

# *Relaciones entre el suelo, el tiro y la tracción*<sup>1</sup>

## *1.0 ANTECEDENTES*

El suelo, el tiro y la tracción son conceptos muy importantes cuando se habla de labranza. Pocos textos de suelo o maquinaria agrícola cubren este tema en forma integrada y práctica. En esta nota técnica se examinarán estos tópicos, su aplicación, su importancia para la labranza y los requerimientos de potencia en las labores agrícolas.

En términos simples, la labranza involucra el movimiento del suelo de un lugar a otro. Pero, la razón de ser de la labranza en la agricultura es mejorar las condiciones físicas del suelo para la germinación de la semilla y el crecimiento del cultivo. En las labores agrícolas convencionales la *labranza* puede llegar a consumir la mayor cantidad del presupuesto energético destinado para la producción. La *eficiencia* de la labranza depende, en gran parte, de la velocidad de avance del implemento con que se trabaja y de la unidad de potencia utilizada para jalarlo<sup>2</sup> o arrastrarlo. La Tabla 1 muestra las velocidades más comunes utilizadas con los implementos en las labores de labranza.

Los valores en la tabla muestran que la velocidad en campo varía de acuerdo al tipo de labranza que se realiza. Por ejemplo, las velocidades más bajas son para los implementos de labranza primaria como arados, cinceles y rastras pesadas<sup>3</sup>. Velocidades mayores se utilizan con rastras livianas y cultivadores que pulverizan el suelo y que originan agregados más finos o en la labor de cultivada o control mecánico de malezas<sup>4</sup>.

La potencia requerida para jalar o arrastrar un implemento de labranza, que trabaja en el suelo, a una velocidad dada, depende de: a) el *tiro* del implemento y b) de la *tracción* desarrollada por la unidad de potencia.

---

<sup>1</sup>Traducción de *Technical Note 21: Soil, Draft and Traction*. Robert Walters. Soil Science Department. NCSU. Raleigh, NC. Realizada por: Jorge de Jesús Peña Camacho. Ing. Agríc. Ms. Sc.

<sup>2</sup> *N. del T.* Halar o jalar, ambas son aceptadas por el DRAE y significan: ‘tirar, hacer fuerza para atraer’.

<sup>3</sup> *N. del T.* Se adiciona implemento utilizado en nuestro medio.

<sup>4</sup> *N. del T.* Se considera “maleza” a una planta que interfiere con el cultivo, afectando negativamente el sistema productivo. En las últimas décadas se está utilizando el término arvense, que significa “planta acompañante de los cultivos o prados” sin discriminarlas entre buenas o malas. Las arvenses son importantes en todos los cultivos, debido al impacto que generan sobre los rendimientos, los costos de producción y la sostenibilidad, en especial por constituirse en un componente para la protección de los suelos contra la erosión y la conservación de los recursos hídricos. [http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_café/arvenses.php](http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_café/arvenses.php)

Consideraremos estos dos factores por separado pero, se debe, tener siempre presente que están relacionados y cada uno de ellos está fuertemente influenciado por las características del suelo.

**Tabla 1.**

Implemento de labranza	Velocidad en campo (km/h) (mph) <sup>5</sup>	
	Rango	Más usual
Arado de vertedera	5,0 a 9,0 (3.0-5.5)	7,0 (4.5)
Rastra de discos en Tándem (Primer pase para desterronar; presencia de terrones grandes)	6,0 a 10,0 (3.5-6.0)	8,0 (4.5)
Rastra de discos en Tándem (Segundo y Tercer pases; terrones pequeños)	6,0 a 12,0 (4.5-7.0)	10,0 (6.0)
Arado de Cinceles	6,0 a 9,0 (4.0-6.5)	8,0 (4.5)
Subsolador	6,0 a 9,0 (4.0-5.5)	7,0 (4.5)
Rastra de dientes flexibles	6,0 a 9,0 (4.0-5.5)	8,0 (4.5)
Cultivadora	6,0 a 9,0 (4.0-5.5)	8,0 (4.5)
Azadón rotativo	7,0 a 10,0 (8.0-14)	9,0 (12)

Fuente: John Deere Servicio de Publ. (1991)

## 2.0 EL TIRO

Se denomina *tiro* a la fuerza requerida para jalar un implemento de labranza que se encuentra dentro del suelo. Esta fuerza se localiza en el punto donde el implemento se acopla a la unidad de potencia, denominado punto de *enganche*. La unidad de potencia usualmente es un *tractor*, término acuñado para las más poderosas *máquinas de tracción* que transforman o modifican la energía desarrollada por un motor de combustión interna en movimiento (esta definición también se puede aplicar a los animales de tiro como bueyes y caballos). La dirección de la fuerza de tiro es la del desplazamiento y sus unidades son *libras fuerza* (lbf en sistema Inglés) o *kilo Newtons* (kN en el SI). Al utilizar los términos físicos tales como potencia, fuerza y trabajo debemos tener claro que

<sup>5</sup> **N. del T.** Se mantienen las unidades del sistema Inglés como ejercicio didáctico.

estas palabras tienen significados diferentes pero están muy relacionados entre sí.

Entendemos que una **fuerza** es la acción de un cuerpo sobre otro que tiende a producir un movimiento, variaciones en su velocidad o en su dirección. Un ejemplo muy familiar es la fuerza de la gravedad: la influencia de la tierra, un cuerpo sobre otro cuerpo en movimiento. Una pluma flota en el aire bajo la influencia de la gravedad y en su movimiento se dirige hacia el centro de la tierra. La tasa de cambio del movimiento, **aceleración**, depende de la **masa** del objeto. La ecuación para la fuerza o movimiento está dada por:

$$\text{Fuerza (F)} = \text{masa (m)} \times \text{aceleración (a)}$$

Donde *m* es la masa (no el peso!) de un objeto en kilogramos (kg) y *a* es la aceleración de un cuerpo en unidades de distancia (metros) por segundo al cuadrado (m/seg<sup>2</sup>). Cuando un cuerpo está bajo la influencia del campo gravitacional de la tierra, el término *a* se convierte en *g* con valor de 9,807 m/s<sup>2</sup> a nivel del mar y *F* llega a ser el **peso** del cuerpo, que no es más que la fuerza de un objeto en un campo gravitacional. Al multiplicar *m* x *a* las unidades se expresan como kilogramos por metro por segundo al cuadrado (kg/m/seg<sup>2</sup>). Como 1 Newton es igual a 1 kg/m/seg<sup>2</sup> terminamos expresando esta fuerza igual que a la fuerza de tiro (1kilo Newton = 1.000 Newtons).

El **Trabajo** es definido como la acción de una fuerza a través de una distancia, sin tener en cuenta el tiempo (**Fig. 1**) y se puede calcular multiplicando la fuerza actuante por la distancia a través de la cual la fuerza actúa:

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$$

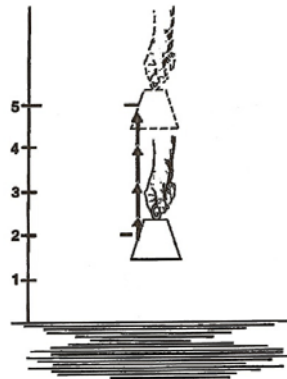
Por ejemplo, si un peso o carga requiere 88,9 Newton<sup>6</sup> de fuerza para moverlo verticalmente a 0,91 m, el trabajo realizado será de 81,4 julios.

