

L. ANSCHUTZ

ELEMENTOS DE DISEÑO DEL TRACTOR
Y HERRAMIENTAS DE LABRANZA

11CA

**ELEMENTOS DE
DISEÑO DEL
TRACTOR Y
HERRAMIENTAS
DE LABRANZA**



**JOHN ASHBURNER
BRIAN SIMS**

**ELEMENTOS DE DISEÑO
DEL TRACTOR Y HERRAMIENTAS
DE LABRANZA**

**JOHN E. ASHBURNER
BRIAN G. SIMS**



**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA
AGRICULTURA
San José, Costa Rica
1984**

© John E. Ashburner y Brian G. Sims
© para esta edición, IICA, 1984

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin permiso del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Diseño de cubierta: Olman Trigueros
Levantado de texto: Zaida Sequeira, IICA

Editores de la obra: J. Escoto y Fanny De La Torre P.
Editor de la Serie: Julio Escoto B.

IICA
LME-56 Ashburner, John E.
Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza / John E. Ashburner y Brian G. Sims. — San José, Costa Rica : Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1984.

474 p. ; 22 cm — (Serie de Libros y Materiales Educativos / Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura ; no. 56).

ISBN 92-9039-058-1

1. Tractores — Diseño y Construcción. 2. Aperos de labranza — Diseño y Construcción. I. Sims, Brian G. II. Título. III. Serie.

AGRIS N20



Dewey 631.3

Serie de Libros y Materiales Educativos No. 56

Este libro fue publicado por el Centro Interamericano de Documentación e Información Agrícola —CIDIA— del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura —IICA—. La Serie de Libros y Materiales Educativos tiene como fin contribuir al desarrollo agrícola del continente americano.

CONTENIDO

	Pág.
Prólogo	vii
Agradecimientos	ix
CAPITULO 1: La resistencia del suelo	7
1.1 Generalidades (7)	
1.2 Comportamiento de un suelo solicitado (8)	
1.3 Parámetros del suelo (9)	
1.4 Parámetros del suelo/interfaz (19)	
1.5 Determinación experimental de los parámetros suelo/suelo y suelo/interfaz (24)	
CAPITULO 2: Las propiedades físicas y dinámicas del suelo	39
2.1 La composición física del suelo (39)	
2.2 Las propiedades dinámicas del suelo (47)	
2.3 La cohesión superficial (47)	
2.4 La cohesión molecular (47)	
2.5 Los límites Atterberg de plasticidad (54)	
2.6 Factores que influyen en el rango de plasticidad (56)	
2.7 La fricción interna del suelo (59)	
2.8 Los parámetros suelo/interfaz (60)	
2.9 Resistencia en la práctica, de un suelo a la cizalla (63)	
CAPITULO 3: Mecánica de suelo aplicada a las herramientas de labranza.	75
3.1 Introducción (75)	



	3.2 Modelo de falla de suelo con dientes anchos (76)	
	3.3 Falla de suelo con dientes angostos (81)	
	3.4 Efecto de un platillo horizontal (86)	
	3.5 Efecto de las herramientas sobre la estructura del suelo (87)	
	3.6 Fuerza de arrastre de las herramientas simples de labranza (89)	
	3.7 Labranza giratoria (97)	
CAPITULO 4:	Diseño y selección de herramientas para las operaciones básicas de labranza	111
	4.1 Introducción	
	4.2 Operaciones básicas en la labranza del suelo (113)	
	4.3 Objetivos de las operaciones básicas y la influencia de la consistencia del suelo (113)	
	4.4 Consideraciones en el diseño y selección de las herramientas apropiadas para las operaciones básicas (122)	
	4.5 Herramientas para provocar el estallamiento (122)	
	4.6 Métodos para ocasionar la compactación (130)	
	4.7 Herramientas para la desintegración del suelo (141)	
	4.8 Métodos para efectuar un corte del suelo (145)	
	4.9 Herramientas para la inversión del suelo (154)	
	4.10 Herramientas para la mezcla e incorporación del suelo (165)	
	4.11 Métodos para efectuar un movimiento del suelo (165)	
	4.12 Herramientas para el emparejamiento del suelo (178)	
	4.13 Una herramienta para el anclaje (178)	
CAPITULO 5:	Principios y métodos de operación del suelo: su importancia en el desarrollo del cultivo.	189

	5.1	Introducción (189)	
	5.2	Características físicas del suelo que influyen en el buen desarrollo del cultivo (189)	
	5.3	Función de labranza del suelo en la provisión de los requerimientos físicos del cultivo (205)	
	5.4	Sistemas para preparar el suelo (210)	
	5.5	Métodos para reducir el número de labores del suelo. Labranza reducida (214)	
	5.6	Cero labranza y siembra directa (223)	
	5.7	La economía de labranza reducida y la cero labranza (227)	
CAPITULO 6:		Mecánica del tractor	233
	6.1	Trabajo del tractor en superficie plana (233)	
	6.2	Determinación experimental del centro de gravedad del tractor (240)	
	6.3	Análisis del trabajo del tractor en una pendiente (247)	
	6.4	Estructuras de protección contra los rodamientos (259)	
CAPITULO 7:		Comportamiento del tractor con las herramientas de labranza.	265
	7.1	Sistemas de acople (265)	
	7.2	Las fuerzas en las herramientas de labranza del suelo (273)	
	7.3	Ajuste del acople para las herramientas de tiro (286)	
	7.4	Control de la herramienta por el acople de tres puntos (287)	
	7.5	Acople y estabilización de la herramienta sobre el acople de tres puntos (309)	
CAPITULO 8:		Comportamiento del tractor con otras herramientas agrícolas.	317
	8.1	El acople de remolques al tractor agrícola (317)	
	8.2	Acople para transferir peso a las herramientas de tiro (324)	

8.3 Sistemas para frenar la combinación del tractor-remolque (327)

8.4 Acople posterior de cultivadores giratorios (333)

8.5 Equipo posterior desplazado a un lado (337)

8.6 Acople delantero o central de las herramientas (345)

8.7 Acople múltiple (352)

CAPITULO 9:	La teoría de tracción y los sistemas de rodaje	355
	9.1 La tracción desarrollada bajo los neumáticos y las orugas (355)	
	9.2 La resistencia al rodado (360)	
	9.3 El patinaje y la tracción (367)	
	9.4 Las características y la selección de las llantas para los tractores agrícolas (377)	
	9.5 Mejoras de tracción por medio de contrapesos y lastre de agua (385)	
	9.6 Selección de otros sistemas de rodaje (387)	
	9.7 Equipo accesorio de apoyo a la tracción (394)	
	Anexo 1. Carga y presión de inflado de las llantas para uso agrícola (407)	
	Anexo 2. Requerimiento de fuerza, energía y potencia de las herramientas (411)	
	Anexo 3. Velocidad de trabajo y eficiencia de campo para varias herramientas (Datos de Estados Unidos) (415)	
	Anexo 4. Guía aproximada de vida útil de la maquinaria agrícola relacionada con el uso anual para Gran Bretaña (417)	
	Anexo 5. Estimación del costo anual de respuestos y reparación como porcentaje del costo inicial de acuerdo con las horas de uso (cifras de Gran Bretaña) (418)	
	Anexo 6. Método simple para la conversión de unidades (419)	
	Anexo 7. Unidades métricas y sus conversiones (El Sistema Internacional) (421)	

- CAPITULO 10: Comportamiento del tractor en el campo 423**
- 10.1 La potencia del tractor (423)**
 - 10.2 La eficiencia del tractor en el campo (435)**
 - 10.3 Ejemplos de cálculo de la eficiencia del tractor en el campo (442)**
 - 10.4 El requerimiento de potencia de las herramientas (450)**
 - 10.5 La selección y el rendimiento de los tractores y sus herramientas (452)**
 - 10.6 Los costos de operación (454)**

PROLOGO

Existen pocos textos en español, dirigidos al Ingeniero Agrónomo o Mecánico, que estudien los conceptos de mecanización e ingeniería agrícola. De allí que el objetivo de este libro sea presentar algunos elementos básicos de ingeniería del suelo y demostrar su aplicación al análisis del comportamiento del tractor y sus herramientas de labranza. De esta manera se alcanza un mejor entendimiento de sus funciones y se forma una base para el diseño y selección apropiados del equipo en las distintas labores del campo agrícola. Se espera, por tanto, que este libro pueda servir como guía para los cursos universitarios y para la capacitación de postgrado en la rama de ingeniería agrícola en América Latina.

*La orientación del texto sigue el método de enseñanza desarrollado en el **National College of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, Inglaterra**, especialmente en los cursos de **Gordon Spoor** y **Frank Inns**. Originalmente fue escrito para un curso en la **Universidad de Chile**, en colaboración con los Ingenieros **Sergio Mege, Juan González, Ricardo Birkner, Alberto Castro** y **Gwyn Williams**; recientemente fue revisado y adaptado para cursos universitarios en el Ecuador, acompañado con una serie de prácticas en el laboratorio y campo para mostrar los conceptos formulados.*

Finalmente ha sido actualizado y completamente reescrito para la presente publicación, añadiendo un capítulo sobre estudio de costos y eficiencia de la maquinaria agrícola en el campo. Así, se espera haber rendido un servicio de beneficio para los estudiantes, instructores e investigadores agrícolas de América Latina con quienes hemos tenido el gusto de trabajar conjuntamente durante los últimos ocho años.

*John Ashburner. Saida, Argelia
Brian Sims. Veracruz, México*

AGRADECIMIENTOS

La preparación de este texto no habría sido posible sin el apoyo ofrecido por muchas personas, con quienes quedan sinceramente agradecidos los autores. En primer lugar se reconoce la autorización para el uso del siguiente material protegido por la propiedad literaria:

- AVI Publishing Co., P.O.Box 831, Westport, Conn. 06880, USA. (Kepner R. A, Bainer R, Barger, E.L. **Principles of farm machinery**, 3rd. edition. 1978). Anexos 2 y 3.
- Batsford Academic and Educational Ltd., 4 Fitzhardinge St, London W1H OAH, England. (Withers B, Vipond, S. **Irrigation, design and practice**, 1st. edition. 1974). Figs. 124 y 125.
- Dunlop Ltd., London. (Inns F M, Kilgour, J. **Agricultural tyres**, 1st. edition. 1978). Fig. 225.
- Granada Publishing Ltd., P.O. Box 9, Frogmore, St Albans, Herts, England. (Culpin, C. **Profitable farm mechanization**, 3rd. edition. 1975). Anexos 4 y 5.
- The Institution of Agricultural Engineers, West End Lane, Silsoe, Bedford, England. (**Data manual**, 1979). Anexo 1.
- Deere and Co., John Deere Rd., Moline, Ill. 61265, USA (**Product Information Manual**). Figs. 182 y 185.
- The Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London, England. (**Getting down to drainage**. No. 11 **Mole drainage**. 1971). Fig. 70.

Asimismo, se agradece la donación de material ilustrativo proveniente de las siguientes fuentes:

- Agricultural Press Ltd., Surrey House, 1, Throwley Way, Sutton, Surrey SM1 4QQ, England. Figs. 65 y 208.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Apartado 6713, Cali, Colombia. Fig. 84.
- Colchester Tillage Ltd., Hythe Hill, Colchester, Essex CO12NL, England. Fig. 135.
- John Deere Ltd., Langar, Nottingham, England. Fig. 136.
- Deere and Co., John Deere Rd., Moline, Ill. 61265, USA. Figs. 163(a), y, 164(b).
- Ferranti Engineering Ltd., Agricultural Division, Victoria Rd, Great Sankey, Warrington, WA5 2ST, England. Fig. 163(b).
- Geest Overseas Mechanisation Ltd., West Marsh Rd, Spalding, Lincs, PE11 2BD, England. Fig. 91.
- Hestair Farm Equipment Ltd., Godington Way, Ashford, Kent TN23 1PB, England. Figs. 227(a), y, 235.
- Howard Rotavator Ltd., Harleston, Norfolk IP20 9DP, England. Figs. 58 y 140.
- Dr Loyd Johnson, INIAP, Apartado 340, Quito, Ecuador. Figs. 54, 59, 68 y 237.
- James Jones and Sons Ltd., Service Division, P.O. Box 35, Larbert, Stirlingshire, Scotland. Figs. 117, 232 y 233.
- Sr. Phil Laxton, Minga Ltda., Apartado 6421 CCI, Quito, Ecuador. Fig. 231(b).
- Lely Import Ltd., Station Rd., St Neots, Huntingdon Cambs PE19 1QH, England. Fig. 55.

- Massey Ferguson Training Centre, Stareton, Nr. Kenilworth, Warwickshire CV8 2LJ, England. Figs. 191(a), y 192.
- F. W. McConnel Ltd., Temeside Works, Ludlow, Shropshire, SY8 1JL, England. Fig. 53.
- The National College of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, MK45 4DT, England. Figs. 9(b), 16(b) y 18(b).
- The National Institute of Agricultural Engineering, Wrest Park, Silsoe, Bedford, MK45 4HS, England. Figs. 18(a), 52, 144, 146, 156, 201(a), 209(b), 223(c), 238 y 239.
- The National Tillage Machinery Laboratory, Auburn, Alabama 36830, USA. Figs. 36 y 37.
- F.W. Pettit Division, Geest Industrial Group Ltd., Moulton, Spalding, Lincolnshire PE12 6QP, England. Figs. 188, 189, 190 y 196.
- The Harold Poole Group Ltd., 8 David Place, St. Helier, Jersey, Channel Islands. Fig. 193.
- Rabewerk, D-4515 Bad Essen 1, Germany. Fig. 38.
- Ransomes Sims and Jefferies Ltd., Nacton Works, Ipswich, IP3 9QG, England. Figs. 94 y 252.
- Richardson Mfg. Co. Inc., Box 5, Cawker City, Kansas 67430, USA. Figs. 137 y 138.
- The Scottish Institute of Agricultural Engineering, Bush Estate, Penicuik, Midlothian, Scotland. Figs. 88 y 100.
- Soil Mover Mfg. Div., of Automatic Equipment Mfg. Co, P.O. Box 667, Columbus, Nebr. 68601, USA. Fig. 112.

- F.A. Standen and Sons (Engineering) Ltd., Hereford Works, Station Rd., Ely Cambs CB7 4BP, England. Fig. 207.
- Towner Mfg. Co., P.O. Box 6450, Santa Ana, California 92706, USA. Figs. 113, 114 y 173(d).
- Vicon Ltd., P.O. Box 10, Lovetofts Drive, Ipswich, Suffolk, IP1 5NS, England. Figs. 62 y 72.
- R.P. Wainwright, NIAE, Wrest Park, Silsoe, Bedford MK45 4HS, England. Fig. 234.
- Ponce Yepes Cia., de Comercio Ltda., Quito, Ecuador. Figs. 64, 89(b), 106, 111, 133, 158, 201(a), y, 228.

Se agradece especialmente al Sr. Hernán Mejía, del Departamento de Comunicaciones del INIAP, Quito, Ecuador, la preparación de todos los dibujos; al Sr. Guillermo Torres, quien reveló varias de las fotografías, y a la Sra. Cristina Morales de Arboleda por la preparación de los títulos en las ilustraciones. Finalmente, quedan agradecidos los servicios taquígraficos donados por las Sritas. Mónica Albán, Mónica Carrera, Gladys Espinosa y la Sra. Patricia San Martín de Ashburner.

Los autores piden disculpas por no poder mencionar a todas las demás personas que, de una forma u otra, respaldaron la preparación de este texto.

J.E. Ashburner. Saida, Argelia
B.G. Sims. Veracruz, México



LA RESISTENCIA DEL SUELO

1.1 GENERALIDADES

La resistencia de un suelo a la deformación por compresión o deformación por cizalla, está determinada por su resistencia mecánica, la que consiste de dos componentes: resistencia cohesiva y resistencia friccional. Los valores varían considerablemente y dependen del contenido de humedad, tamaño de las partículas, tamaño y forma de los agregados y el grado de consolidación. Estos factores, entre otros, existen en tantas combinaciones diferentes que sólo la medición directa de los componentes de cohesión y fricción pueden permitir predecir la resistencia verdadera de un suelo en una condición determinada.

Los suelos tienen los estados físicos definidos como sólido o cementado, sólido elástico o friable, plástico, y líquido viscoso. El estado físico de un suelo también depende de los factores arriba citados, pero en el caso de un suelo específico el factor de humedad es el más importante.

Un suelo en estado cementado presenta una elevada resistencia a la deformación y se caracteriza por su muy poca deformación elástica antes que ocurra una desintegración de su estructura. En cambio el estado friable demuestra un rango de elasticidad mucho mayor, en la cual la deformación es proporcional a la carga aplicada, y se recupera rápidamente al remover la carga. El estado plástico se caracteriza porque la masa del suelo se sigue deformando lentamente bajo la acción de la carga aplicada y no se recupera cuando ésta es removida; la magnitud de la deformación depende de la duración y de la magnitud de la carga. En el estado líquido el suelo demuestra una resistencia proporcional a la rapidez de la aplicación de la carga; el suelo tiene alta humedad y actúa como un fluido viscoso.

1.2 COMPORTAMIENTO DE UN SUELO SOLICITADO

Desde el punto de vista mecánico es conveniente definir los esfuerzos a los cuales está sujeto un suelo, en términos de la tensión, compresión y corte por una cizalla; cualquier sistema de esfuerzos complejos puede ser siempre resuelto en término de estos tres tipos.

Normalmente los suelos fallan debido a los esfuerzos de corte, ya que en el límite demuestran una alta resistencia a la compresión y difícilmente pueden ser sometidos a un esfuerzo de tensión. La falla del suelo debida a una herramienta de labranza depende de los parámetros de resistencia en la superficie de falla, que consiste de un interfaz suelo/suelo y otro normalmente de suelo/metal.

