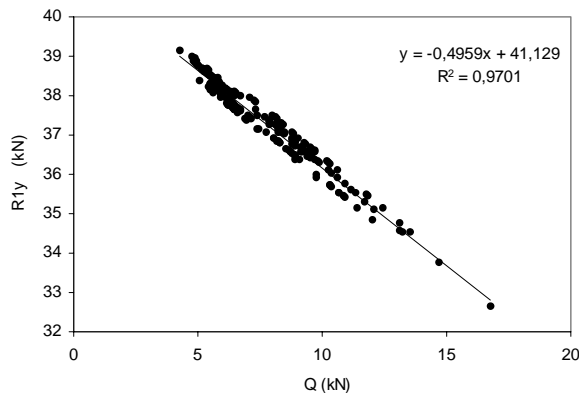
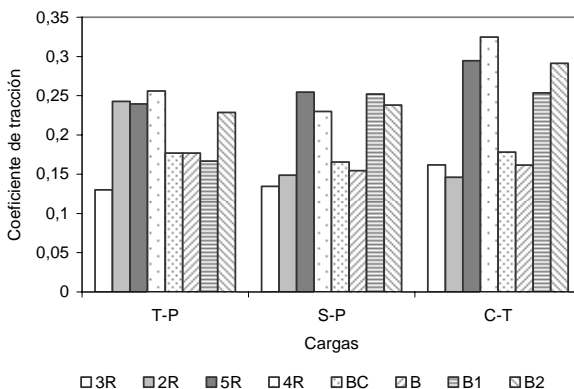
Coefficiente y eficiencia de tracción

La Figura 6 muestra las tendencias del coeficiente dinámico de tracción (μQ) obtenidas en el ensayo.

Cuadro 4. Tracción del tractor (Q) en función de las condiciones de labranza del suelo

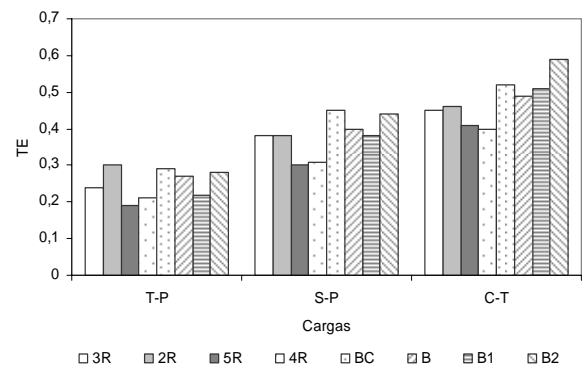
Condición de labranza	Q (kN)
3R	5,47 d
2R	6,75 c
5R	9,59 a
4R	9,74 a
BC	6,51 c
B	6,22 c
B1	8,25 b
B2	9,15 a

Los valores que no comparten letras iguales son significativamente diferentes entre sí según la prueba de Tuckey ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

**Figura 5.** Comportamiento del peso dinámico del eje trasero de tracción (R1y) en relación a la tracción resultante (Q)**Figura 6.** Coeficiente de tracción (μQ) del tractor en función de la condición de labranza y carga. Diferencias estadísticas según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

Los suelos intensivamente labrados (5R y 4R) bajo la carga C-T presentaron los mayores valores junto a B2 y B1 bajo las cargas C-T y S-P ($P \leq 0,05$). Los mayores valores promedios de μQ se obtuvieron en los suelos más labrados, donde se originaron los más altos δ del tractor con las distintas cargas (por encima del 30%). Esto revela que μQ no siguió la tendencia esperada en la variedad de condiciones de suelo alcanzadas en las pruebas, tomando en cuenta lo reseñado por Schlosser (1996) y Márquez (1990), debido posiblemente a la marcada disminución de R1y en suelos muy labrados, lo cual podría explicar el incremento de Q en estas condiciones y que a su vez, ocasionaría la desviación del comportamiento esperado de μQ .

Por otra parte, el análisis estadístico no paramétrico reveló que la eficiencia de tracción (TE) dependió de la interacción con cada condición particular de labranza (Figura 7), obteniéndose en algunos casos valores más altos, como en los tratamientos B1, B2, BC y B con el tractor bajo la carga C-T y los menores TE en los suelos labrados con mayor intensidad (5R y 4R) bajo la carga T-P.