**Potencia.** Se define como la rapidez con que se hace un trabajo. Aquí se involucra el tiempo, implica que cierta cantidad de trabajo se realiza en un tiempo dado. La unidad de potencia más utilizada es el **caballo de potencia**

---

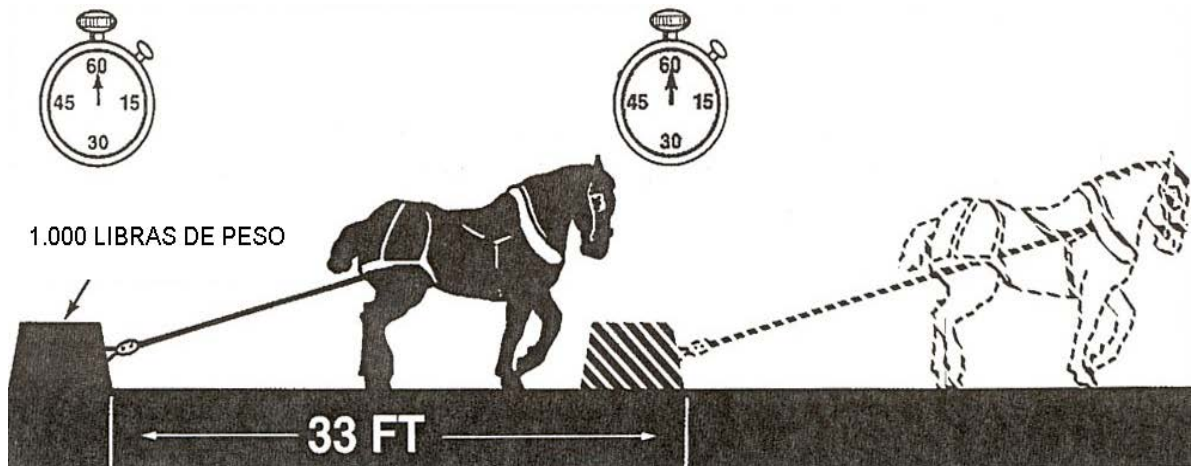
<sup>6</sup> **N. del T.** 1 lb fuerza = 4,445 Newton. 1 lb-pie = 1,35581795; 1 J = 1 N x m = (1 kg . m/s<sup>2</sup>) x m = (kg x m<sup>2</sup>)/s<sup>2</sup>

o *horsepower* (hp) y se define como 550 libras-pie de trabajo por segundo. En las unidades métricas (SI) la potencia se mide en kilovatios (kW).



**Figura 1.** Trabajo es igual a fuerza x distancia sin considerar el factor tiempo.  
Fuente: *Finner and Straub, 1985.*

Por ejemplo, si un peso de 453,59 kg (1.000 lb) es desplazado a una distancia de 100,06 m (33 pies) en un minuto, el trabajo realizado es 0,746 kW, un caballo de potencia o un horsepower, hp. (Fig. 2).



**Figura 2.** El caballo de potencia es la medida de la tasa a la cual se hace el trabajo. Por qué caballos? En esa época se extraía el material de las minas con caballos y allí se observaron los datos<sup>7</sup>.

Un motor al quemar combustible dentro de sus cilindros genera potencia. La fuerza generada mueve los pistones de arriba hacia abajo creando un esfuerzo de torsión, un *torque*, sobre el cigüeñal. Cada ciclo de arriba-

<sup>7</sup> *N. del T.* James Watt, Ingeniero escocés impulsor e inventor de la máquina de vapor observó que el caballo podía levantar 330 libras de peso a una altura de 100 pies en un minuto.

abajo, o revolución, se repite muchas veces en un minuto y podemos calcular la potencia desarrollada en la *volante*<sup>8</sup> del motor así:

$$\text{Potencia en la volante (hp)} = \frac{(rpm \times torque)(fuerza \times distancia)}{252 \text{ (constante)}}$$

En kilovatios:

$$\text{Potencia del motor (kW)} = \frac{(rpm \times torque)(fuerza \times distancia)}{9.549 \text{ (constante)}}$$

Donde *rpm* es el número de revoluciones por minuto del motor. En el tractor tenemos tres puntos donde podemos medir su potencia:

1. En la volante (potencia al freno)
2. En el eje Toma de Fuerza (TDF o PTO)
3. En la barra de tiro (BDT)

**Potencia en la volante o al freno**<sup>9</sup> es la máxima potencia que puede desarrollar el motor del tractor. Se mide en la volante (**Fig. 3**) mediante un dinamómetro. Esta información no es muy útil, su valor no está totalmente disponible para realizar un trabajo. La información de mayor utilidad es el valor de la potencia en el eje **Toma de Fuerza (TDF o PTO)**. Se mide con el tractor detenido, en el eje del TDF (**Fig. 4**) y es más o menos el 86% de la potencia en la volante (hay una pérdida por el accionar de accesorios tales como bombas, alternador, etc. y por superar la fricción entre las partes en movimiento). La **Potencia en la Barra de Tiro (PBDT)**, es la medida de la potencia que tiene la máquina para jalar a través de las llantas, ruedas o carriles (**Fig. 5**). Este valor varía con las condiciones de la superficie, el tipo de tractor y el estado de las llantas<sup>10</sup>. (**Ver Tabla 2**).

---

<sup>8</sup>**N. del T.** En español esta palabra es del género masculino pero, en el lenguaje técnico es muy común utilizarla en femenino para evitar confusiones con otras partes del vehículo.

<sup>9</sup>**N. del T.** Traducido al español literalmente como “potencia al freno”. Es la medida de la potencia del motor sin pérdidas de potencia originadas por los accesorios como: la caja de cambios, el generador, el diferencial, la bomba de agua y otros componentes auxiliares como alternador, bomba de dirección hidráulica y el sistema de silenciador o escape.

<sup>10</sup>**N. del T.** Se adicionó el estado de las llantas.

---

Tipo de Tractor	Concreto	Suelo Firme	Suelo Removido por labranza	Suelo Blando
Tracción en dos ruedas	0,87 (1,15)	0,72 (1,39)	0,67 (1,49)	0,55 (1,82)
Ruedas Delanteras asistidas	0,87 (1,15)	0,77 (1,30)	0,73 (1,37)	0,65 (1,54)
Tracción en cuatro Ruedas	0,88 (1,14)	0,78 (1,28)	0,75 (1,33)	0,70 (1,43)
Cadenas u Orugas	0,88 (1,14)	0,79 (1,27)	0,80 (1,25)	0,78 (1,28)

---

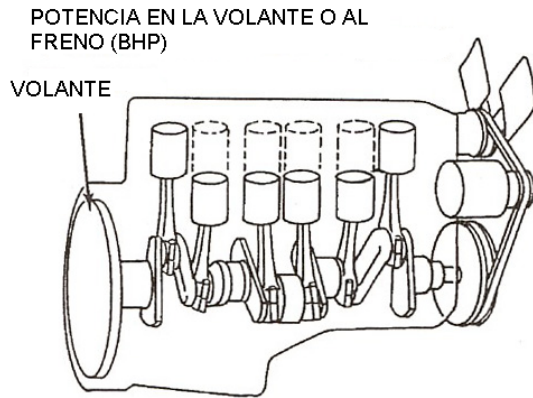
**Tabla 2.** Se puede estimar la potencia en la barra de tiro de un tractor multiplicando la potencia en el TDF por el valor que se encuentra en la tabla. Una estimación de la potencia del tractor en el TDF si se conoce la potencia en la barra de tiro, se logra multiplicándola por el valor entre el paréntesis. Fuente: ASAE Standard D497.4 (2003)

En la **Tabla 2** podemos observar que para cierto tipo de tractores, la potencia en la barra de tiro *disminuye* (un porcentaje) del valor de la potencia en el TDF y se reduce tanto como lo hace la resistencia de la superficie de trabajo, con un máximo para concreto y un mínimo para suelo suelto<sup>11</sup>. Por otro lado, para una superficie dada la potencia en la barra de tiro (PBDT) *aumenta* cuando se incrementa el área de contacto entre el tractor y la superficie; por ejemplo, al cambiar un tractor con tracción en las dos llantas por otro con tracción en las cuatro o por uno de orugas o cadenas. Lo anterior es debido a la diferencia en la *tracción*, concepto que se estudiará más adelante.