Los principales parámetros suelo/suelo son:

- a. Cohesión (c)
- b. Fricción suelo/suelo (definido en término del ángulo de fricción interna ϕ)
- c. Densidad en masa del suelo D_b (también conocido como densidad aparente).

En forma similar, los principales parámetros suelo/interfaz son los siguientes:

- a. Adhesión (c_α)
- b. Fricción suelo/interfaz (definido en término del ángulo de fricción suelo/interfaz δ).

1.3 PARAMETROS SUELO/SUELO

1.3.1 Las ecuaciones de Coulomb y Micklethwaite

La resistencia a la falla de un suelo depende del esfuerzo de corte máximo que éste pueda resistir, lo que es una función de la magnitud de la deformación y del esfuerzo normal sobre la superficie de falla. La forma de las curvas del esfuerzo de corte/deformación difiere de acuerdo al tipo de suelo (Fig. 1).

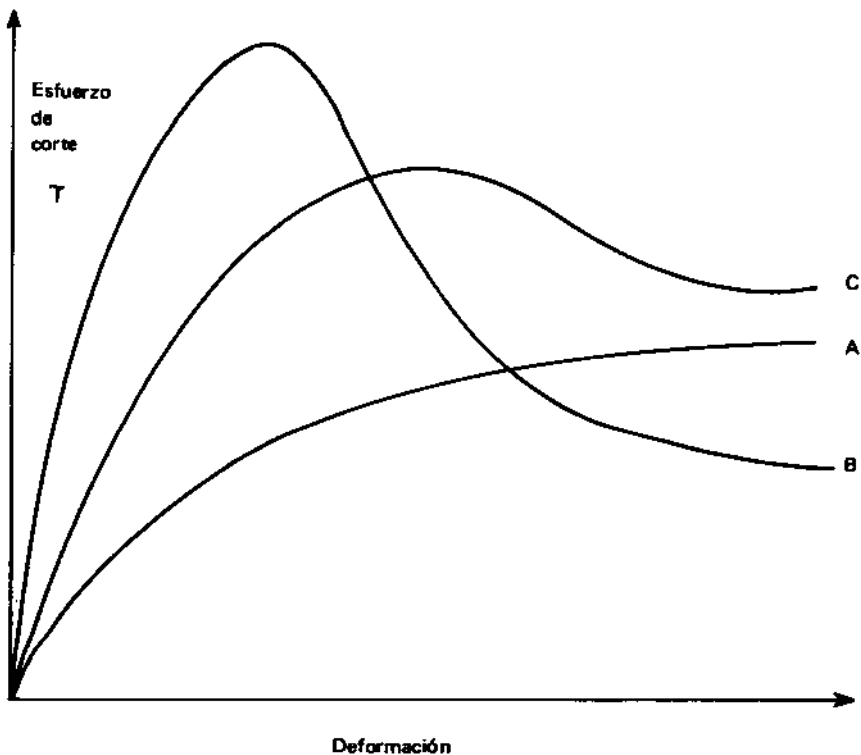


Fig. 1. Curvas de esfuerzo de corte/deformación para distintos tipos de suelo. Suelo A: arenoso seco; suelo B: arcilloso compacto seco; suelo C: franco. Se debe anotar que los valores del esfuerzo de corte también dependen del esfuerzo normal sobre la superficie de falla (véase Figs. 2 a 4).

La curva A se refiere a un suelo suelto con propiedades friccionales; por ejemplo, un suelo arenoso seco en estado suelto. La curva B es típica de un suelo sólido o cementado y coherente, por ejemplo un suelo arcilloso seco y no labrado o removido. La curva C identifica a un suelo con propiedades intermedias, por ejemplo un suelo agrícola de textura franca.

Cabe mencionar que en la mayoría de los suelos agrícolas la curva del esfuerzo de corte/deformación es como la curva C, que se eleva hasta un valor máximo equivalente a la máxima resistencia que puede desarrollar antes de fallar, y que luego desciende para estabilizarse en un valor intermedio que equivale a la resistencia residual.

En general la máxima resistencia a la deformación que puede desarrollar un suelo depende del esfuerzo normal en la superficie de falla, como se muestra en las Figs. 2 a 4.

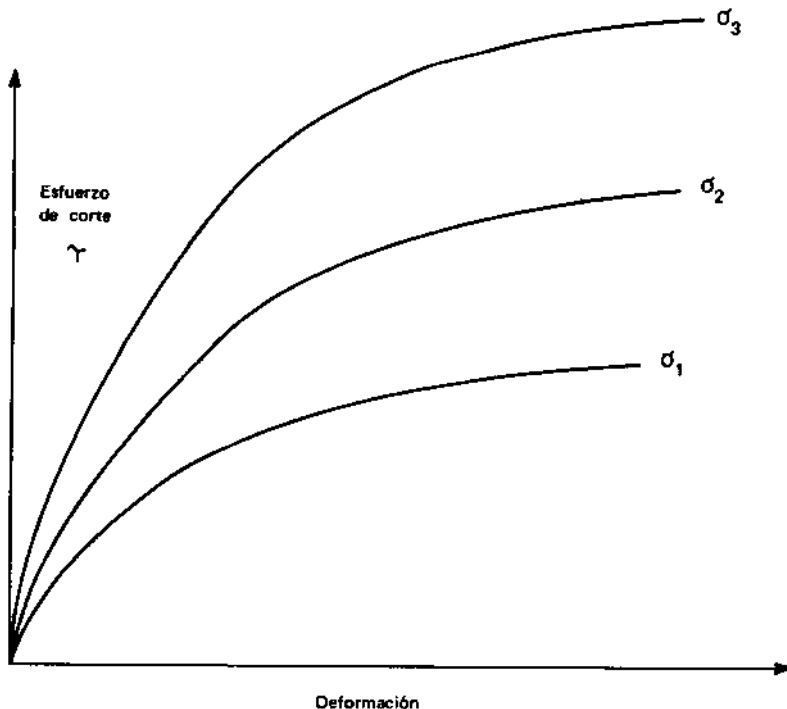


Fig. 2. Comportamiento de un suelo arenoso seco (Curva A en Fig. 1) en una prueba de cizalla con diferentes esfuerzos normales σ . Nota: $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$.

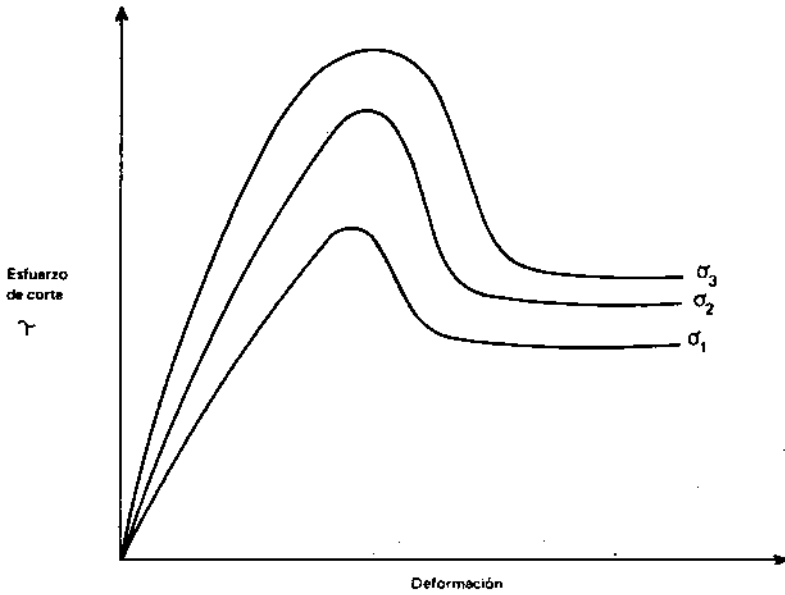


Fig. 3. Comportamiento de un suelo arcilloso compactado seco (Curva B en Fig. 1) en una prueba de cizalla con diferentes esfuerzos normales σ . Nota: $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$.

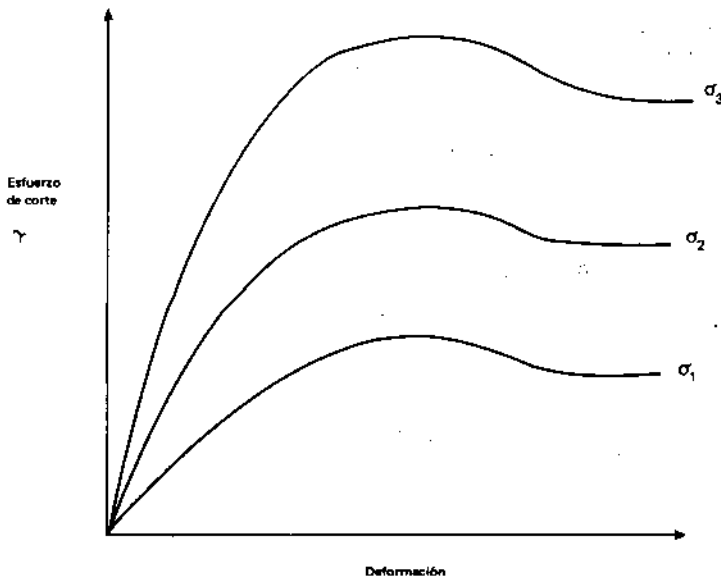


Fig. 4. Comportamiento de un suelo franco (Curva C en Fig. 1) en una prueba de cizalla con diferentes esfuerzos normales σ . Nota: $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$.

Al graficar estos valores del esfuerzo máximo de corte con los valores respectivos del esfuerzo normal se obtiene una relación que teóricamente es lineal (Fig. 5). La ecuación de la línea lleva el nombre de **Coulomb**, quien originalmente la desarrolló e indicó que la resistencia máxima al cizallar depende de los componentes de cohesión y fricción del suelo.

$$\text{Máximo esfuerzo de corte} = \frac{\text{Fuerza de corte}}{\text{Area de Superficie}} = \text{Cohesión} + \text{Fricción}$$

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

en donde

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \text{Máximo esfuerzo de corte} \\ c &= \text{Cohesión del suelo} \\ \sigma &= \text{Esfuerzo normal en la superficie de falla} \\ \phi &= \text{Angulo de fricción interna suelo/suelo} \end{aligned}$$

Para ayudar en la teoría de tracción (Cap. 9), Micklethwaite expresó la ecuación de Coulomb en términos de fuerza al multiplicarla por la superficie A:

$$\tau_{\max} A = A(c + \sigma \tan \phi)$$

Pero

$$\begin{aligned} \sigma A &= Q \\ \tau_{\max} A &= H_{\max} \end{aligned}$$

entonces

$$H_{\max} = cA + Q \tan \phi \quad (2)$$

en donde

$$\begin{aligned} H_{\max} &= \text{Fuerza de corte máxima} \\ A &= \text{Area de la superficie de falla} \\ Q &= \text{Carga normal en la superficie} \end{aligned}$$

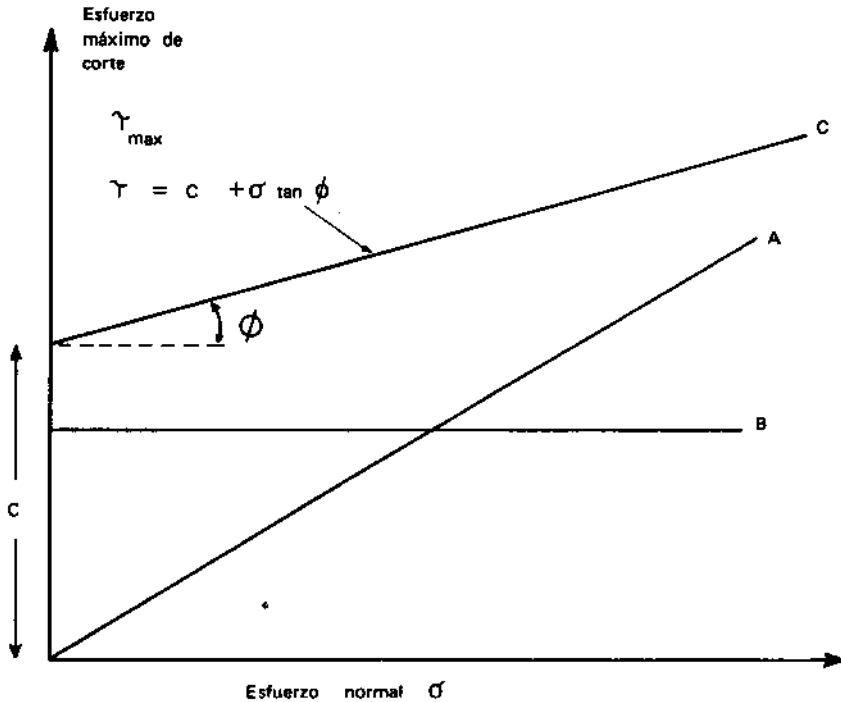


Fig. 5. Gráficos del esfuerzo máximo de corte con el esfuerzo normal sobre la superficie de falla. Las líneas siguen la ecuación de Coulomb, $\tau = C + \sigma \tan \phi$. Suelo A: arenoso seco; suelo B: arcilloso húmedo plástico; suelo C: franco húmedo.

La Fig. 5 presenta los gráficos de la ecuación de Coulomb para diferentes suelos. La línea A representa la situación de un suelo liviano seco (arenoso) que demuestra propiedades friccionales pero sin cohesión ($c = 0$); la línea B corresponde a una arcilla en estado plástico que demuestra alta cohesión pero ninguna fricción ($\phi = 0$); la línea C representa un suelo franco tanto con características friccionales como cohesivas y es muy típico de los suelos agrícolas con las condiciones en que normalmente se realizan las labores de labranza.

Es muy importante considerar además que el contenido de humedad del suelo juega un papel fundamental en las características de resistencia al cizallar. Los efectos son más marcados en las arcillas, como se muestra en la Fig. 6; las razones de esto se discuten con detalle en el Capítulo 2.

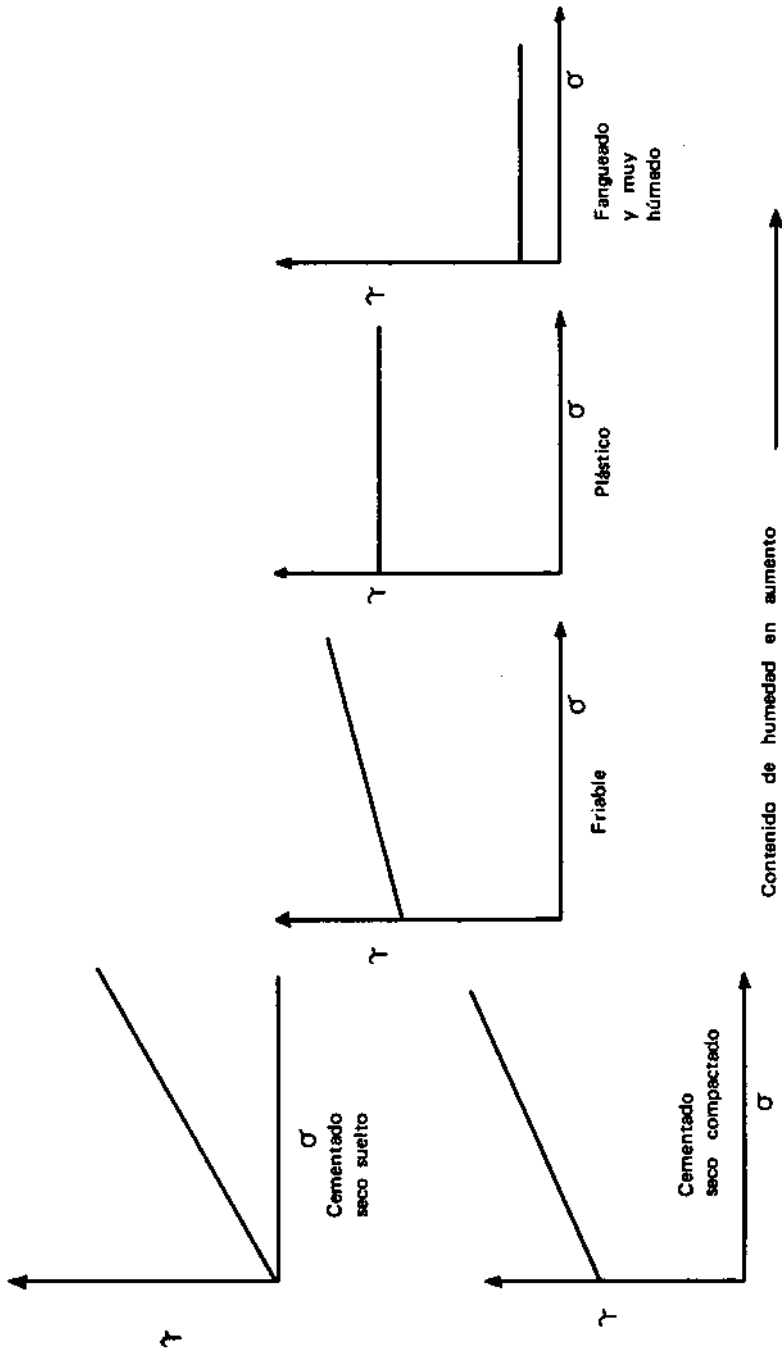


Fig. 6. Resistencia en cizalla de un suelo arcilloso de acuerdo con su contenido de humedad y grado de compactación.