**Figura 7.** Eficiencia de tracción (TE) del tractor en función de la labranza y carga. Interacción significativa entre ambos factores según la prueba de Kruskal-Wallis ($P \leq 0,05$). Identificación de las siglas en la sección de materiales y métodos

La interacción de la condición de labranza con la carga T-P generó el grupo homogéneo más bajo de todos los niveles alcanzados por las distintas interacciones y C-T el más alto. Se destaca que, a pesar de que existió un aumento considerable de la tracción en los suelos intensamente labrados, hubo

un fuerte incremento del δ que ocasionó una disminución en la TE. Wismeir y Luth (1974) y Brixius (1987), al relacionar TE y μQ en función al δ , señalan que existen valores máximos asociados con la mayor resistencia del suelo o moderados pesos dinámicos del tractor, en el rango de 5-15% de deslizamiento de la rueda, por encima del cual, se produce el corte y degradación del suelo sin obtener mayor eficiencia de utilización de la potencia de los tractores. En general, en este ensayo, la TE disminuyó marcadamente en algunas pruebas, posiblemente porque el δ superó en gran medida el 20%.

CONCLUSIONES

Los mayores valores de tracción (Q) y deslizamiento del tractor (δ) bajo carga se produjeron en los suelos intensivamente labrados los cuales presentaron a su vez los menores valores de índice de cono, densidad aparente, contenido de materia seca y cobertura sobre el suelo al momento de las pruebas.

También en los suelos intensivamente labrados ocurrió la menor eficiencia de tracción (TE) atribuido a los altos porcentajes de deslizamiento, para lo que contribuyó en gran medida el marcado descenso del peso dinámico del eje trasero de tracción ($R1y$) atribuido a condiciones no controladas durante las pruebas.

En general, los coeficientes de tracción (μQ) resultaron bajos para todas las condiciones de labranza y carga en la barra de tiro.

LITERATURA CITADA

1. ASAE Standards. 2000. Agricultural machinery management data. ASAE. St. Joseph, Michigan. D497.4.
2. Brixius, W.W. 1987. Traction prediction equations for bias-ply tires. ASAE St. Joseph, Michigan. Paper N° 871622.
3. Brixius W.W. y R.D. Wismeir. 1978. The role of slip in traction. ASAE. St. Joseph, Michigan. Paper N° 781538.
4. Hernández, P. 1998. Análisis del patinamiento en tractores de simple tracción a través de las teorías de predicción de tracción de ASAE y su contraste experimental. Tesis. E.T.S. Ingenieros Agrónomos. Madrid. 150 p
5. Linares, P. 1996. Teoría de la tracción de tractores agrícolas. E.T.S. Ingenieros Agrónomos. Madrid. Folleto. 157 p
6. Márquez, L. 1990. Laboreo-Solo Tractor'90. Editorial Laboreo. Madrid.
7. Montgomery, D. 1994. Diseño y Análisis de Experimentos. Editorial Iberoamérica. México.
8. Pérez, M. 2004. Tracción de un tractor agrícola y su relación con las propiedades físicas, mecánicas y biológicas del suelo. VII Congreso Venezolano de Ingeniería Agrícola. UCV. Maracay. Resúmenes p. 12.
9. Schlosser, F. 1996. Influencia del avance cinemático de las ruedas delanteras motoras y la eficiencia de la tracción de los tractores agrícolas. Tesis. E.T.S. Ingenieros Agrónomos. Madrid. 286 p.
10. Voorhees, M.L. y P. Walker. 1977. Tractionability as a function of soil moisture. Trans. ASAE 20: 806-809
11. Wismeir, R.D. y H.J. Luth. 1974. Off- road traction prediction for wheeled vehicles. Trans. ASAE 17: 8-10
12. Zoz, F.M., R.J. Turner y L.R. Shell. 2002. Power delivery efficiency: a valid measure of belt and tire tractor performance. Trans. ASAE 45: 509-518.