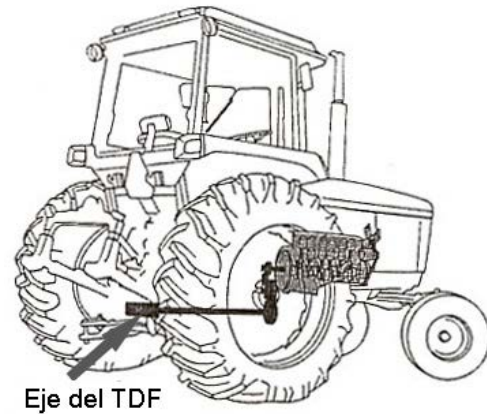
En labranza nos interesa mucho más la potencia del tractor en la barra de tiro (PBDT); sin embargo, es muy común encontrar en los catálogos el valor de la potencia en el TDF. Para jalar un implemento de labranza a una velocidad dada, debemos conocer la cantidad total requerida del tiro. El *tiro total*, concepto que ya hemos definido, es la fuerza requerida para jalar un implemento completo en el campo. El *tiro unitario*, o *específico*, es la fuerza de tiro necesaria para jalar una sola de las unidades componentes del implemento. Tiro total es, por tanto, la suma de todos los específicos.

---

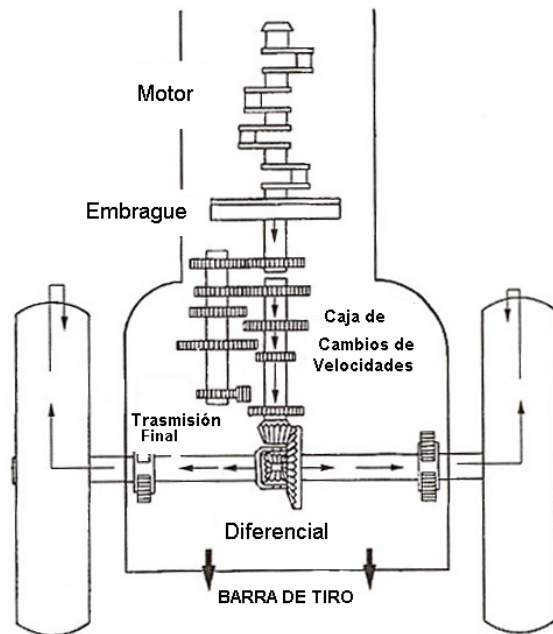
<sup>11</sup> N. del T. Suelo suelto que haya sido sometido a labranza, condición muy común en las prácticas agrícolas.



**Figura 3.** Potencia al freno.



**Figura 4.** Potencia en el TDF



**Figura 5.** Potencia en la BDT

El requerimiento de tiro para un implemento de labranza se puede obtener de las diferentes publicaciones resultantes de la investigación de los ingenieros agrícolas y de los fabricantes o distribuidores de implementos;

generalmente se indica como tiro<sup>12</sup> por unidad de ancho del implemento (Tabla 3). Para calcular esta fuerza se requieren conocer los siguientes factores:

- a) Ancho del implemento
- b) Profundidad de labranza
- c) Velocidad de trabajo
- d) Resistencia que opone el suelo

**Tabla 3. Resistencia del Suelo**

Implemento de Labranza/Tipo de Suelo	Tiro en kN (kPa) (lbs/pie) <sup>13</sup>	Velocidad utilizada en km/h (mph)	Potencia en Barra de Tiro en hp/m (hp/ft)
<b>Arado de Cincel</b>			
Fino	8,4 (575)	8 (5)	25,3 (7.7)
Medio	7,3 (500)	8,8 (5.5)	23,9 (7.3)
Grueso	5,8 (400)	9,6 (6)	21 (6.4)
<b>Arado de Vertedera</b>			
Fino	17,5 (1200)	7,2 (4.5)	47 (14.4)
Medio	13,4 (920)	8 (5)	40 (12.3)
Grueso	8,7 (600)	8 (5)	26 (8.0)
<b>Cultivador de Campo</b>			
Fino	5,7 (390)	8 (5)	17 (5.2)
Medio	4,9 (340)	8,8 (5.5)	16 (5.0)
Grueso	3,9 (270)	9,6 (6)	14 (4.3)
<b>Rastra de Discos en Tándem</b>			
Fino	5,8 (400)	7,2 (4.5)	16 (4.8)
Medio	4,9 (340)	8 (5)	15 (4.5)
Grueso	4,4 (300)	8,8 (5.5)	14 (4.4)
<b>Rastra Excéntrica Pesada</b>			
Fino	7,6 (525)	7,2 (4.5)	21 (6.3)
Medio	6,7 (460)	8 (5)	20 (6.1)
Grueso	6,3 (430)	8 (5)	19 (5.7)

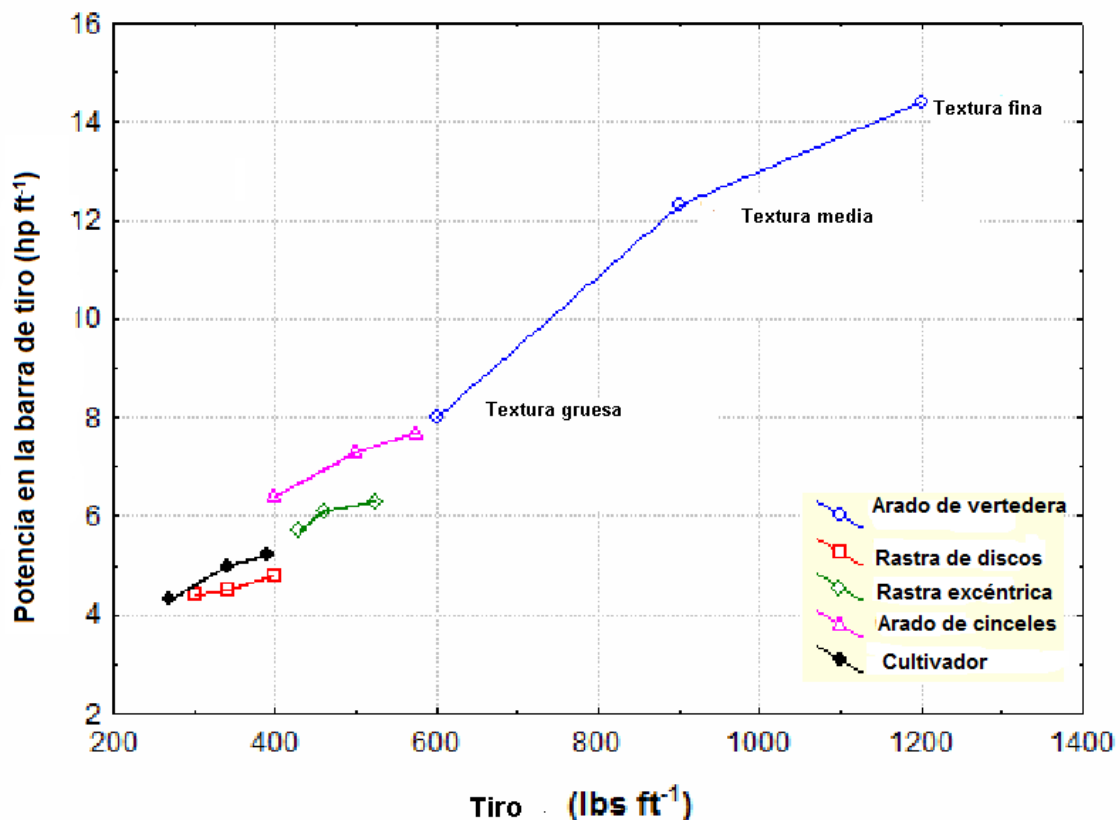
(Source: Siemens, J.D. and W. Bowers. 1999. Machinery Management. John Deere Service Publication)

<sup>12</sup>**N. del T.** En maquinaria, el tiro es la resistencia específica del suelo a la labranza, es un indicador para clasificar los suelos de acuerdo con la dificultad de su labranza en ligeros, medianos, semipesados y pesados. Se determina por la relación:  $K = P/a \times b$ . Donde  $P$  es la fuerza de tiro medida en el dinamómetro (kg),  $a$  es la profundidad de trabajo (cm) y  $b$ , el ancho de trabajo (cm).