Al considerar la ecuación de Micklethwaite (2) se observa que para un suelo con cierto valor de cohesión (c) y fricción (ϕ), la fuerza máxima de corte para ocasionar una falla en el suelo depende además de la superficie de contacto (A) para el componente de cohesión y de la carga normal (Q) para el componente friccional.

Así, por ejemplo, se puede ver en forma simple cómo aumentar la tracción de un tractor. En el caso de un suelo arcilloso húmedo que demuestra propiedades cohesivas pero no friccionales se debe aumentar la superficie de contacto (A) al colocar llantas más grandes o bajar la presión de inflado. No se alcanza ningún beneficio si se aumenta la carga normal (Q). En cambio para el tractor, al trabajar en un suelo arenoso o arcilloso seco removido que no tiene propiedades cohesivas, hay que aumentar la carga normal (Q) colocando, por ejemplo, contrapesos en las ruedas de mando. El uso de llantas más grandes o la reducción de la presión de inflado, que tiene como efecto aumentar el valor de la superficie de contacto (A), no origina beneficio alguno.

La ecuación (2) también demuestra que para un suelo franco con propiedades friccionales y cohesivas los aumentos de (A) y (Q) en forma similar pueden apoyar la tracción máxima (H_{\max}).

1.3.2 Cohesión, fricción y densidad del suelo

La cohesión de un suelo depende generalmente del contenido de humedad y de la cantidad y tipo de arcilla, y puede tomar dos formas:

- a. **Cohesión molecular:** a bajo contenido de humedad existe una unión fuerte entre las partículas de arcilla; este es el factor principal que influye en la resistencia de los terrones.
- b. **Cohesión superficial:** con mayor contenido de humedad existe un amarre entre los mismos terrones debido a la fuerza de la tensión superficial ocasionada por este exceso de agua; la materia orgánica y las raíces de las plantas también contribuyen a la fuerza cohesiva total cuando se cizalla la masa del suelo.

El ángulo de fricción interna es una función de la aspereza de las superficies al cizallar y del grado de enlace, o sea la compactación de

las partículas del suelo y los agregados. Este grado de compactación es una función de la densidad en masa del suelo (D_b) y entonces existe una relación entre el ángulo de fricción interna (ϕ) y esta densidad D_b , como se indica en la Fig. 7.

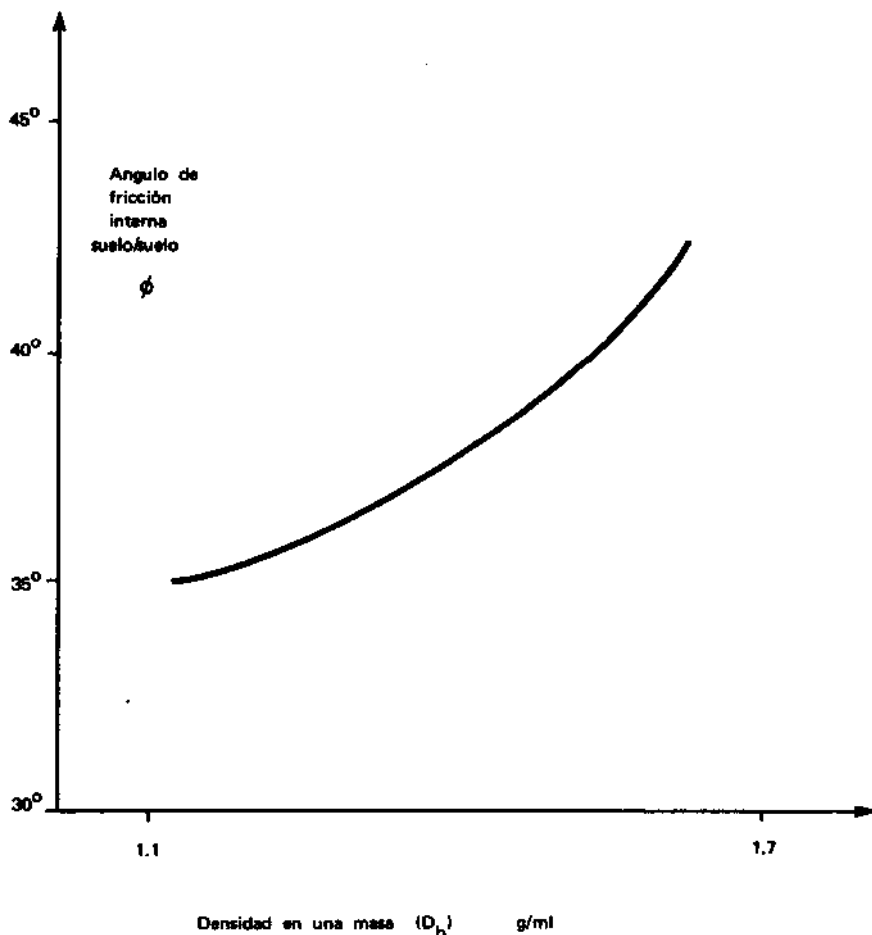


Fig. 7. El ángulo de fricción interna de un suelo franco arenoso como función de su densidad en masa o su grado de compactación⁶.

Algunos valores típicos de la cohesión y ángulo de fricción interna se presentan en el Cuadro No. 1.

CUADRO No. 1. Valores típicos de la cohesión y el ángulo de fricción interna^B.

Tipo de suelo	Tamaño típico de partículas mm	Estado	Angulo de fricción	Cohesión kN/m ²
Arena con partículas medianas	1.1	Compactado	38°–40°	0
		Suelto	32°–35°	0
Arena fina con materia orgánica	0.5–0.8	Compactado	25°–30°	0
		Suelto	18°–22°	0
Franco arenoso	0.02–0.2	Friable	24°–28°	20–25
		Plástico	24°–28°	10–15
Franco	0.01	Friable	22°–26°	25–30
		Plástico	15°–19°	15–20
Arcilloso	0.002	Friable	17°–19°	40–60
		Plástico	10°–14°	25–30

La relación esfuerzo de corte/deformación para un rango de valores del esfuerzo normal es similar para un terrón que para la masa del suelo descrito arriba en la sección 1.3.1 y las Figuras 1 a 5; lo que normalmente difiere son los valores de cohesión y fricción, el primero de los cuales se ve muy afectado por el contenido de humedad. Normalmente el objetivo de una operación de labranza del suelo es para disminuir el número y tamaño de los terrones, lo que obviamente requiere que la humedad del suelo sea tal que la resistencia de los terrones sea inferior a la resistencia de la masa del suelo.

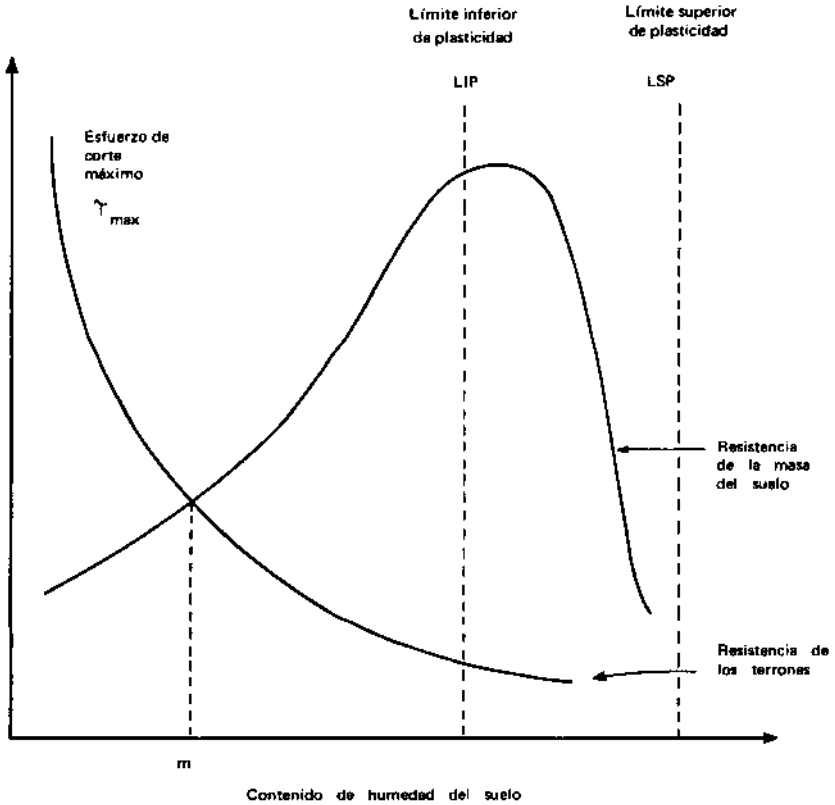


Fig. 8. Resistencia en cizalla para la masa del suelo y los terrones individuales de acuerdo con la humedad del suelo. Véase la sección 1.3.2 para la significación del contenido de humedad 'm'.

La Fig. 8 muestra la relación de la resistencia al cizallar la masa del suelo y sus terrones, de acuerdo con la humedad; se observa que con una humedad del suelo menor que el valor 'm' indicado no es posible romper los terrones con herramientas que ocasionen una falla al cizallar, como por ejemplo en el caso de los arados o cinceles, debido a que los terrones tienen una mayor resistencia que la masa del suelo.

1.4 PARAMETROS SUELO/INTERFAZ

La mayor parte de las herramientas de labranza trabaja por deslizamiento por el suelo, y de allí que el esfuerzo y la fuerza de deslizamiento en la interfaz suelo/metal sea de una importancia fundamental al estar la mayoría de estas herramientas fabricada con metales. Aunque el interfaz es normalmente suelo/metal, es mejor hablar en términos de los parámetros suelo/interfaz para acomodar la consideración de otros materiales como madera, plástico u otros.

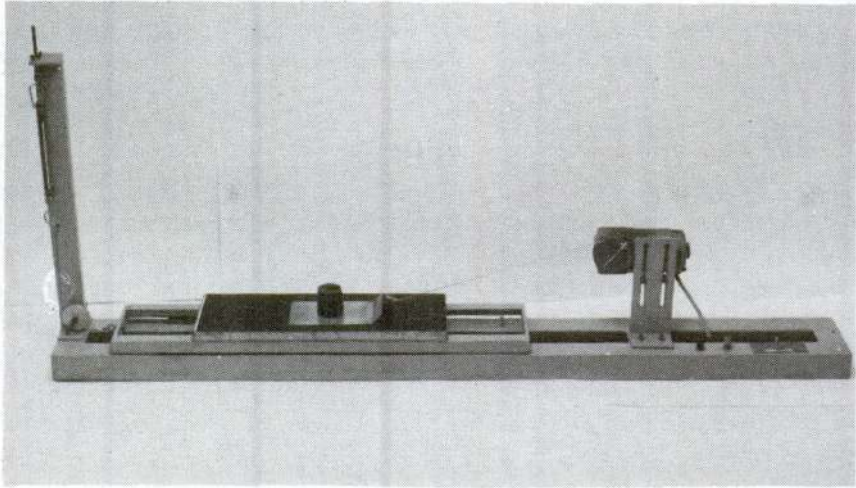
Se puede estudiar la relación suelo/interfaz por medio de un patín, como se indica en la Fig. 9, y se observa que la misma ecuación de Coulomb puede ser aplicada al gráfico que resulta (Fig. 10). Las únicas diferencias son los parámetros que en el interfaz se llaman adhesión (c_α) y el ángulo de fricción suelo/interfaz (δ).

$$\begin{aligned} \text{Esfuerzo máx. de} &= \text{Adhesión} + \text{Fricción} \\ \text{deslizamiento} & \\ (\tau'_{\max}) & \end{aligned}$$

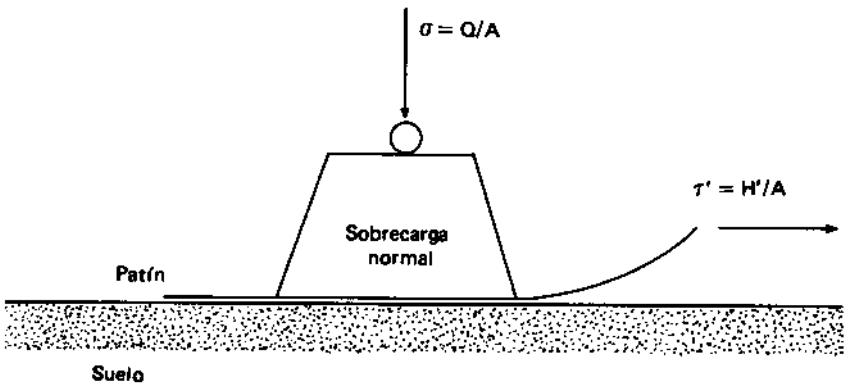
$$\tau'_{\max} = c_\alpha + \sigma \tan \delta \quad (3)$$

La adhesión representa las fuerzas de atracción que se desarrollan entre el suelo y el interfaz y que tienden a evitar el deslizamiento entre ellos; el valor de la adhesión es normalmente pequeño, excepto para los suelos arcillosos en estado plástico.

La fricción representa la fuerza de rozamiento en el interfaz y depende del grado de pulido de su materia y de la rugosidad de las partículas del suelo. También puede ser afectada por cualquier lubricación que ocurra por un exceso de humedad en el suelo o por otras razones (ver Cap. 2).



(a)



(b)

Fig. 9. Un aparato para medir el esfuerzo de deslizamiento de un patín de superficie de contacto A con sobrecarga Q . La fuerza de resistencia es H' . Véase también Fig. 10.

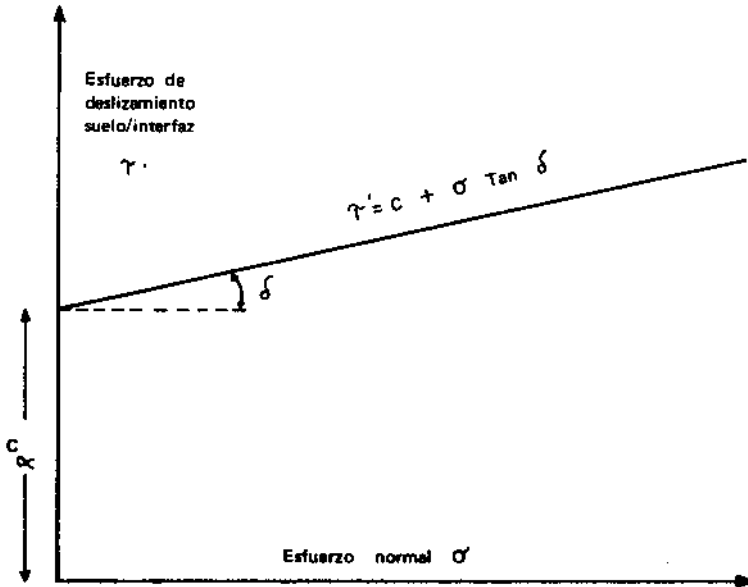


Fig. 10. Esfuerzo de deslizamiento suelo/interfaz de acuerdo con el esfuerzo normal (véase Fig. 9). La línea sigue la ecuación de Coulomb.

Algunos valores típicos de la adhesión y la fricción suelo/metal aparecen en el Cuadro No. 2.

CUADRO No. 2. Valores típicos de la adhesión y el ángulo de fricción suelo/metal.

Adhesión c_α	Angulo de fricción suelo/metal
Insignificante en la mayoría de los casos	Superficie pulida 5°
Arcillas plásticas con alta humedad $10-30 \text{ kN/m}^2$	Superficie limpia 5° a 15°
	Superficie oxidada 15° a 25°

El esfuerzo de deslizamiento (τ') varía con el contenido de humedad del suelo, alcanzando los efectos más marcados en el caso de los suelos arcillosos.

La Fig. 11 muestra la relación típica para una arcilla; este mismo gráfico puede ser superpuesto a la Fig. 8, como se indica en la Fig. 12.

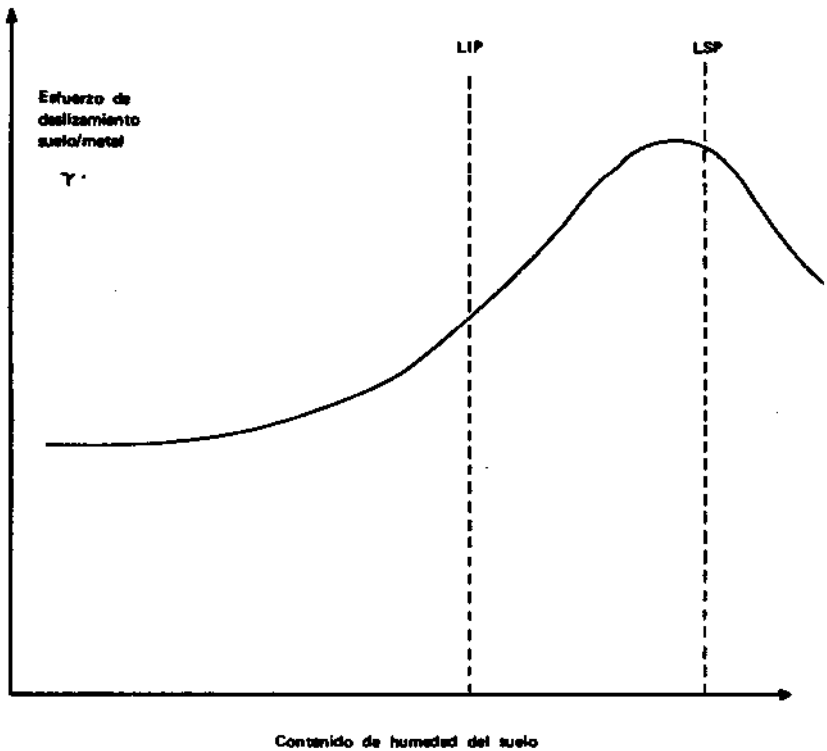


Fig. 11. Esfuerzo de deslizamiento suelo/metal de acuerdo con el contenido de humedad de un suelo arcilloso.