<sup>13</sup>**N. del T.** El kN es una medida de fuerza y el kPa de esfuerzo. Esfuerzo = F/A. Factores de conversión: lbs/pie<sup>2</sup> x 47,8803 = Pa; lbs/plg<sup>2</sup> x 0,00689 = MPa.  $1 Pa = N/m^2 = J/m^3 = kg/m \times seg^2$ ;  $1,0 lbf = 0.0044822 kN$ ;  $1,0 lb/plg^2 = 6,89475 kPa$ ;  $1,0 kPa = 1,0 kN/1,0m^2$ ;  $1lb/pie = 0,014545454 kN/m$ .



Los datos de la resistencia del suelo se muestran en la gráfica de la *Figura 6* lo que hace más fácil comparar la relación existente entre el tiro y la potencia en la barra de tiro, para varios implementos de labranza operando en diferentes tipos de suelos. En la gráfica podemos observar que, para todos los tipos de suelos, el arado de vertederas tiene el mayor valor del tiro y los más altos requerimientos de potencia en la barra de tiro y que el cultivador y la rastra de discos en tándem los valores más pequeños. Lo anterior tienen sentido, la profundidad de operación del arado es mucho mayor que la del cultivador o de la rastra.



**Figura 6.** Al graficar los datos de la Tabla 3, es mucho más fácil comparar el tiro y los requerimientos de potencia de diferentes implementos de labranza operando en varios tipos de suelos.

El valor del tiro para las sembradoras y otros implementos que operan superficialmente, es básicamente una función del ancho del implemento y de la velocidad de trabajo. Para esos valores se asumen promedios de la profundidad de trabajo y de las velocidades, en rangos donde se ha obtenido un buen desempeño. La resistencia del suelo se basa en su textura pero, puede variar, ampliamente dentro de una misma clase textural, por

características o condiciones como el contenido de humedad, el grado de compactación (la densidad aparente) y la distribución del tamaño de las partículas.

Consideremos este ejemplo: Un cuerpo de un arado de vertedera de 0,41 m (16 plg) de ancho, que trabaja a 0,18 m (7 plg) de profundidad (0,41 x 0,18) (7 x 16) genera una sección de surco de 0,074 m<sup>2</sup> (112 plg<sup>2</sup>) (ancho del implemento x profundidad). El tiro de un arado de vertedera varía entre 21 y 138 kPa (3 y 20 lbs/plg<sup>2</sup>)<sup>14</sup>; un suelo franco arenoso con humedad, podría ejercer una resistencia de 44 kPa (6,4 lbs/ plg<sup>2</sup>). El tiro unitario<sup>15</sup> sería (44 x 0,074) (6,4 x 112) 3,26 kN (717 lbs) por cuerpo. Para un arado de cuatro cuerpos el tiro total sería (4 x 3,26) (4 x 717) 13,04 kN (2.868 lbs).

Cuántos caballos de potencia (hp) se requerirían para jalar este particular arado si trabaja a una profundidad de 0,18 m (7 plg) y a una velocidad de 8 km/h (5 mph)? En la Tabla 3 encontramos los valores para la velocidad indicada, un tiro bajo en un suelo pesado, como un franco arenoso. El tiro está dado en *kN por metro de ancho del implemento (libras por pie de ancho del implemento)*, que para nuestro arado sería igual a 13,04 kN dividido por 1,64 m (2.868 dividido por 5,3 pies) o 7,95 kN por metro de ancho (541 lbs por pie de ancho). Este valor es menor a los 8,7 kN (600 lbs por pie) señalados en la tabla. Teniendo en cuenta que la relación existente entre la textura del suelo y la potencia en la barra de tiro (PBDT) es ligeramente proporcional a la misma velocidad de avance, podemos interpolar la potencia en la barra de tiro (PBDT) por metro.

$$13,04 - 8,7 (920 - 600) = 4,7 \text{ kN (320 lbs/pie)}$$

$$40 - 26 (12,3 - 8,0) = 14 \text{ hp/m (4,3 hp/pie)}$$

$$4,7 \text{ kN/m (320 lbs/pie)} / 14 \text{ hp/m (4,3 hp/pie)} =$$

$$0,34 \text{ kN por hp (74,4 lbs por hp)}$$

Lo anterior nos indica que se requiere un hp por cada una de las 0,34 kN de fuerza (74,4 lbs de fuerza), entonces tomará 8,7 - 7,95 (600 - 541) 0,75 (79) dividido por 0,34 (74,4) o sean 2,20 hp por cada metro (0,79 hp por pie) igual a 23,8 hp/m (7,2 hp/pie) menos que el valor señalado en la tabla: 26 hp/m (8 hp/pie). A una velocidad de 8 km/h (5 mph) se requerirían 23,8 hp/m (7,2 hp/pie) para jalar el

<sup>14</sup>N. de T. lbs/plg<sup>2</sup> x 6,89476 = kPa; 1Pa = 1 N/m<sup>2</sup>

<sup>15</sup>N. de T. Tiro unitario o Fuerza de tiro por cuerpo

arado. Al multiplicar el ancho total del arado por el valor anterior hallamos el total de hp requeridos.

$$23,8 \text{ hp/m (7,2 hp/pie)} \times 1,6 \text{ m (5,3 pies)} = 38,2 \text{ hp en BDT (38,2 hp en BDT)}$$

Otra fórmula, más simple nos lleva a la misma respuesta:

En el sistema Inglés:

$$\text{Potencia en la Barra de Tiro} = \frac{\text{tiro (libras)} \times \text{velocidad (mph)}}{375 \text{ (constante)}}$$

$$375 \text{ (constante)}$$

$$\text{Potencia en la barra de tiro} = \frac{2,868 \text{ lbs} \times 5 \text{ mph}}{375} = 38,2 \text{ hp}$$

$$375$$

La fórmula anterior pero en las unidades SI:

$$\text{Potencia en la BDT (en kW)}^{16} = \frac{\text{Fuerza (kN)} 13,04 \times 8 \text{ (kph) Velocidad}}{3,6}$$

$$3,6$$

$$= 28,98 \text{ kW} \times (1 \text{ hp}/0,746 \text{ kW})$$

$$= 38,2 \text{ hp}$$

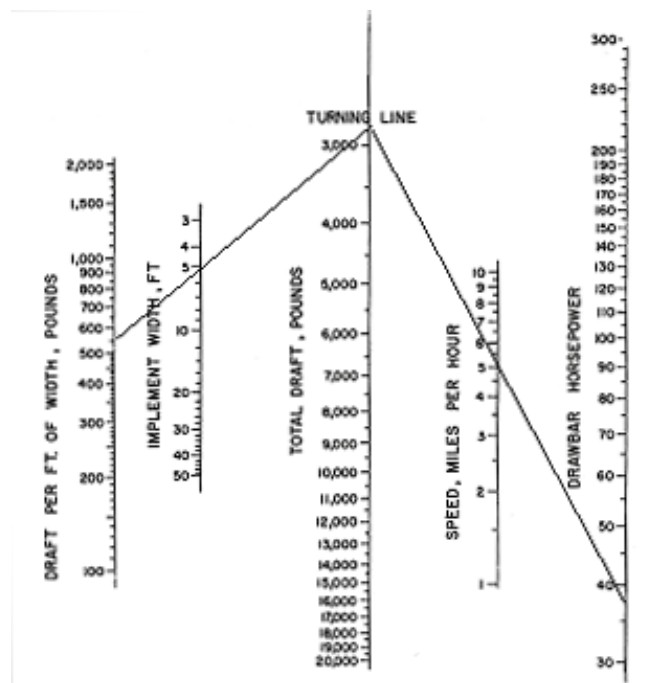
La respuesta a este problema también se puede lograr con el *nomograma* de la **Figura 7**. Los nomogramas se pueden utilizar para determinar la potencia en la barra de tiro requerida o para hallar *cualquier valor no conocido* si todos los demás valores en la escala se conocen o se asumen.

Un suelo arcillo-arenoso seco demanda un tiro mucho mayor y, por ende, requiere más potencia para ser arado que en condición de humedad. Lo anterior, se debe al efecto lubricante que realizan las películas de agua que rodean las partículas de suelo y también, debido a una reducción de la *resistencia del suelo* por la humedad. Por otro lado, los suelos de textura fina requieren mucho más potencia para ser arados y en muchos casos, hasta podría ser imposible hacerlo cuando están secos. Para ahorrar potencia y maximizar eficiencia, el tiempo de preparación debe coincidir con los suelos en condición *friable*. Los suelos adquieren este estado cuando su contenido de humedad está a *capacidad de campo* o muy cercano a esta condición.

<sup>16</sup> N. de T. 1 kW = 0,746 hp

Cuando la velocidad de arada se aumenta, también se incrementa el tiro, generalmente varía como el cuadrado de la velocidad. En términos prácticos, significa que al duplicar la velocidad de avance de 3,2 a 4,6 kph, el tiro se incrementa *cuatro veces*. Esto origina un problema al agricultor, al realizar un balance económico entre la velocidad de trabajo, la potencia del tractor y el ancho de trabajo del implemento. Para encontrar que tan grande debería ser el tractor para jalar el arado de cuatro vertederas del anterior ejemplo, debemos regresar a los datos de la tabla 2.

### POTENCIA EN LA BARRA DE TIRO PARA IMPLEMENTOS DE LABRANZA



**Figura 7.** Este nomograma puede ser utilizado para dimensionar o ajustar el tamaño de los implementos y los tractores. El ejemplo corresponde a la potencia en la barra de tiro (PBDT) para un arado de cuatro vertederas de 41 cm.

La potencia requerida en la BDT es 38,2 hp. Para realizar la labor de arada y cubrir los 38,2 de potencia en el eje toma de fuerza, TDF, multiplicamos 38,2 por 1,39 igual a 53 hp en el TDF requeridos para un tractor con tracción en las llantas trasera (2WD). Debemos buscar un tractor que *al menos* entregue 53 hp en el TDF. En la práctica, para un mejor desempeño en la labor, es mejor seleccionar el tamaño del tractor por el *máximo* tiro que pueda ser encontrado a la velocidad dada. Lo anterior, teniendo en

cuenta que en el campo se encuentra una mezcla de suelos y el tractor debe seleccionarse para el suelo que presente la mayor resistencia.

### 3. TRACCIÓN

Cuando una herramienta de labranza es jalada a través del suelo, la unidad de potencia (tractor o animal) debe superar las fuerzas de tiro originadas por la resistencia que le hace el suelo para moverse hacia adelante. Esto se logra porque los tractores están diseñados para transmitir grandes cantidades de potencia al suelo. Lo hacen a través del eje sobre el cual están montadas las ruedas o llantas. Al transmitir esa potencia se origina una gran fuerza de fricción, o *tracción*, en la superficie del suelo que convierte el torque o movimiento rotacional del cigüeñal del motor del tractor en un movimiento lineal hacia delante. En otras palabras, tracción es la fuerza de movimiento de desplazamiento hacia delante, o atrás, derivada del contacto entre las llantas del tractor y una superficie: suelo, concreto, asfalto, etc.

El propósito fundamental de las llantas del tractor es soportar su peso, con una mínima resistencia mientras se desplaza sobre una superficie. Para lograrlo, las ruedas deben acomodar (reorganizar) las partículas de suelo para darle una suficiente *resistencia al corte* que soporte el peso y al mismo tiempo, genere un movimiento de desplazamiento. La resistencia al corte es una medida de la fuerza necesaria para deformar el suelo y se expresa en  $\text{kN/m}^2$  (en sistema Inglés:  $\text{lb/pie}^2$ ).

El suelo deriva su resistencia al corte de la combinación de las *fricciones internas*, las cuales pueden ser definidas como la fricción entre las partículas del suelo que entran en contacto entre sí y la *cohesión* se puede tomar como la resistencia de un aglomerado (terrón) de suelo a ser partido o quebrado. En ambos casos, el contenido de humedad afecta la resistencia. Por ejemplo, una arcilla saturada no muestra fricción interna pero tiene cohesión y la misma, no depende de la carga que se aplique. La arcilla húmeda puede tener tanto fricción interna como cohesión, dependiendo de su contenido de humedad. La arena pura y seca deriva su resistencia de la fricción interna y ésta, se incrementa con la carga aplicada. Al añadir humedad a la arena seca se incrementa su cohesión por la *tensión superficial* presente entre las moléculas de agua. Es mucho más difícil caminar en arena seca, por poseer fricción interna y no cohesión. La tracción en arena se hace más fácil al agregarle agua. Pero, al añadirle

demasiado su fricción interna se disminuye tanto como la cohesión, perdiendo toda resistencia y llega a ser un fluido. Usted se puede hundir, como en las arenas movedizas.

Los suelos agrícolas son una mezcla de arena, arcilla y limo que origina una combinación de fricción interna y cohesión. Observamos que los suelos arenosos tienden a incrementar su resistencia como una respuesta a las cargas, mientras que la resistencia de los arcillosos depende mucho más de sus propiedades de cohesión. En términos prácticos esto significa que en suelos arenosos se obtiene mejor tracción añadiendo *lastre* (peso) a las llantas; mientras que en los arcillosos se obtiene incrementando el área de contacto entre las llantas y el suelo; ejemplo, cambiando de tracción en las dos llantas por tracción en las cuatro o doble tracción<sup>17</sup> o por tractores de cadenas u orugas.

Cuando el tractor se desplaza sobre el suelo las llantas lo deforman dejando una huella. Esto se conoce como la "huella plantar" de la llanta. El peso de la llanta hace presión sobre el suelo originando una compactación y un incremento en su resistencia. Se puede entender la compactación como el reacomodamiento de las partículas del suelo que son forzadas a estar más juntas o unidas, al ser expulsado el aire que se encuentra entre ellas (porosidad). Como el aire no tiene fricción interna o cohesión para oponerse, su expulsión incrementa la resistencia del suelo, al igual que sucede con otros factores tal como la humedad.