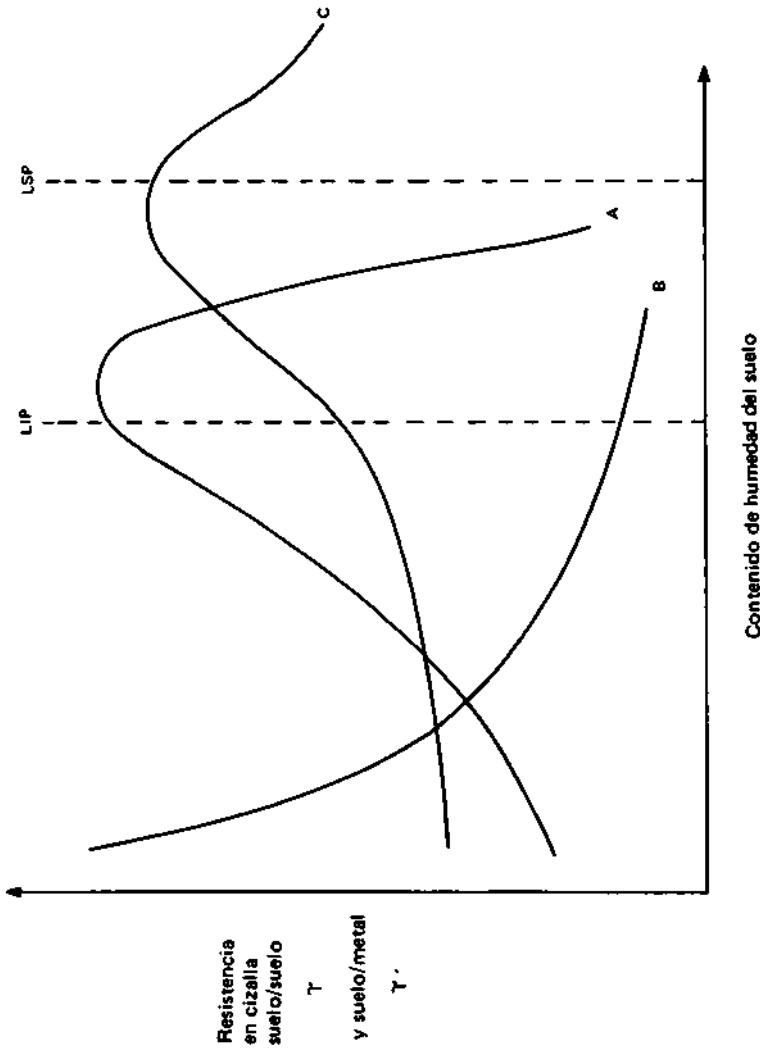


Fig. 12. Resistencia en cizalla para la masa del suelo (A), los terrones (B) y en deslizamiento suelo/metal (C).

A pesar de la observación indicada en la sección 1.3.2, de que con poca humedad no se puede romper los terrones, se observa que también existen problemas en los suelos de alta humedad debido a que el esfuerzo de deslizamiento es muy elevado. Estas limitaciones de las condiciones del campo al realizar una labranza del suelo es el tema principal de los siguientes capítulos.

1.5 DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS SUELO/SUELO Y SUELO/INTERFAZ

1.5.1 Generalidades

Los ingenieros de suelo han desarrollado varias pruebas de laboratorio y de campo para analizar el comportamiento de un suelo o roca bajo la acción de un sistema de fuerzas, como existe por ejemplo durante la construcción de un edificio, carretera, represa u otros. Aunque muchas de estas pruebas sirven al ingeniero agrícola, también se requieren otras especiales dado el mayor interés en el comportamiento del suelo superficial y no tanto del subsuelo. Otra diferencia significativa es que las herramientas de labranza normalmente tienen la tarea de romper el suelo, lo que determina una mayor importancia de los parámetros suelo/interfaz.

Se incluye en adelante un resumen de algunas de las pruebas principales comúnmente empleadas para caracterizar y analizar el comportamiento de un suelo; para una descripción más amplia se recomienda consultar los textos de mecánica y física del suelo, especialmente las referencias 1-3, 5-6, 10-13.

1.5.2 Determinación de la cohesión y ángulo de fricción interna del suelo

1.5.2.1 Caja de cizalla

Representa una de las pruebas tradicionales de mecánica de suelo. La caja de cizalla (Fig. 13) utiliza dos marcos idénticos que se superponen para constituir la caja; ésta es llenada con el suelo en estudio y se le aplica un esfuerzo normal por medio de pesos sobre la tapa. La determinación del esfuerzo de corte se realiza midiendo la fuerza máxima necesaria para desplazar el marco superior sobre su equivalente inferior.

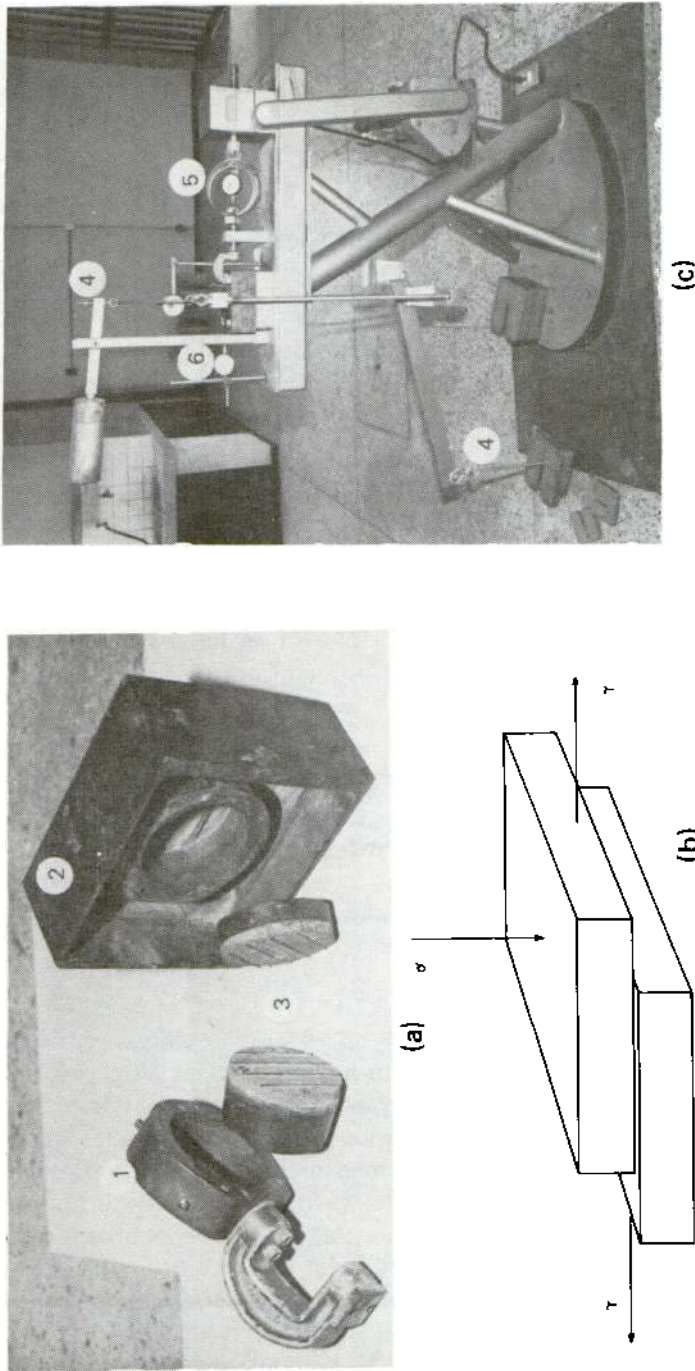


Fig. 13. El aparato de la prueba de la caja cizalla demostrando la disposición del esfuerzo de corte γ normal que actúan sobre la muestra. Se grafica el esfuerzo de corte con la deformación para alcanzar un juego de gráficos similar a las Figs. 2 a 4. La muestra se encuentra en la caja (1) y (2) entre dos platillos (3) que permiten el drenaje. La caja está montada en el aparato y la muestra está sujeta a una sobrecarga normal por medio de pesos (4). La fuerza de cizalla (5) y la deformación (6) son medidas durante la prueba.

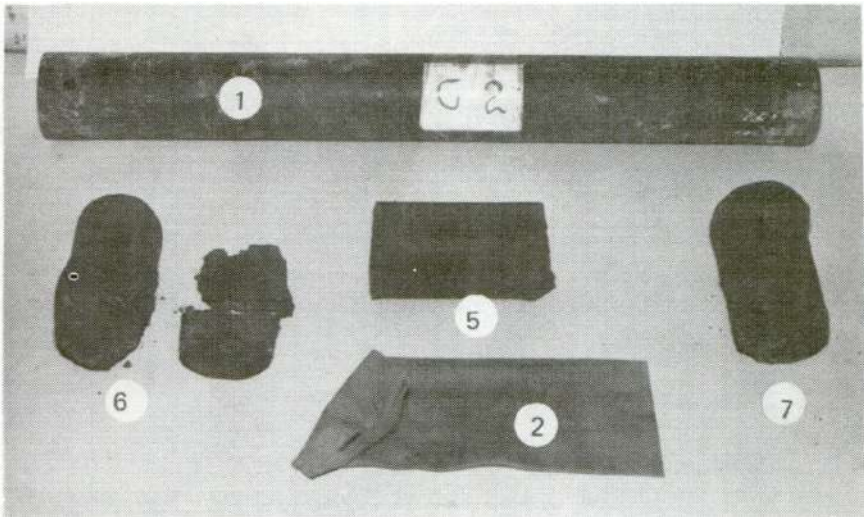
El procedimiento para determinar los parámetros es el siguiente:

- a. Se aplica un esfuerzo normal (σ) constante por medio de pesos.
- b. Se determina por medio de un dinamómetro la fuerza que se ejerce para producir la deformación del suelo, o sea el deslizamiento del marco superior.
- c. Se grafica los valores del esfuerzo de corte (τ) contra la deformación observada para determinar el máximo valor (τ_{\max}). Los gráficos son similares a la Fig. 1.
- d. Se repite la prueba para varios valores del esfuerzo normal.
- e. Finalmente se grafican los valores de τ_{\max} contra σ construyendo su mejor línea, lo que resulta en algo similar a la Fig. 5. El valor de la cohesión (c) es igual al valor del interceptado en el gráfico y el ángulo de fricción interna equivale a la pendiente de la línea.

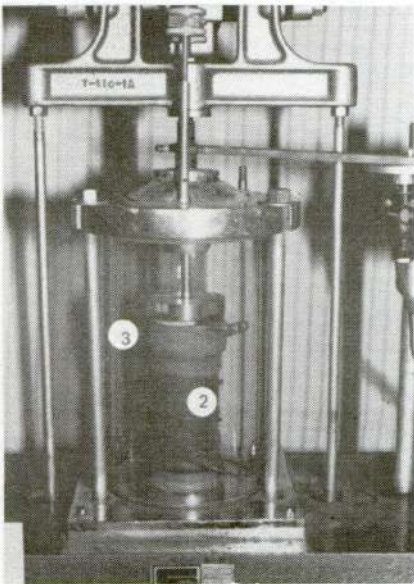
Esta prueba es útil para entender el comportamiento de un suelo pero es difícil relacionarlo directamente a la condición del campo por la dificultad para recoger muestras e introducir las en la caja en forma igual a como se las encontró en el terreno. Obviamente esto afecta los resultados, dado que se cambian el grado de compactación del suelo y la orientación de las partículas.

1.5.2.2 Prueba de compresión triaxial

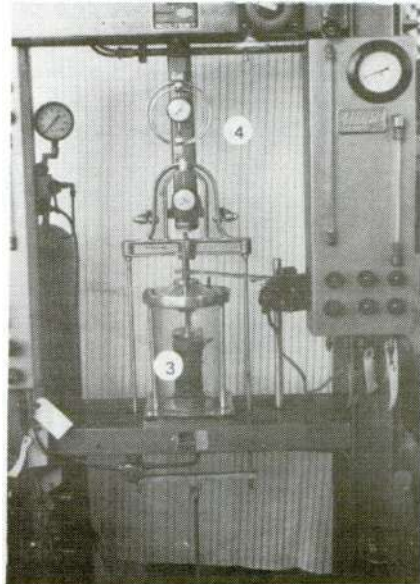
El aparato para la prueba de compresión triaxial (Fig. 14) es más sofisticado que la caja de cizalla y permite la determinación de los parámetros suelo/suelo en forma más precisa. Los detalles de la prueba se encuentran en los textos de mecánica de suelo pero básicamente consiste en poner la muestra del suelo, en forma de un cilindro, dentro de una membrana impermeable; así se puede aplicar una presión radial al comprimir el agua alrededor de la muestra. La prueba aplica una fuerza a lo largo de la muestra, midiendo la deformación hasta que ocurre una falla; el análisis de los resultados permite construir el gráfico de la Fig. 5.



(a)



(b)



(c)

Fig. 14. Sistema de prueba de suelo por el aparato de compresión triaxial. Las muestras fueron recogidas en el campo con el tubo (1) y envueltas en la membrana (2). La célula (3) está llena de agua bajo presión y la muestra sujeta a compresión por un ángulo de medición (4). La muestra (5) puede sufrir rotura (6) o deformación plástica (7).

El comportamiento de la muestra en esta prueba, y lo anterior, están afectados por el drenaje permitido del agua en exceso que trata salir de la muestra durante la deformación. Normalmente en la ingeniería agrícola hay un interés en una deformación rápida del suelo durante la labranza o al desarrollar tracción; así el suelo no tiene tiempo de drenarse y es apropiado realizar las pruebas sin drenaje.

La prueba de compresión triaxial realizada en laboratorio también sufre desventaja al recoger las muestras del campo sin removerlas, aunque se ocasiona un daño mucho menor que en recoger muestras para la caja de cizalla.

1.5.2.3 Determinación de la densidad en masa

La densidad en masa del suelo (D_b) representa la relación de la masa al volumen del suelo, incluido el espacio de los poros. La masa se determina al secar la muestra a 105°C hasta alcanzar un peso constante; el volumen es lo que ocupa la muestra en el campo.

Blake² presenta varios métodos para la determinación; lo más simple para un suelo libre de piedras consiste en la utilización de un cilindro de volumen conocido que se empuje en el suelo a la profundidad deseable para así extraer una muestra del mismo volumen. Se seca la muestra a 105°C para determinar su masa y luego la densidad en masa.

1.5.2.4 Caja de cizalla torsional

Esta caja permite la determinación de los valores de cohesión y fricción interna en el campo¹¹ y consiste de un cilindro metálico y una tapa adaptada para transmitir al cilindro el esfuerzo torsional que se aplique (Fig. 15). La tapa lleva contrapesos para proporcionar un esfuerzo normal a la superficie de falla al fondo del cilindro, lo mismo que lleva algunas protuberancias para asegurar que falle la superficie suelo/suelo en lugar de deslizar el cilindro.

Es necesario limpiar el exterior del cilindro (Fig. 15) para eliminar los efectos de la interfaz suelo/metal y realizar la determinación del torque máximo necesario para fallar el suelo. Se puede calcular el máximo esfuerzo de corte (τ_{max}) en la siguiente forma:

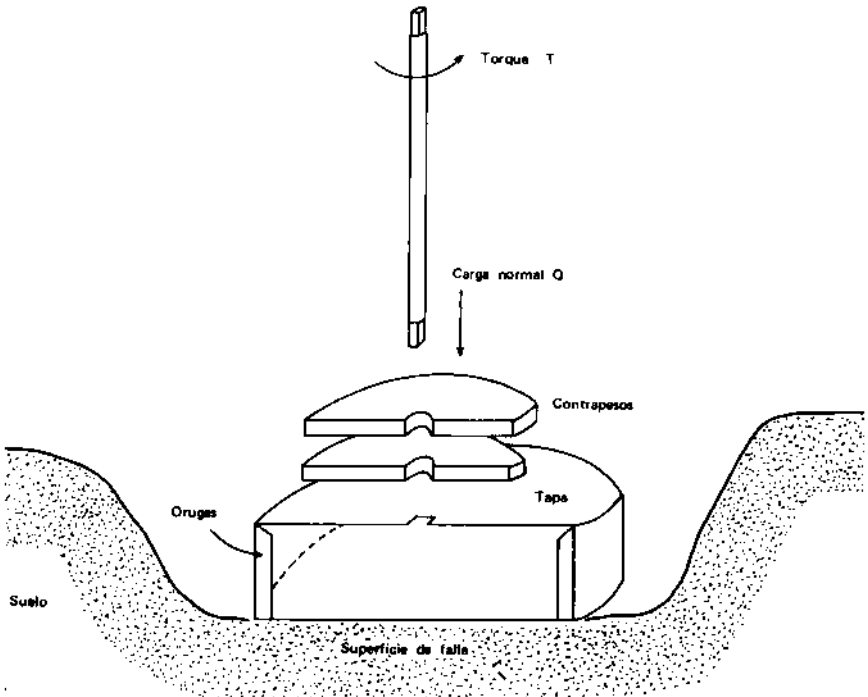


Fig. 15. Aparato para la prueba de campo con la caja de cizalla torsional. La fotografía demuestra el uso de la caja sin contrapesos para determinar la resistencia cohesiva de un suelo arcilloso (véase sección 1.5.3.1).

$$\begin{aligned}\text{Torque (T)} &= \int_0^r 2\pi r^2 \tau dr \\ &= \frac{2\pi r^3 \tau}{3}\end{aligned}$$

Entonces

$$\tau_{\max} = \frac{3T}{2\pi r^3}$$

Además

$$\sigma = \frac{Q}{\pi r^2}$$

1.5.2.5 Bevámetro

Se debe repetir la prueba por un rango de contrapesos (Q) para así graficar los resultados (Fig. 5) y determinar los valores de cohesión y fricción, como ya se indicó en la sección 1.5.2.1.