La potencia que realmente entrega un tractor en la barra de tiro (**PBDT**) depende de dos factores relacionados con el suelo y que afectan a las llantas:

- ✓ Resistencia al rodamiento
- ✓ Patinaje

Podríamos imaginar la llanta de un tractor en movimiento, ya sea subiendo o bajando una cuesta. El esfuerzo que se opone para retardar este movimiento es la *resistencia al rodamiento*. En otras palabras, un tractor que está ejerciendo un esfuerzo al subir una pendiente y además superar la fuerza de gravedad, que se ejerce hacia abajo, tiene menos potencia disponible para desplazarse. En los suelos sueltos, de baja resistencia, con

---

<sup>17</sup> N. del T. Doble tracción significa que tiene tracción en los dos ejes, comúnmente llamados 4x4 o 4WD.

poca capacidad de soportar carga, las llantas dejan huellas bien profundas. En estas condiciones, el tractor consume mucho más potencia para contrarrestar la fuerza de la gravedad que para desplazarse.

De igual forma, así como el suelo se deforma verticalmente, hacia abajo, en respuesta al peso del tractor, se debe deforma horizontalmente para generar tracción. La cantidad de suelo que se deforma horizontalmente se conoce como *patinamiento o patinaje de las llantas*. Cuando no hay patinaje, no hay deformación del suelo y consecuentemente, no hay potencia. Con un patinaje de las llantas del 100%, toda la potencia se consume en la deformación del suelo y no es posible un real desplazamiento hacia delante. Debemos realizar un balance entre los dos extremos, la práctica sugiere que la máxima tracción, y consecuentemente la potencia, se transmite a las llantas cuando el patinaje está entre 8 y 15%, dependiendo del tipo de tractor y de las características de la superficie del suelo (Tabla 4).

**Tabla 4.** Niveles de patinaje recomendados para diferentes condiciones de suelo (%). (Fuente: *John Deere Service Publ., 1974*).

	Tracción en 2 ruedas	Ruedas delanteras asistidas	Tracción en 4 ruedas	Orugas o carriles
Superficie firme	10	9	8	1
Suelo preparado	12	11	10	2
Suelo suelto	15	13	12	3

El patinaje en los tractores se puede manejar con el lastrado en las llantas. Generalmente se hace de dos formas: (1) añadiendo contrapesos de hierro forjado en los ejes trasero y delantero y (2) llenando las llantas traseras con un líquido tal como cloruro de calcio o simplemente agua. Comúnmente, el constructor indica la cantidad de lastre permitido para un tractor. Los tractores solo se lastran lo suficiente para maximizar la *eficiencia de tracción*, que es la fracción de potencia disponible en el eje y transmitida a un implemento a través de la BDT. Si el tractor es sobre-lastrado el patinaje será bajo pero la resistencia al rodamiento será excesiva. El sobre-lastrado puede ocasionar daños en la transmisión. El efecto del hierro forjado y el líquido de lastrado es similar mientras la carga sobre la rueda y la presión de inflado sean las mismas.

Para resumir, se indican algunos aspectos a considerar para mejorar la eficiencia de tracción:

- Al lastrar el tractor siga las recomendaciones del fabricante sobre límite de peso permitido.
- Trabaje dentro de los límites permitidos de patinaje teniendo en cuenta las condiciones de suelo y tipo de tractor.
- Utilice la mínima presión de aire permitida para la carga en el eje recomendada por el constructor.

Se deben seleccionar las llantas de mayor diámetro disponible y que puedan soportar el peso del tractor con la mínima presión de aire en ellas. Las llantas dobles trabajan mejor en condiciones de suelo firme, donde se hace necesario un incremento en la tracción y soportar mayores cargas en los ejes. A una misma presión las llantas dobles pueden incrementar el tiro hasta en 40% si se comparan con una llanta. Por otro lado, las llantas dobles tienen una mayor resistencia al rodamiento y en algunos casos pueden hasta reducir la eficiencia de tracción.

Es requerida cierta cantidad de patinaje pero, surge una pregunta: Cómo medimos el patinaje? Podemos utilizar un método cuantitativo muy simple. Primero, medimos la distancia que recorre el tractor bajo carga<sup>18</sup> en diez vueltas de la llanta. Enseguida, cuente el número de vueltas que da la llanta con el tractor sin carga al recorrer la misma distancia.

Porcentaje de patinaje =

$$\frac{(\# \text{ vueltas bajo carga} - \# \text{ vueltas sin carga}) \times 100}{\# \text{ vueltas sin carga}}$$

Ejemplo:

Número de vueltas con el tractor cargado: 10

---

<sup>18</sup> N. del T. Indica que el tractor está jalando o arrastrando un implemento o trasportando peso.



Número de vueltas con el tractor sin carga: 9

$$\text{Patinaje (\%)} = \frac{(10-9) \times 100}{9} = 11\%$$

Para evaluar el patinaje también se puede utilizar una inspección visual de la huella dejada por la llanta del tractor bajo carga. Las llantas de un tractor lastrado dejan una huella profunda e inconfundible en el suelo. El suelo entre los tacos<sup>19</sup> presenta una clara e inalterada corona o punta. En este caso, el patinaje no es evidente. Con poco lastrado las huellas son fácilmente borradas y se observan pocas coronas, las mismas son borradas por el giro de la llanta. Cuando la cantidad de lastre es correcta, se observa un pequeño patinaje. Visualmente, pueden observarse ligeras perturbaciones hacia atrás de las coronas de suelo y las huellas de las llantas permanecen bastante identificables (Ver Fig. 8A, 8B y 8C).



**Figura 8.** Las huellas de un tractor cargado que muestran diferentes valores de patinaje. La lectura de estas en el suelo nos puede mostrar que objeto las hizo. Las ruedas o llantas de otros implementos de tiro, como las sembradoras, también presentan patinaje, lo que puede afectar la calibración. Fuente: *adaptado de John Deere Service Publ., 1976.*

Concluimos esta nota técnica con algunas anotaciones sobre las llantas de los tractores. La mayoría de los tractores modernos utilizan llantas de caucho y en muy pocos se utilizan ruedas de acero. Bajo condiciones muy difíciles, tales como arcilla húmeda, las cadenas u orugas son una necesidad. Las llantas de caucho tienen tacos que pueden ser dimensionados y orientados en formas diferentes según las condiciones del suelo.

Las funciones de los tacos son:

<sup>19</sup>N. del T. Vocablo para denominar el labrado de la superficie de las llantas agrícolas.

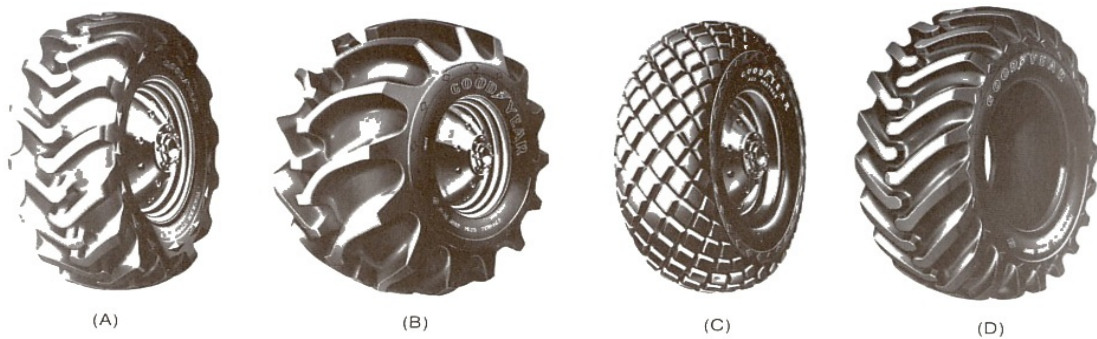
- Barrer<sup>20</sup> el suelo suelto y la basura que se adhiere a las llantas cuando se trabaja. Se requiere algo de patinaje para que se realice esta acción "clave" y además, se involucra algo de pérdida de tracción.
- Penetrar la fina capa de agua que se forma sobre el concreto o la capa resbaladiza sobre los suelos firmes y cohesivos (arcillosos).