La Fig. 16 muestra otro diseño de la caja torsional, llamado Bevámetro. Puede consistir en un anillo con orugas para promover una falla suelo/suelo o alternativamente un anillo liso y metálico para la medición de los parámetros suelo/metal. La prueba es muy similar a la de la caja de cizalla torsional y se mide el torque máximo para ocasionar una falla, repitiendo la prueba por un rango de cargas normales (Q). Los cálculos se basan en las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\text{Esfuerzo de corte } (\tau_{\max}) \\ \text{o esfuerzo de deslizamiento } (\tau'_{\max}) &= \frac{3T}{2\pi(r_e^3 - r_i^3)}\end{aligned}$$

$$\text{Esfuerzo normal } (\sigma) = \frac{Q}{\pi(r_e^2 - r_i^2)}$$

En donde

r_e = radio exterior del anillo

r_i = radio interior del anillo

Los resultados se analizan en igual forma que la caja de cizalla torsional para así determinar la cohesión y fricción interna o la adhesión y fricción suelo/metal:

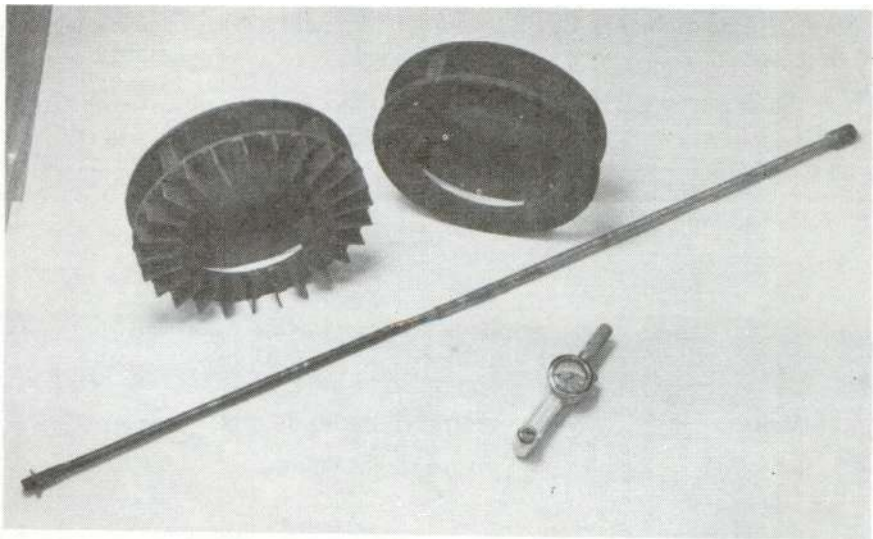
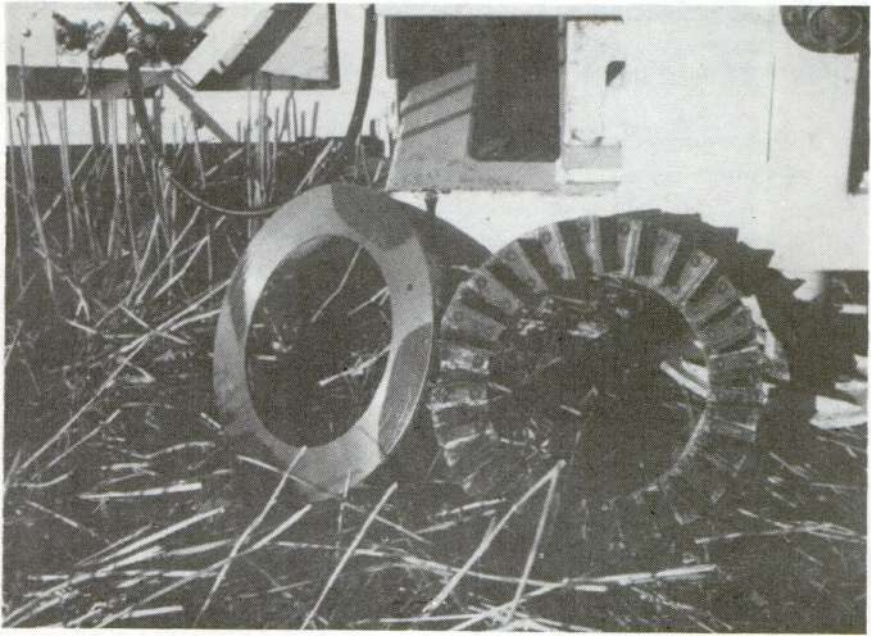


Fig. 16. Dos ámulos de un bevámetro para medir la resistencia suelo/suelo y suelo/metal.

1.5.3 Determinación de la resistencia cohesiva del suelo

1.5.3.1 Generalidades

En algunas circunstancias es conveniente tomar una medida de la resistencia cohesiva del suelo sin analizar los parámetros de cohesión y fricción. Los valores sirven como una comparación simple entre las condiciones, por ejemplo en diferentes campos, al probar herramientas de labranza o en una prueba de tracción. Para este fin se puede utilizar la caja de cizalla torsional (sección 1.5.2.4) o un Bevámetro (sección 1.5.2.5) pero sin aplicar un esfuerzo normal al suelo. Se nota en la Fig. 5 que el valor medido del esfuerzo de la resistencia en corte máximo (τ_{\max}) para un valor cero del esfuerzo normal del suelo (σ) debe indicar el valor de la cohesión (c). Por esta razón se puede realizar tal tipo de determinación en los suelos cohesivos (arcillosos), en donde la fricción interna del suelo es pequeña (Cuadro No. 1). La prueba no tiene ninguna significación para los suelos altamente friccionales.

1.5.3.2 Veleta de cizalla

La Fig. 17 muestra un aparato alternativo y bastante simple para la determinación de la resistencia en cizalla de un suelo blando y cohesivo.

Se observa que las veletas ocasionan la falla de un cilindro de suelo, por lo cual la relación entre el torque aplicado (T) y la resistencia del suelo (τ) es la siguiente:

$$T = \tau \left[\pi dh \cdot \frac{d}{2} + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \frac{d}{3} \cdot 2 \right]$$

(lados del cilindro) (tapas del cilindro)

En donde d = diámetro de las veletas

h = altura de las veletas

Esta ecuación se puede simplificar de la siguiente forma para el caso de que la altura sea el doble del diámetro de las veletas ($h = 2d$).

$$T = \frac{7}{6} \cdot \pi d^3 \tau$$

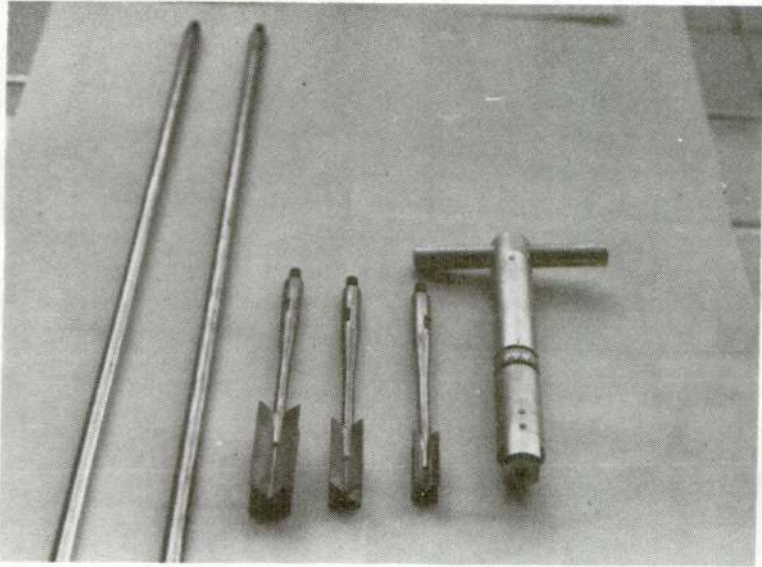


Fig. 17. Aparato para la evaluación de la resistencia cohesiva del suelo con veletas de distintos diámetros, barras de extensión y medidor de torsión.

Esta prueba se relaciona muy bien con otras más sofisticadas para los ensayos a una profundidad de entre 15 y 30 metros, pero para la ingeniería agrícola, en donde el interés principal está en los primeros 50 cm del suelo superficial, se prefiere la caja de cizalla torsional.

1.5.3.3 Penetrómetro de cono

Un aparato simple, muy popular en los Estados Unidos, para la medición de la resistencia de un suelo cohesivo es el penetrómetro de cono^{1,3} (Fig. 18). Consiste en un cono con ángulo de 30° en el punto de un eje graduado y con un medidor de la presión de la penetración. En ingeniería agrícola es normal utilizar dos tamaños de cono (de 12.83 mm ó 20.27 mm) de acuerdo con la consistencia del suelo.

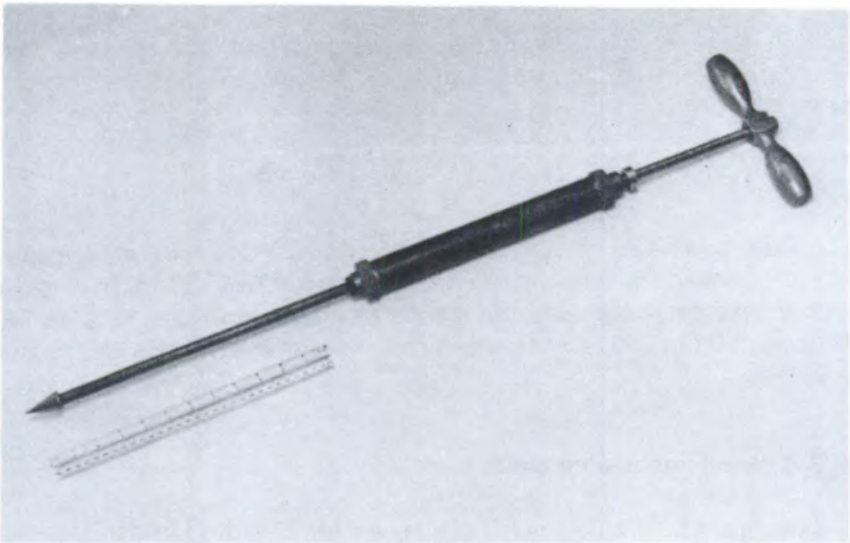


Fig. 18. Uso de un penetrómetro de cono en el campo para medir la resistencia de penetración del suelo (*National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, Inglaterra*).

BIBLIOGRAFIA

1. ASAE. Soil cone penetrometer. Standard No. 313.1 ASAE Yearbook, 1980. 265 p.
2. BLAKE, G.R. Bulk density. In BLACK, C.A., Ed. Methods of soil analysis. Part I, Chapter 30. Wisconsin, USA, American Society of Agronomy, 1965. pp. 374-390.
3. FORSYTHE, W. Manual de laboratorio — Física de suelos. San José, Costa Rica, IICA, 1975. 398 p.
4. FREITAG, D.R. A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on soft soils. Tech. Report No. 3-688 US Army Engr. Waterway Expt. Station, CE, Vicksburg, Miss. 1965.
5. ———. Penetration tests for soil measurements. Trans. ASAE. 11(6):750. 1968.
6. GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook No. 316 USDA, 1968. 551 p.
7. GODWIN, R.J., SPOOR, G. Soil factors influencing work days. The Agric. Engr. 32(4):87-90. 1977.
8. INNS, F.M; KILGOUR, J. Agricultural tyres. London. Dunlop Ltd., 1978. 64 p.
9. JOHNSON, L. Mobility equations for pneumatic tire performance in soft clay soils. Agric. Mech. in Asia, Winter 1976. pp. 38-46.
10. MULQUEEN, J., STAFFORD, J.V., TANNER, D.W. Evaluation of penetrometers for measuring soil strength. J. of Terra-mech. 14(3):137. 1977.

11. PAYNE, P.C.J., FOUNTAINE, E.R. A field method of measuring the shear strength of soils. *J. Soil Sci.* 3(1):136-144. 1952.
12. _____. A field method of measuring soil/metal friction. *J. Soil Sci.* 7(2):235-241. 1956.
13. TERZAGHI, K. *Theoretical soil mechanics*. New York, Wiley, 1947.



LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y DINÁMICAS DEL SUELO

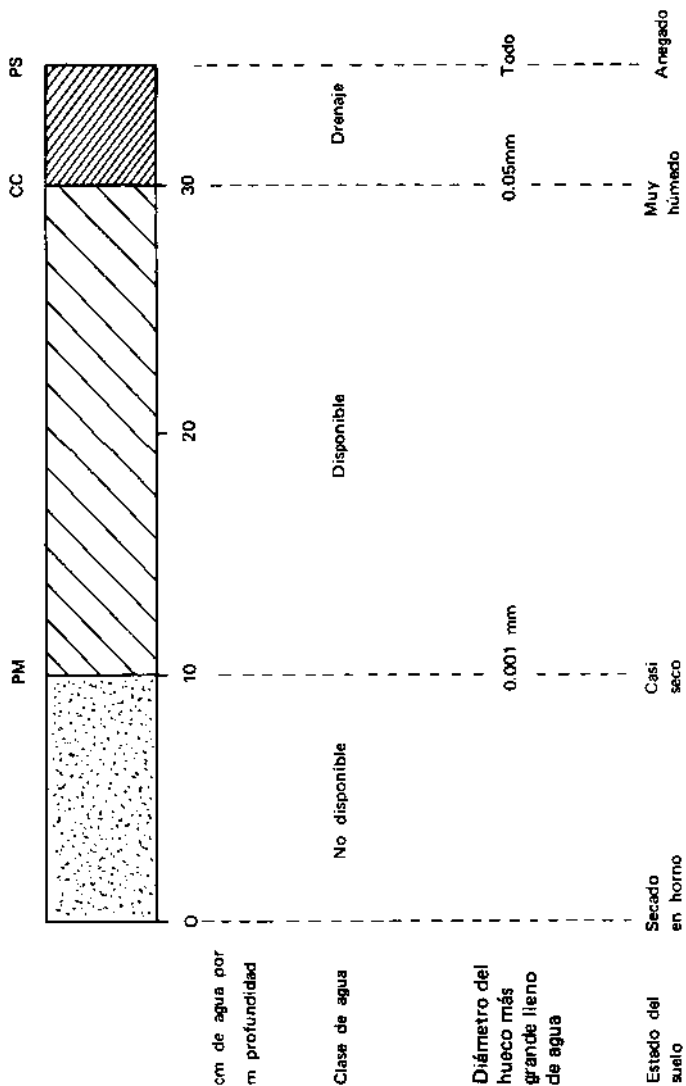
2.1 LA COMPOSICION FISICA DEL SUELO

2.1.1 El agua del suelo

La masa del suelo consiste de sólidos y huecos llenos de agua y aire; el tamaño y naturaleza de las uniones entre las partículas sólidas y la forma y tamaño de los huecos afectan la textura del suelo. La naturaleza de las partículas también afecta las uniones existentes entre ellas, y el agua en los huecos dicta si una plántula puede soltar la unión para aprovechar el agua durante su crecimiento; generalmente un mayor porcentaje de agua ayuda a soltar estas uniones pero un exceso de agua no es deseable. La Fig. 19 indica el rango de humedad típico para un suelo pesado³.

2.1.2 Definiciones del estado físico del suelo

Para facilitar la definición de términos del estado físico del suelo⁷, es conveniente representar su composición como aparece en la Fig. 20.



NOTA: PM Punto de marchitamiento permanente
 CC Capacidad de campo
 PS Punto de saturación

Fig. 19. Algunas características del agua en un suelo arcilloso.

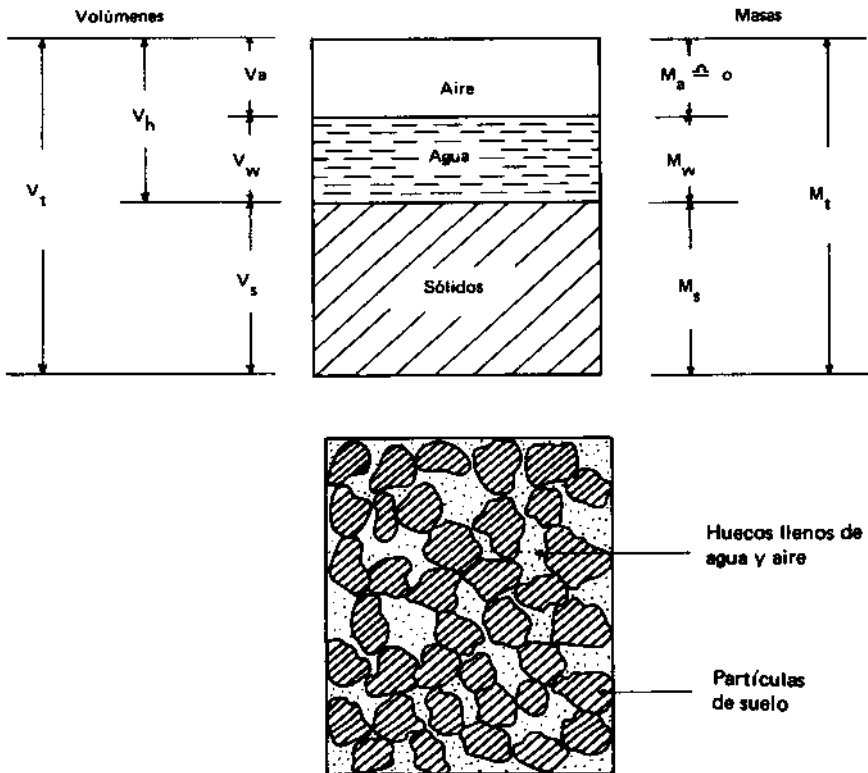


Fig. 20. Representación esquemática de la composición física del suelo, indicando los sólidos y los huecos parcialmente llenos de agua y aire.

a. Densidad de los sólidos (D_s)

(también conocido como densidad real):

$$D_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (1)$$

Normalmente el valor queda en el rango 2.6-2.7 g/cm³ para los suelos minerales, pero baja con un aumento del contenido de materia orgánica.

b. Densidad en masa (D_b)

(también conocido como densidad aparente):

$$D_b = \frac{M_s}{V_t} \quad (2)$$

Los valores para un suelo arenoso pueden ser de 1.6 g/cm³ mientras que los suelos francos y arcillosos pueden bajar a 1.1 g/cm³. La compactación del suelo aumenta los valores pero nunca alcanzan el valor de la densidad de los sólidos (D_s). Véase la sección 1.5.2.3 para su determinación experimental.

c. Densidad total en masa (húmeda) (D_t):

$$D_t = \frac{M_t}{V_t} \quad (3)$$

En la Fig. 20 se observa que este valor depende mucho del contenido de humedad de la muestra.

d. Porosidad (p):

$$p = \frac{V_h}{V_t} \quad (4)$$

Su valor está típicamente en el rango 0.3 a 0.6, que es bajo para los suelos de textura gruesa, aunque el tamaño individual de los poros es mayor que en el caso de los suelos de textura fina.

e. Relación de los huecos (e):

$$e = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{p}{1-p} \quad (5)$$

Este valor generalmente queda en el rango 0.3 a 2.0 y es un índice usado por los ingenieros civiles, mientras que los ingenieros agrícolas normalmente hablan en términos de la porosidad.

f. **Humedad (w):**

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \% \quad (6)$$

En ingeniería agrícola normalmente esto se expresa en forma gravimétrica (ecuación 6) y la determinación de M_s es por secamiento de la muestra^{4,5} en un horno a 105°C. Debe anotarse que los suelos arcillosos normalmente mantienen una cantidad apreciable de agua aún después del secamiento en el horno. Los valores para un suelo saturado pueden estar en el rango de 25 % a 60 %, mientras que con un alto contenido de materia orgánica pueden exceder el 100 %.

2.1.3 La textura del suelo

El proceso natural de la desintegración de las rocas y otros materiales produce un rango bastante amplio de tamaño de partículas de suelo, lo que afecta mucho su textura. Generalmente se utiliza dos métodos para la determinación de la distribución del tamaño, uno consistente en pasar las muestras por un juego de zarandas, y otro que involucra un proceso de sedimentación para las partículas muy finas de arcilla y limo. La forma de las partículas no es regular pero se las clasifica en término del diámetro efectivo que significa el diámetro de una esfera que, o es lo más grande que puede pasar la red de la zaranda, o que demuestra las mismas características de sedimentación.

Las distintas organizaciones internacionales y nacionales utilizan su propio sistema de clasificación, tal como se indica en la Fig. 21, y los métodos de análisis generalmente se presentan en forma gráfica, como en la Fig. 22, en la cual también se muestra algunas descripciones del suelo, de acuerdo con la clasificación de uso^{4,5,10}.

La Fig. 23 representa un triángulo de textura, de utilidad al unificar la terminología de descripción de un suelo para el cual se han determinado las fracciones de arcilla, limo y arena por medio de los métodos de tamices y sedimentación.

		Tamaño de partículas (mm)					
		0.002	0.02	0.2	2		
SICS	Arcilla		Limo	Arena fina	Arena gruesa	Cascajo	
USDA	Arcilla	0.05 0.1 0.25 0.5 1.0					
		Limo	Muy fina	Fina	Mi-Grueso diana	Muy Gruesa	Cascajo
BSI	Arcilla	Arena					
		0.006 0.02 0.06 0.2 0.6					
		Fino	Mediano	Grueso	Fina	Mediana	Gruesa
		Limo		Arena			Cascajo

NOTA: SICS Sociedad Internacional de Ciencias de Suelo USDA United States Department of Agriculture BSI British Standards Institution.

Fig. 21. Los distintos sistemas de clasificación del suelo utilizados en los Estados Unidos, Gran Bretaña y la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo.

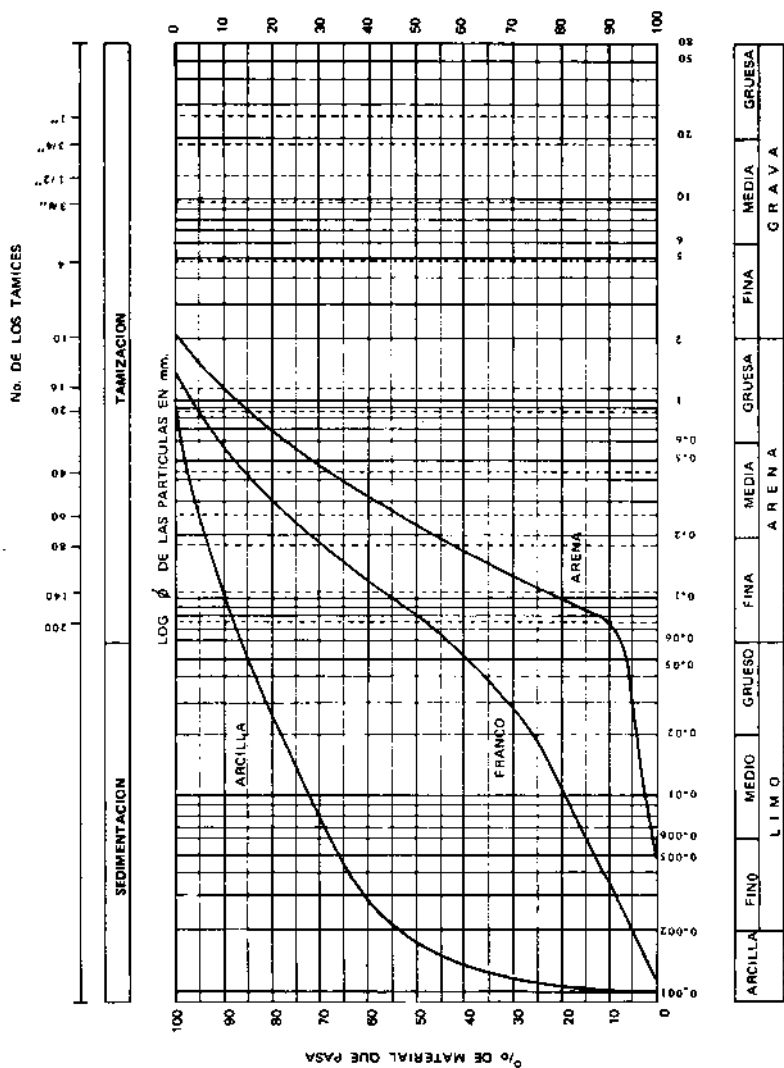


Fig. 22. Resultados típicos de granulometría de acuerdo con la clasificación del British Standards Institution.

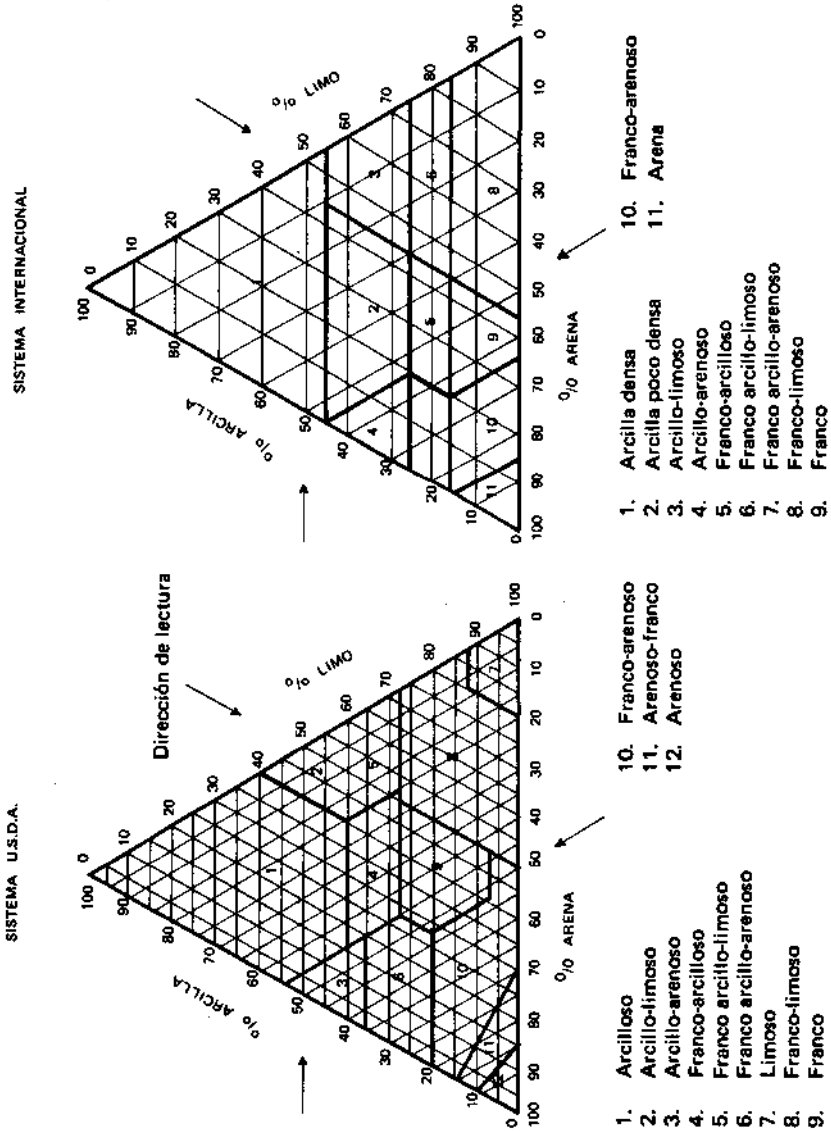


Fig. 23. Triángulos de la clasificación del suelo del USDA y la SICS.

2.2 LAS PROPIEDADES DINAMICAS DEL SUELO

En el Capítulo 1 se indicó que las propiedades de mayor interés para los estudios de labranza y tracción son los parámetros suelo/suelo y suelo/interfaz, cohesión, adhesión y fricción. Estas propiedades determinan, en su mayor parte, la resistencia del suelo y dependen principalmente de la cantidad de arcilla y del contenido de humedad del suelo (Fig. 24). Dado que este último puede cambiar rápidamente, en especial en la capa superficial, de importancia en la labranza, las propiedades están descritas como dinámicas. Se discute en adelante los mecanismos por los cuales cambian estos factores^{1,2,6,7,9,14,16}.

2.3 LA COHESION SUPERFICIAL

Las partículas pequeñas del suelo de la fracción arcillosa normalmente forman uniones fuertes entre ellas y hasta cierto punto con las partículas más grandes de la fracción limosa y arenosa; así se producen agregados e incluso terrones. La dispersión de éstos en la masa del suelo también acomoda una red de huecos llena con agua y aire. El agua se acumula en gotas por la tensión superficial, la que ejerce una atracción —llamada cohesión superficial— entre los agregados y terrones (Fig. 25); obviamente, con poca humedad su valor es bajo (Fig. 26), pero aumenta con mayor cantidad de agua mientras que se forman más gotas. Finalmente, con una humedad alta del suelo se funden las gotas disminuyendo de esta manera el número de interfaces y por consiguiente disminuye también la cohesión superficial.

2.4 LA COHESION MOLECULAR

Las partículas de arcilla poseen cargas negativas y por lo tanto atraen iones positivos. El dipolo de agua es positivo y puede formar una unión fuerte que amarra las moléculas (Fig. 27). Con poca cantidad de agua las moléculas de arcilla se acomodan en forma cercana entre ellas y permanecen unidas con gran fuerza por el agua; esto significa que la cohesión molecular es alta.

Al aumentar la cantidad de agua las moléculas de arcilla se distancian en tanto que disminuye la atracción ocasionada por el agua; así disminuye el valor de la cohesión molecular, tal como se indica en la Fig. 28, y la consistencia de la arcilla pasa por las fases de cementado, friable, plástico y líquido.

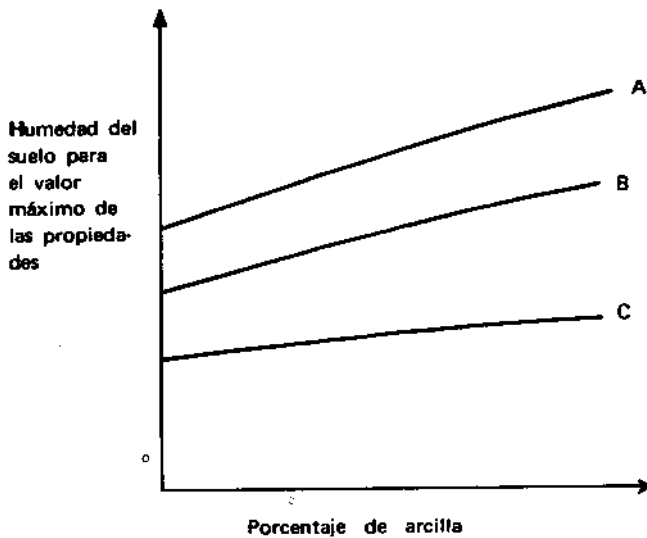
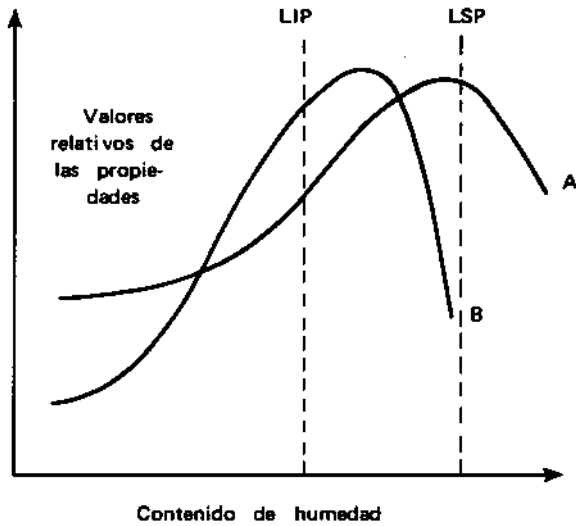


Fig. 24. Efecto del porcentaje de arcilla y del contenido de humedad del suelo sobre las propiedades dinámicas de un suelo suelto: adhesión (A), cohesión (B) y resistencia a cizalla (C).

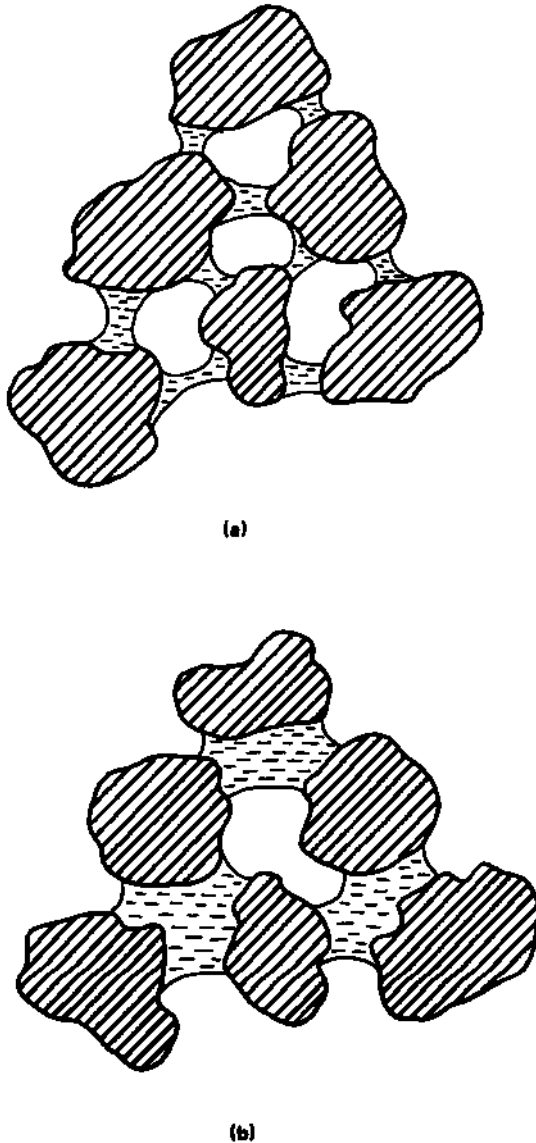


Fig. 25. Atracción entre los terrones o agregados por la tensión superficial del agua. Esta ocasiona la cohesión superficial pero el número de interfases agua/aire disminuye con mayor humedad (b), asimismo el valor de la cohesión superficial (véase Fig. 26).