La **Figura 9** muestra algunos tipos comunes de llantas para tractores. La *todo propósito* (**Fig. 9A**) tiene el familiar taco en "V" y representa un compromiso entre la tracción, la flotación y la vida del taco. El paso y el ángulo de inclinación de los tacos se fijan para el auto-limpiado. Los tacos no atraviesan el ancho total de la llanta; este es el estilo universalmente conocido como "centro abierto", utilizado para trabajo en suelos. El *taco alto*, (**Fig. 9B**) suministra máxima tracción en condiciones fangosas. Estos sufren desgaste rápido cuando se utilizan en superficies duras o pavimentadas pero, ofrecen mayor duración ya que tienen más caucho que gastar. Estos tacos se utilizan comúnmente en operaciones fangosas y en las que el lodo es un problema. *Tacos diamante* (**Fig. 9C**) para *pastos* o *césped*, entregan buena tracción con mínima perturbación del suelo. Se utilizan en tractores para el mantenimiento de las canchas de césped, no dejan huellas ni dañan la superficie. Esos tacos también son buenos para suelos arenosos o sueltos y sufren poco desgaste en superficies pavimentadas. Los *Tacos industriales* (**Fig. 9D**) son menos espaciados para entregar un mejor contacto y menos desgaste por el uso. Sobre superficies pavimentadas entregan mejor tracción que los tacos diamantes y generalmente tienen casi el doble de duración que el todo propósito. Los tacos industriales son la mejor selección para equipos que trabajan en pavimento.

---

<sup>20</sup>N. del T. Despegar, soltar.

Figura 9.



#### 4. TÉRMINOS BÁSICOS.

**Caballos de fuerza o Horsepower<sup>21</sup>.** Unidad inglesa de potencia definida como 550 libras-pie de trabajo realizado por segundo, abreviado como HP. En el sistema métrico la potencia se mide en kilovatios (kW). La potencia generada por un motor de combustión interna normalmente es citada en horsepower, aunque es la cantidad de torque desarrollado por el motor lo que permite la conversión de potencia en movimiento de desplazamiento.

**Capacidad de campo.** La cantidad de agua que permanece en el suelo después de haber sido drenado libremente el exceso. El agua que penetra al suelo, por riego o precipitaciones, inicialmente se mueve hacia abajo debido a la fuerza de la gravedad. El punto en el cual cesa el drenaje (o llega a ser muy pequeño) es determinado por la forma de las partículas del suelo y su arreglo. El agua que permanece después del libre drenaje es retenida por las fuerzas capilares (adhesión y tensión superficial de las moléculas de agua) y representa el contenido de agua a "capacidad de campo". Un suelo franco alcanza una capacidad de campo a una succión capilar de  $\sim -10kP$  pero los suelos arcillosos pueden tener mayores valores. La capacidad de campo se utiliza principalmente para inferir otras condiciones físicas del suelo como su facilidad para ser trabajado o la cantidad de agua disponible relacionada con su contenido. Para la mayoría de los suelos agrícolas la capacidad de campo se alcanza después de 24 o 48 horas de humedecimiento.

<sup>21</sup> **N. del T.** En algunas situaciones es necesario distinguir entre las diversas definiciones de caballos de fuerza y por tanto, se añade un sufijo: HP (I) para la mecánica (o imperial) caballos de fuerza, hp (M) para caballos de fuerza métrico, caballos de fuerza (S) de la caldera (o vapor) caballos de fuerza y caballos de fuerza (E) de potencia eléctrica. Caballos de fuerza hidráulica es equivalente a la potencia mecánica.

***Dinamómetro.*** Instrumento utilizado para medir la potencia de salida de una máquina. El dinamómetro más simple (y crudo) es el tipo-freno. Ahora se tienen dispositivos eléctricos e hidráulicos mucho más sofisticados. Para medir el tiro en el campo se utilizan (fusibles o galgas) como indicadores de resistencia.

***Eficiencia de tracción.*** Fracción de la potencia disponible en los ejes y que es entregada a un implemento mediante el enganche o la barra de tiro. La eficiencia de tracción mide que tan bien un tractor utiliza la potencia disponible en el eje para jalar un implemento a través del suelo. La potencia es transmitida más eficientemente a superficies que no se deforman bajo presión y donde la tracción es suficiente para prevenir que las ruedas patinen.

***Enganche.*** Punto de acoplamiento de un implemento al tractor. La mayoría de los tractores modernos tienen enganche de tres puntos, mientras los modelos más antiguos podían tener solo uno. La barra de tiro del tractor es también considerada como punto de enganche. Las herramientas que se acoplan a la barra de tiro se denominan implementos *de tiro*.

***Fuerza.*** Cantidad física definida como la acción de un cuerpo sobre otro que tiende a generar movimiento, cambios en su aceleración o en la dirección del movimiento. Es medida en unidades de Newtons (N, en SI) o libras fuerza (lbf, en sistema Inglés). Las puntas de las flechas (también conocidas como vectores) se utilizan para indicar la dirección, mientras que la longitud de la cola es proporcional a la magnitud de la fuerza.

***Friable.*** Estado físico del suelo para ser fácilmente trabajado con implementos de labranza. Se dice que los terrones son friables cuando se rompen fácilmente al aplicarles una fuerza. La friabilidad del suelo está influenciada tanto por la textura como el contenido de humedad.

***Lastre.*** Peso que se adiciona para incrementar seguridad, eficiencia o rendimiento de un dispositivo. Se le añade a los tractores o implementos para mejorar la tracción y estabilidad y/o mejorar penetración al suelo en las labores de labranza.

**La Volante.** Disco giratorio, ubicado al final del cigüeñal de los motores en vehículos con transmisión manual, que se acopla al embrague, para que motor y transmisión giren a la misma velocidad.

**Masa.** La cantidad de materia de un objeto que le hace tener peso en un campo gravitacional. Masa y peso no son las mismas propiedades (compare *peso*). En el sistema métrico la unidad de medida es el kilogramo.

**Nomograma.** Gráfico consistente de tres o más líneas, usualmente rectas paralelas, de variables relacionadas. Cada línea es graduada para una variable diferente y así, una línea recta que pase a través de todas las líneas intercepta los valores relacionados de cada variable. La línea central se denomina línea pivote.

**Patinaje de las ruedas o llantas.** Cantidad de suelo que se deforma horizontalmente al paso de una llanta. Es un factor en el cálculo de la *eficiencia de tracción* que incrementa la pérdida neta de la potencia de tracción.

**Peso.** Fuerza ejercida sobre un objeto en un campo gravitacional. Un cuerpo que no está en reposo acelerará rápidamente hacia el centro de la tierra (obviamente golpea primero la superficie de la tierra). Si el cuerpo está en reposo, la fuerza restrictiva es igual a o representa el *peso* del objeto. El peso de un cuerpo variará según el sitio donde se encuentre en la tierra debido a la aceleración de la gravedad. Por otro lado, la *masa* de un objeto es una propiedad fija y permanece constante en cualquier sitio y se puede medir.