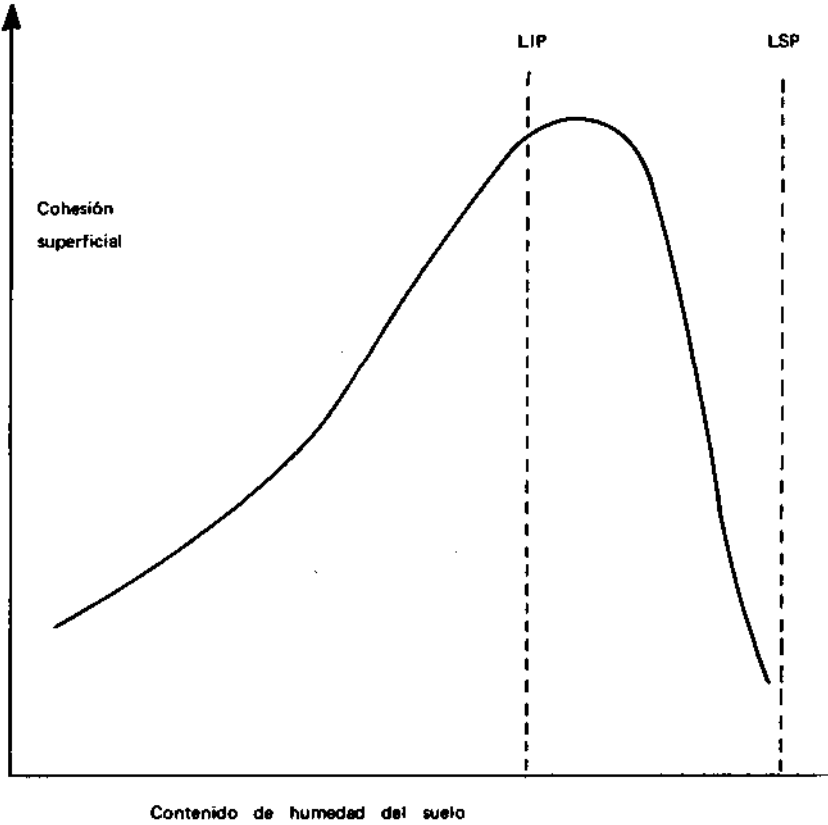


Fig. 26. Efecto de la humedad sobre la cohesión superficial de suelo.

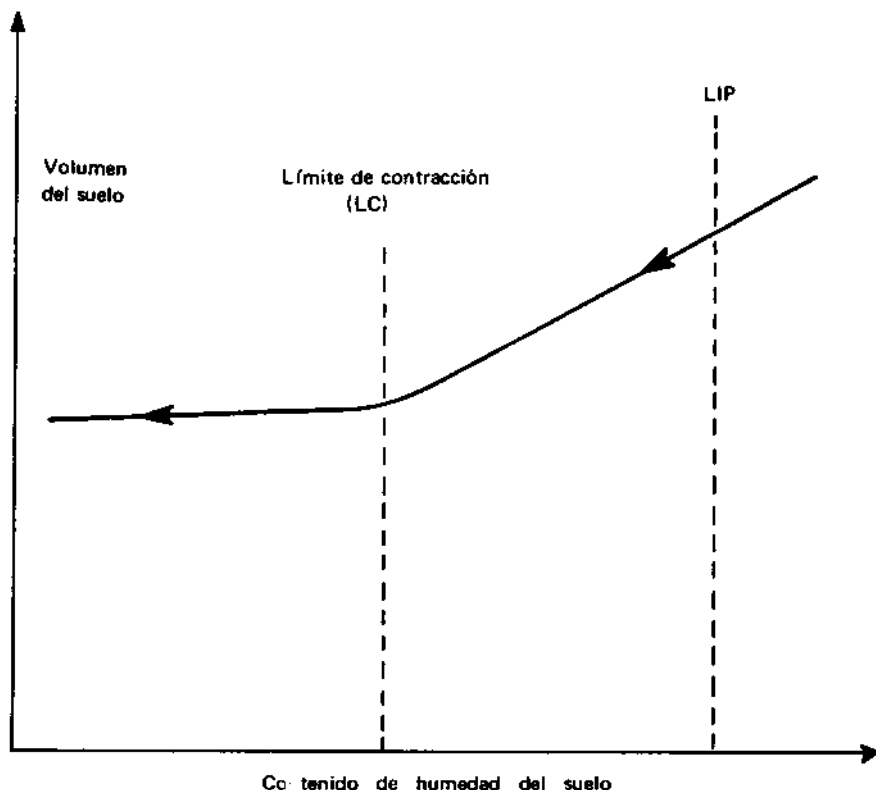


Fig. 29. El cambio de volumen de una arcilla al reducir la humedad demuestra el Límite de Contracción. (Bibliografía complementaria: Haines W.B. *The volume changes associated with variations of water content in soils*. J. Agr. Sci. 13:297-310. 1923).

Entre las consistencias de cementado y de friable se presenta un fenómeno denominado 'límite de contracción'. El término nace del hecho de que al reducir el contenido de humedad a un nivel más bajo que este límite se produce muy poca contracción, llamada 'contrac-

ción residual' (Fig. 29), y significa que el mayor número de moléculas de arcilla está prácticamente tocándose, unidas muy fuertemente por los dipolos del agua. Debe anotarse que el comportamiento de la arcilla al aumentar la humedad es distinto y no demuestra el mismo límite.

2.5 LOS LIMITES ATTERBERG DE PLASTICIDAD

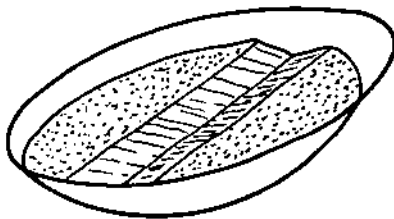
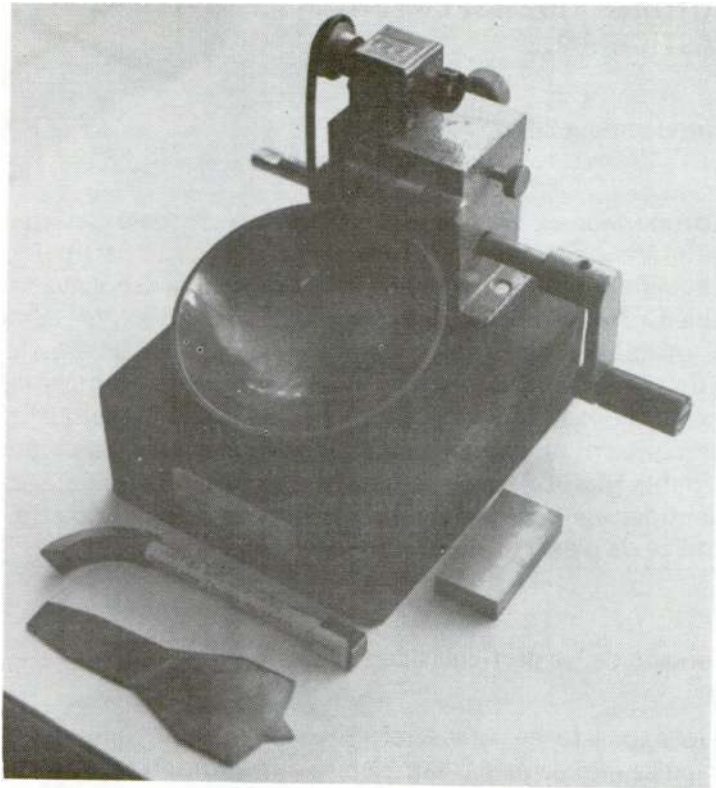
Estos límites definen los valores del porcentaje mínimo y máximo del contenido de humedad del suelo en su estado plástico. Se les denomina límites inferior y superior de plasticidad (LIP y LSP), respectivamente, y el valor de la diferencia entre ellos es el índice o número de plasticidad (IP).

Para determinar experimentalmente el límite inferior de plasticidad se mezcla el suelo seco con un poco de agua hasta que es friable y casi plástico^{1 3}. Con esa mezcla se hacen rodillos, a mano sobre una plancha de vidrio, agregando más agua hasta formar un alambre que justo se quiebre en cilindros de unos 6 a 10 mm de largo y de 3 a 4 mm de diámetro; así se evalúa el porcentaje de contenido de humedad (sección 2.1.2) que equivale al límite inferior de plasticidad (LIP).

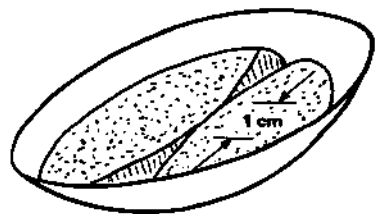
Se ha desarrollado un aparato simple que permite determinar^{1 3} el límite superior de plasticidad (Fig. 30). El suelo se mezcla con agua, en un recipiente esférico, para formar una pasta pesada en la que se corta una ranura en V, al diámetro de la muestra, con un palito especial. El aparato permite proporcionar un número de golpes uniformes al recipiente y observar cuántos son necesarios para ocasionar que la ranura se una a lo largo de un centímetro; se continúa mezclando agua a la muestra hasta que se requiera 25 golpes para cerrar la ranura. El porcentaje de humedad de la muestra es igual al límite superior de plasticidad (LSP).

El valor del índice de plasticidad (IP) se determina de la relación:

$$IP = LSP - LIP \quad (7)$$



Suelo en el platillo con ranura, puesto con el palito.



Estado del suelo unido en la ranura con un largo de 1 cm después de la prueba.

Fig. 30. El aparato de Casagrande para determinar el Límite Superior de Plasticidad (LSP).

2.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL RANGO DE PLASTICIDAD

2.6.1 Cantidad de arcilla

La proporción de partículas arcillosas en un suelo determina el grado de influencia del agua en sus propiedades. Estas partículas, aun siendo pequeñas, no solamente constituyen un número elevado sino que también ofrecen una superficie exterior mucho mayor que en el caso del mismo volumen de un suelo de partículas gruesas, como arena y lima, lo que significa que un incremento del porcentaje de arcilla no sólo aumenta los valores de la cohesión en el suelo (Fig. 24) sino que también se requiere mucho más agua para pasar por los estados friable plástico hasta líquido. Así, en términos generales, una mayor cantidad de arcilla aumenta los límites de plasticidad y también el índice de plasticidad.

2.6.2 Tamaño de las partículas de arcilla

De lo expuesto en la sección 2.6.1 se entiende que una arcilla con partículas más pequeñas también va a mostrar un aumento en los valores de los límites y en el índice de plasticidad. Este efecto se demuestra no sólo en los distintos tipos de arcilla (véase la sección 2.6.4) sino también en un solo tipo con partículas de distintos grados de tamaño.

2.6.3 Contenido de materia orgánica

La materia orgánica tiene gran afinidad con el agua, lo que produce el efecto de elevar sus límites de plasticidad; pero una vez que la hidratación se completa, el exceso del agua induce la cohesión en forma normal entre las partículas del suelo, con lo que la presencia de la materia orgánica casi no tiene efecto sobre el índice de plasticidad. En términos prácticos se observa un efecto beneficioso para la agricultura con esta elevación de los límites, dado que los suelos mantienen su friabilidad con mayor humedad pero en cambio no aumentan su rango de plasticidad.

2.6.4 Tipo de arcilla

La estructura molecular de los distintos tipos de arcilla afecta mucho su capacidad para formar uniones con los dipolos del agua; en términos generales las arcillas con mayor superficie específica pueden formar más uniones con el agua y entonces demuestran valores más elevados de los límites de Atterberg. A pesar de esta tendencia puede existir mucha variación en los valores en las distintas muestras de un tipo de arcilla.

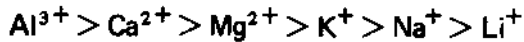
Las arcillas del grupo caolín se caracterizan por uniones fuertes dentro de la celosía cristalina, lo que no permite la entrada del agua y solamente presentan una superficie cristalina externa. La superficie específica de este grupo es muy baja, en el rango de 5 a 20 m²/g; en el Cuadro No. 3, que muestra una comparación de los valores típicos para otros tipos de arcilla, se nota que los límites de Atterberg aumentan mucho de acuerdo con la superficie específica.

CUADRO No. 3. Los límites de plasticidad y la superficie específica para distintos tipos de arcilla¹.

Tipo de arcilla	Superficie específica (m ² /g)	Valores típicos de plasticidad		
		LIP	LSP	IP
Grupo – caolín: (caolinita, dicitá, nacrita, halosita)	5–20	30	35	5
Grupo – mica hidrosa: Subgrupo – illita Subgrupo – vermiculita	100–200	25	40	15
Grupo – montmorilonita: (montmorilonita, beidelita, nontronita)	300–500 700–800	– 25	– 85	– 60

2.6.5 Tipo de los cationes intercambiables

Los cationes intercambiables son atraídos por las partículas de arcilla de una manera similar que las moléculas de agua y están sueltos al aumentar la humedad del suelo, mientras pasa por los estados friables hacia plástico y líquido. Generalmente el orden de preferencia para una reacción de intercambio es el siguiente⁷:



que también constituye una lista en orden inverso de la fuerza de unión de estos cationes.

CUADRO No. 4. Los límites de plasticidad relacionados con los cationes intercambiables para distintos tipos de arcilla¹.

Tipo de arcilla	Cation intercambiabile con que está saturado el suelo	Valores aproximados de plasticidad		
		LIP	LSP	IP
Illita	Na	25	40	15
	K	28	37	9
	H	27	39	12
	Mg	25	41	16
	Ca	25	40	15
Beidelita	Na	25	88	63
	K	27	52	25
	H	24	56	32
	Mg	25	56	31
	Ca	27	62	35
Montmorilonita	Li	60	600	540
	Na	100	700	600
	K	60	300	240
	Mg	50	160	110
	Ca	65	180	115

En términos generales es más fácil soltar la unión Al^{3+} y Ca^{2+} , en la que se requiere poca agua y donde los límites de Atterberg son bien bajos. En cambio la unión de Na^+ es muy fuerte y normalmente tiene el efecto de elevar mucho los valores de plasticidad¹, tal como se demuestra en el Cuadro No. 4. El caso de la illita es distinto, en cuanto la unión del Na^+ y K^+ es tan fuerte que no la puede soltar el agua, con lo cual no hay intercambio alguno y los valores de los límites de plasticidad permanecen deprimidos. El Ca^{2+} , por el contrario, requiere más hidratación para soltar la unión, dando valores más elevados de plasticidad.

Este comportamiento de los cationes intercambiables presenta otra ventaja al aplicar cal a cierto tipo de suelos ácidos y arcillosos al principio del invierno, para facilitar que las lluvias saturen la arcilla con Ca^{2+} , bajando el nivel de acidez y los límites de plasticidad, mejorando así su estructura.

2.7 LA FRICCIÓN INTERNA DEL SUELO

La fricción suelo/suelo depende de dos factores físicos:

- a. La naturaleza de las superficies de las partículas. Generalmente las superficies rugosas generan una fricción más alta que las lisas;
- b. el grado de compactación del suelo, que afecta el grado de enlace entre las partículas. Con los suelos compactados las partículas al principio tienen que moverse en forma perpendicular a la dirección de cizalla, ocasionando una dilatación del suelo. Este requiere una fuerza de cizalla mayor que en los suelos sueltos, en los cuales las partículas se mueven generalmente en forma paralela al plano de cizalla. Obviamente, el grado de compactación depende de la densidad en masa (D_b); ya se demostró una relación entre D_b y ϕ , el ángulo de fricción interna, en la Fig. 7 del Cap. 1.

El componente de la fricción a la fuerza de resistencia del suelo depende del esfuerzo normal en el plano de cizalla (sección 1.3.1) y tiene mayor importancia para los suelos granulares (arenosos) que para las partículas pequeñas de arcilla.

2.8 LOS PARAMETROS SUELO/INTERFAZ

2.8.1 La adhesión suelo/interfaz

La adhesión suelo/interfaz representa las fuerzas de atracción generadas principalmente por la presencia de agua en el suelo. Con un valor alto de humedad el agua muestra una succión, dentro de la estructura del suelo, que en forma similar también atrae el interfaz (Fig. 31). En cambio con poca humedad se genera una serie de interfaces de aire y agua entre el material en contacto y el suelo, lo que desarrolla una fuerza de atracción debida a la tensión superficial del agua (Fig. 31). En el caso de un material no humedecible, como politetrafluoroetileno (PTFE) y algunos otros plásticos, no se desarrolla esta tensión superficial y el valor de la adhesión es prácticamente cero.

Al aumentar la humedad de un suelo seco el efecto de la tensión superficial obviamente también se incrementa hasta alcanzar un máximo que se aproxima al valor del 'Punto de Atascamiento'.

2.8.2 La fricción suelo/interfaz

La fricción entre el suelo y el material en contacto depende mucho de la rugosidad del material; en el caso del metal, la fricción se da según el grado de pulimento de la superficie, como se observa en la Fig. 32, donde se demuestra la ventaja de eliminar la oxidación de la cara metálica para reducir el valor del ángulo de fricción suelo/metal (δ) de unos 25° hasta unos 10° a 15° . La Figura también revela la escasa utilidad de pulir el metal, por la poca reducción que provoca en el ángulo δ .