**Potencia.** Definida como el producto de una fuerza que se mueve a través de una distancia en algún intervalo de tiempo, o fuerza x distancia/tiempo. La potencia se puede tomar de los tractores en al menos cuatro formas: (1) potencia de tiro desde la barra de tiro y el enganche de los tres puntos; (2) potencia giratoria desde el eje del toma de fuerza TDF; (3) potencia lineal y rotatoria desde el sistema hidráulico; y (4) potencia eléctrica desde el sistema eléctrico del tractor. La unidad de medida es caballos de fuerza (HP, sistema Inglés) y kilovatios (kW, en SI).

**Potencia al freno (volante).** La máxima potencia que puede desarrollar un motor. Medida en la volante y se expresa como caballos de fuerza (Hp, en sistema Inglés) o kilovatios (kW, en SI). El término *potencia al freno* se origina porque fue inicialmente medida con un dinamómetro denominado *Freno Prony*.

**Potencia en el eje Toma de Fuerza (PTDF).** Potencia estacionaria medida en el eje toma de fuerza del tractor. Este eje permite transferir directamente la potencia desde el tractor a los implementos a través de ejes y uniones universales<sup>22</sup>. En tractores pequeños el eje tiene seis estrías y gira a 540 RPM. Los tractores más grandes pueden tener ejes de 21 estrías que rotan a 1000 RPM.

**Potencia en la Barra de tiro (PBdeT).** Medida de la potencia que un motor<sup>23</sup> tiene para jalar por medio de las llantas, ruedas o carriles. Se expresa como un porcentaje de la potencia medida en el TDF del tractor y varía según las características de la superficie y el tipo del tractor.

**Resistencia al corte.** La habilidad de un suelo para resistir cizallamiento o el movimiento de la masa de suelo en un ángulo respecto a la fuerza aplicada. Un ejemplo incluiría el popular deslizamiento de tierras. La resistencia al corte se determina en el campo utilizando un dispositivo conocido como *torvane*. Las unidades son libras fuerza/pie<sup>2</sup> (sistema Inglés) y kilo Newton/cm<sup>2</sup> (SI).

**Resistencia al rodamiento.** Fuerza retardante contraria al movimiento que actúa sobre las llantas del tractor y tiende a disminuir el movimiento hacia delante. La resistencia al rodamiento aumenta en proporción directa al incremento del peso sobre la llanta. También se incrementa cuando decrece la resistencia del suelo.

**Resistencia del suelo.** Una propiedad física fundamental y es el grado de resistencia de una masa de suelo a ser deformada o aplastado cuando se le aplica una fuerza. También llamada *consistencia*. Se determina por el grado de cohesión y la fricción interna existente entre las partículas de suelo.

---

<sup>22</sup>**N. del T.** Cuando se requiere transmitir movimiento entre dos ejes concéntricos, pero desviados angularmente, se recurre al cardán o unión universal. La simplicidad, su durabilidad y bajo costo justifican este acople.

<sup>23</sup>**N. del T.** Máquina.

Las unidades son similares a las de la resistencia al corte. Puede ser estimada por la presión requerida para exprimir una muestra de suelo entre los dedos. Los términos tales como *frágil* (falla inmediatamente con un pequeño esfuerzo), *elástico* (cauchoso), *friable* (se desmorona fácilmente) y *suelto* (sin coherencia) son utilizados para describir esta propiedad.

**Tensión superficial.** Propiedad física presente en la interface de un líquido y gas, o de un líquido y sólido. En el agua, la tensión superficial se incrementa debido al desbalance en las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua en contacto entre sí, en contacto con el aire o con un sólido. Esta fuerza, desbalanceada, mantiene juntas las moléculas de agua, creando como una membrana curva de mayor resistencia. Esta es la tensión superficial que soporta una aguja de acero sobre la superficie del agua en un vaso, aunque la densidad del acero sea mayor que la del agua (obviamente, si es empujada la aguja se hundirá).

**Tiro.** Fuerza horizontal requerida para jalar un implemento que se encuentra dentro del suelo (arado, cincel, sembradora, etc.) a una velocidad dada. Se expresa en libras fuerza (*lbf*, sistema Inglés) o kiloNewtons (kN SI). Se mide con un dinamómetro.

**Torque.** Es la fuerza que produce efectos de giros o retorcimientos alrededor de un punto pivote. El torque es igual al producto de la fuerza x la distancia, cuando la distancia es dada como la longitud de una línea perpendicular entre el pivote y la línea de fuerza. Tiene las mismas unidades que el trabajo, libras-pie (*lb-pie*, sistema Inglés) y julios (SI); sin embargo, sus conceptos son algo diferentes.

**Trabajo.** Definido como la acción de una fuerza a través de una distancia, sin tener en cuenta el tiempo. El concepto de *desplazamiento* de un objeto a través de una distancia es fundamental para la definición de trabajo. Se calcula como el producto de fuerza x distancia y se mide en unidades de libras-pie en el sistema Inglés y julios en el sistema métrico.

**Tracción.** Fuerza efectiva que resulta del empuje de las llantas del tractor sobre el suelo u otra superficie. La tracción depende de factores tales

como el tipo de superficie, el área de contacto entre las llantas y la superficie y la potencia y peso del tractor.

*Tractor.* Vehículo, potenciado por un motor a gasolina o ACPM (diésel), que posee llantas grandes, con tacos profundos, utilizado en agricultura para jalar o arrastrar maquinaria. Hay cuatro tipos de tractores agrícolas: (1) de *propósito general* (más popular para la producción de cultivos); (2) el *utilitario* (similar al anterior pero también puede ser utilizado en trabajos de movimiento de tierra, tales como cargue, descargue, excavaciones); (3) para *cultivos en surcos* (diseñado para trabajar en cultivos en surcos espaciados igualmente, con ejes delanteros ampliamente espaciados o estrechos); (4) *hortícola* (para huertos frutícolas).

### ***Lecturas recomendadas***

1. A  
*American Society of Agricultural Engineers Standards.* 48th Ed. (2003). ASAE D497.4 St. Joseph, MI. Current standards for calculating tractor performance parameters including draft.
  2. Borgman, D.E., Hainline, E., and M.E. Long. (1974). *Fundamentals of Machine Operation: Tractors.* John Deere Service Publication. Moline, IL.
  3. Bowers, C. G. (1989). Tillage draft and energy requirements for 12 southeastern soil series. *Transaction of the ASAE* 32(5): 1492-1502.
  4. Buckingham, F., Thorngren, H., and B. Johannsen. (1976). *Fundamentals of Machine Operation: Tillage.* John Deere Service Publication. Moline, IL. A thorough nuts-and-bolts treatment of tillage machinery
  5. Davies, V., Finney B., and D. Eagle. (2001). *Resource Management: Soil.* Farming Press. Tonbridge, United Kingdom. One of few soil science texts that covers traction. This excellent book also covers tillage, traffic and soil damage, power requirements and other topics of interest to dirt hogs.
  6. Finner, M.F., and R.J. Straub. (1985). *Farm Machinery Fundamentals.* 2nd. Ed. American Publishing Company. Madison, WI. Thorough and practical discussion of all aspects of farm machinery.
  7. Harrigan, T.M. and C.A. Rotz. (1995). *Draft relationships for tillage and seeding equipment.* *Applied Engineering in Agriculture.* Vol. 11(6):773-783.
  8. Siemens, J.C. and W. Bowers. (1999). *Farm Business Management: Machinery Management.* John Deere Service Publication. Moline, IL.
-



Prepared by:

Robert Walters  
Department of Soil Science  
North Carolina State University  
101 Derieux St. CB 7619  
Raleigh, NC 27695  
[robert\\_walters@ncsu.edu](mailto:robert_walters@ncsu.edu)

Traducción de:

Jorge de Jesús Peña Camacho  
Departamento de Ingeniería  
Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira.  
[jpenameister@gmail.com](mailto:jpenameister@gmail.com)