2.8.3 La resistencia al deslizamiento suelo/interfaz

En el Capítulo 1 se presentó la ecuación de Coulomb sobre la resistencia al deslizamiento (τ') suelo/interfaz (sección 1.4 y Fig. 10):

$$\tau' = c_\alpha + \sigma \tan \delta \quad (8)$$

En donde

$$\begin{aligned} c_\alpha &= \text{adhesión} \\ \sigma &= \text{esfuerzo normal} \\ \delta &= \text{ángulo de fricción suelo/interfaz} \end{aligned}$$

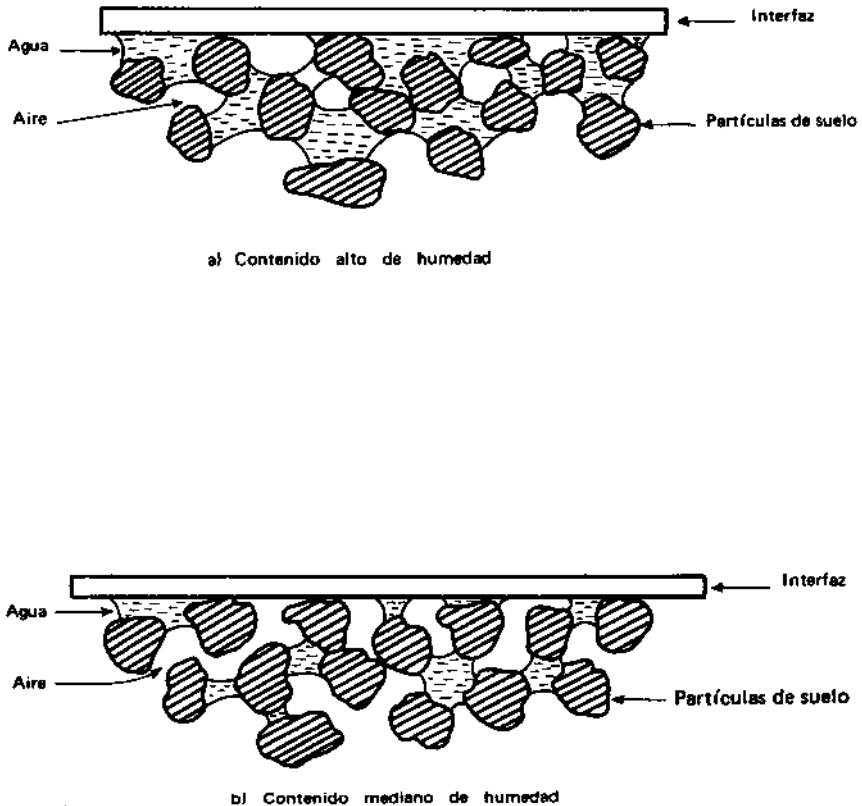


Fig. 31. Desarrollo de la adhesión suelo/interfaz a) con alto contenido de humedad en donde la adhesión se aproxima a la succión del agua del suelo; b) con mediano contenido de humedad por lo cual la adhesión se debe principalmente a la tensión superficial de las interfaces aire/agua/interfaz/suelo.

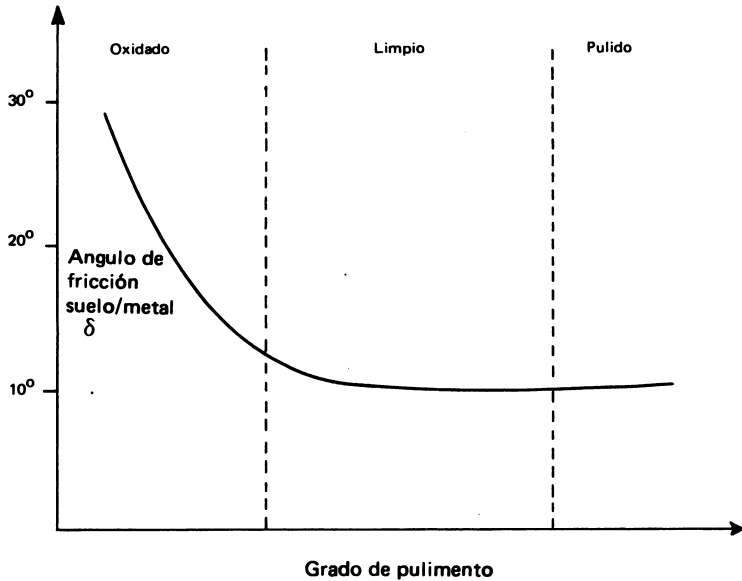


Fig. 32. Efecto del pulimento de la superficie de contacto sobre el ángulo de fricción suelo/metal.

Se indicó en la sección 2.8.1 la variación del valor de la adhesión, de acuerdo con el contenido de humedad del suelo. La Fig. 33 presenta la relación de la resistencia al deslizamiento con la humedad y se nota cuatro distintas maneras de comportamiento. El suelo en estado cementado no tiene la humedad necesaria para desarrollar adhesión y la resistencia al deslizamiento es netamente de naturaleza friccional.

En los estados friable y plástico la adhesión aumenta progresivamente por razón de las fuerzas de tensión superficial hasta llegar la resistencia a un máximo llamado 'Punto de Atascamiento'. Normalmente este punto tiene un valor de humedad un poco menor que el LSP para los suelos plásticos y un poco mayor en el caso de los suelos de poca plasticidad. La adición de más agua hace pasar el suelo al estado líquido y el exceso del agua tiene el efecto de lubricación, bajando dramáticamente la resistencia al deslizamiento.

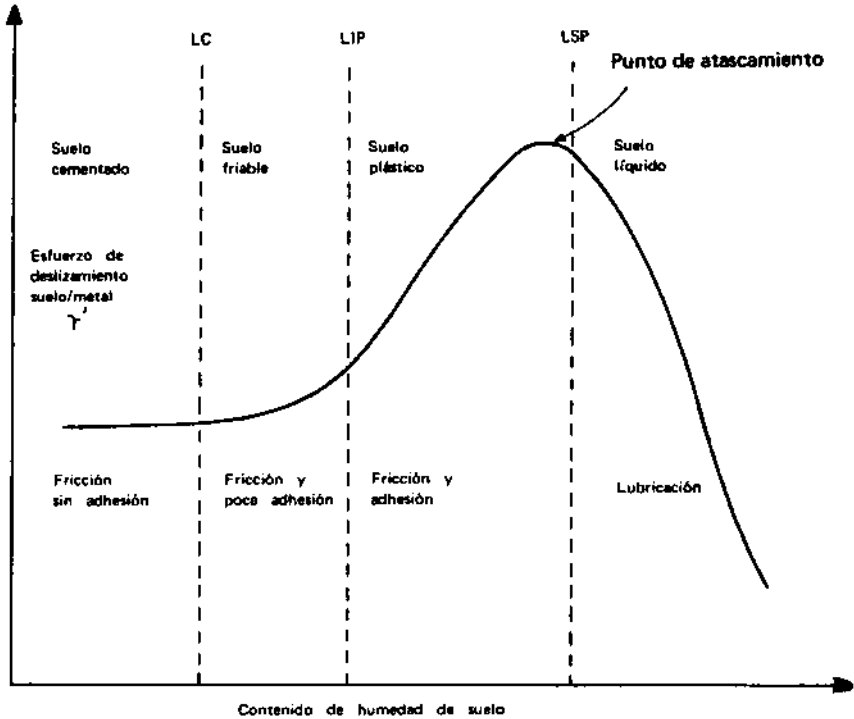


Fig. 33. Efecto del contenido de humedad sobre el esfuerzo de deslizamiento suelo/metal.

2.9 RESISTENCIA, EN LA PRACTICA, DE UN SUELO A LA CIZALLA

2.9.1 Resistencia de los terrones y la masa del suelo

En la práctica existen dos componentes de la resistencia al corte del suelo:

- a. Resistencia en corte de los terrones;
- b. resistencia en corte de la masa del suelo.

La resistencia de los terrones depende de las fuerzas que amarran las partículas y los agregados, lo que está determinado básicamente por la cohesión molecular. La Fig. 28 presentó la relación de la cohesión molecular con la humedad mientras que la Fig. 34 indica esta resistencia de los terrones.

La resistencia de la masa del suelo, en cambio, depende de la cizalla de los aglomerados o terrones amarrados con una fuerza debida principalmente a la cohesión superficial y a la fricción entre ellos. Ya se ha demostrado que el componente de fricción para los suelos arcillosos es pequeño, por lo que la curva de resistencia de la masa del suelo y la humedad (Fig. 34) sigue una forma similar a la de la Fig. 26, que representa la cohesión superficial.

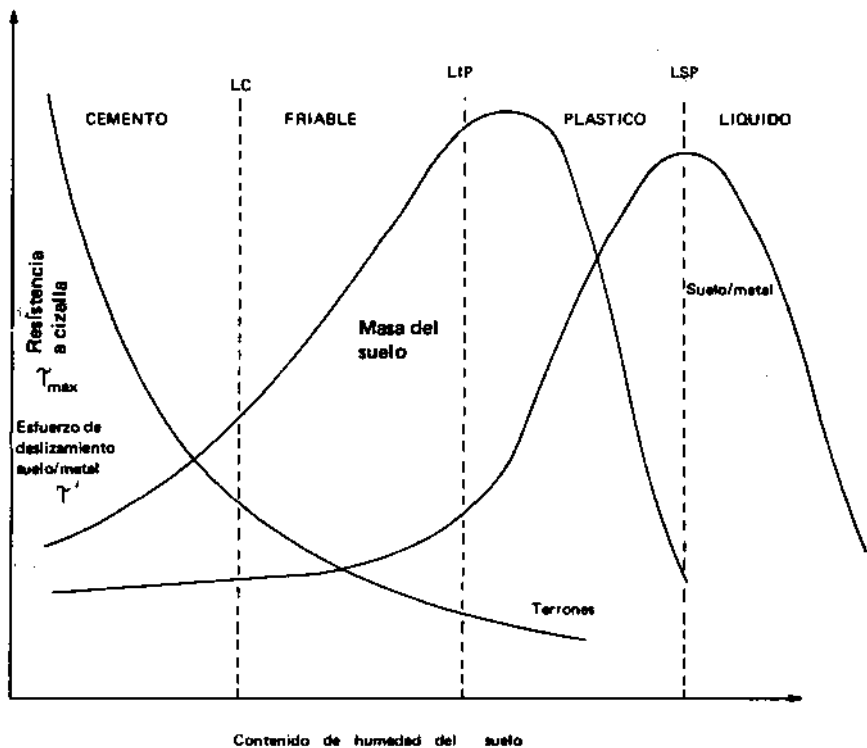


Fig. 34. Resistencia a cizalla de los terrones y la masa del suelo como función de la humedad (véase también Figs. 26 y 28) y el esfuerzo de deslizamiento suelo/metal (véase Fig. 33).

2.9.2 Resistencia al deslizamiento suelo/interfaz

En la sección 2.8 se discutió sobre los componentes de la adhesión y la fricción por resistencia al deslizamiento, y la influencia de la humedad del suelo (Fig. 33); esta curva también se incluye en la Fig. 34. Se observa que para un suelo en estado plástico existe una buena posibilidad de que la resistencia al deslizamiento sea mayor que la resistencia de la masa del suelo; esto significa que una herramienta ocasiona una falla dentro del suelo pero que se atasca en la superficie metálica por razón de $\tau' > \tau$. En esta situación no hay restregamiento y la fuerza de arrastre de la herramienta es muy elevada. Para complicar la situación aun más, la tracción en los suelos es baja justo en el momento que se la requiere y las ruedas del tractor compactan el suelo en este estado, dañando su estructura. Normalmente no se recomienda realizar labores de campo con un suelo de tan alto contenido de humedad.

2.9.3 La labranza del suelo para reducir los terrones

La Fig. 34 muestra una comparación de la resistencia al deslizamiento suelo/interfaz y a la cizalla de los terrones y la masa del suelo. Se observa que con un contenido de humedad bajo los terrones tienen alta resistencia, dificultando su rotura, y que normalmente las herramientas de labranza sólo alcanzan a reorientar los terrones sin dañarlos.

En el estado friable, con un contenido de humedad entre los límites de LC y LIP, la masa del suelo tiene mayor resistencia que los terrones, lo que significa que una herramienta de labranza puede romper los terrones con poca fuerza al mismo tiempo que la resistencia al deslizamiento es baja, facilitando así un buen laboreo.

En el estado plástico, entre los límites LIP y LSP, aunque la resistencia de los terrones sigue bajando, el deslizamiento requiere mayor fuerza, probablemente las herramientas no alcanzan un restregamiento y existe el peligro de compactar y dañar la estructura del suelo. Obviamente, es difícil trabajar con los suelos en este estado, lo que indica la importancia del índice de plasticidad (IP) para evaluar la facilidad de labranza de los distintos suelos.

Un suelo en el estado líquido es muy difícil de labrar, excepto en el caso de que exista una capa inferior en estado plástico para soportar el peso de la maquinaria, por ejemplo durante la preparación, por medio del fangueo, en los arrozales (Fig. 237 del Cap. 9).

2.9.4 Manipulación de las propiedades dinámicas para facilitar la labranza del suelo

2.9.4.1 Generalidades

La situación óptima en la agricultura se alcanzará cuando se pueda seleccionar los suelos que demuestren facilidad para la labranza (alto LIP y bajo IP), y cuando solamente se lleven a cabo operaciones en las condiciones de humedad óptimas (normalmente entre el LC y LIP); desgraciadamente, estas soluciones no son siempre factibles y se debe buscar alternativas.

Dado que el costo de una operación depende mucho de la fuerza de arrastre necesario, vale la pena tratar de reducir la resistencia al deslizamiento suelo/interfaz; se puede cumplir este objetivo ya sea reduciendo el componente de la fricción o el de la adhesión, como se describe a continuación.

2.9.4.2 Reducción del componente friccional suelo/interfaz

La Fig. 32 atestigua la importancia de eliminar la oxidación de la cara metálica de la herramienta pero también revela que no vale la pena obtener una alta calidad de pulido, por cuanto ésta reduce poco el valor del ángulo de fricción (δ).

La ecuación 8 (ver sección 2.8.3) muestra que una reducción del esfuerzo normal (σ) también disminuye la resistencia al deslizamiento, lo que se puede cumplir con un diseño cuidadoso de la herramienta. Generalmente una forma con curvas ligeras ayuda a eliminar una concentración de la presión del suelo, mientras que las curvas fuertes aumentan la fuerza de arrastre y dificultan el restregamiento. El ángulo de ataque de la herramienta tiene un efecto similar pero se debe a una serie de factores de los cuales el componente friccional constituye solamente uno (véase Fig. 35 y sección 3.6.2). Otra posibilidad es la utilización de vibración de la herramienta, tema que se discute en la sección 3.6.4; recientemente se ha comenzado a estudiar la utilización de ondas ultrasónicas para hacer vibrar el diente de la herramienta^{1 5}.

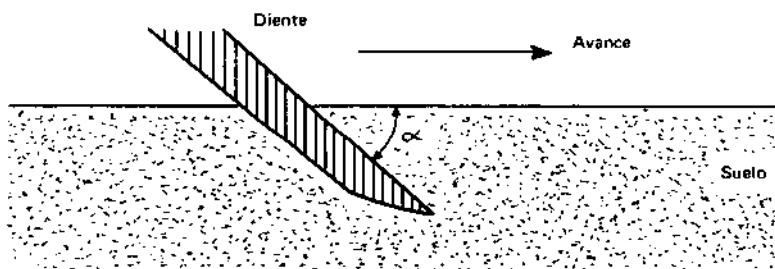
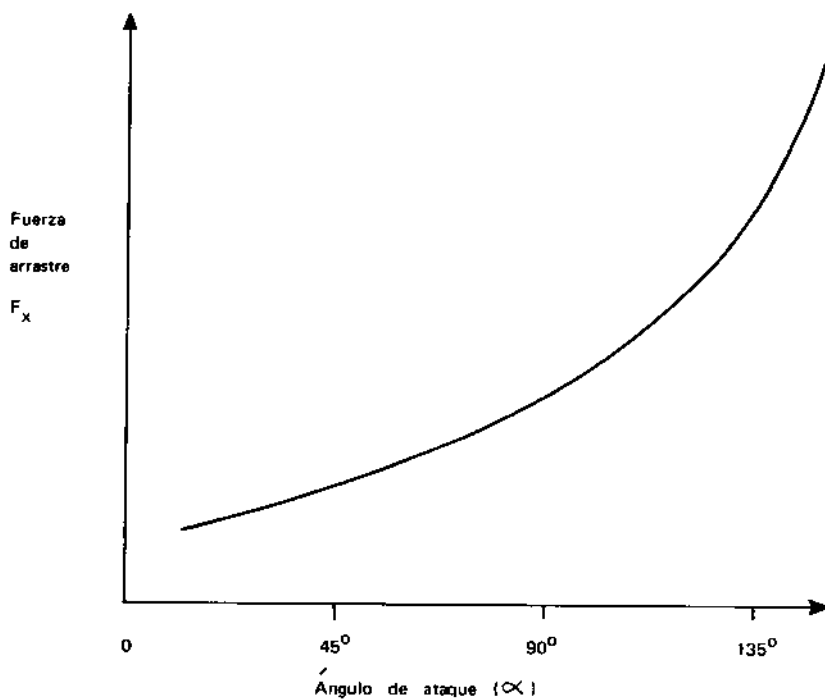


Fig. 35. Efecto del ángulo de ataque (α) sobre la fuerza de arrastre (F_x) de un diente.

2.9.4.3 Reducción del componente de la adhesión

En la sección 2.8.1 se observó que los materiales no humedecibles, como PTFE y otros plásticos, no demuestran propiedades adhesivas, por lo que existen pocas aplicaciones en las herramientas de labranza dado que estos materiales sufren un desgaste mucho más elevado, que en el caso de los aceros, en los suelos minerales. Por ejemplo, Gill et al⁶ indican que una lámina de PTFE de 5 mm de espesor puede reducir la fuerza de arrastre de un arado de vertedera hasta en un 25 % en un suelo adhesivo, pero que un suelo relativamente abrasivo desgasta la lámina al cabo de unas 20 hectáreas; en comparación, una lámina de polietileno solamente alcanza para 8 hectáreas. Este desgaste puede ser reducido en los suelos con alto contenido de materia orgánica⁸ y se ve un arado construido con éxito, en esta forma, en la Fig. 36.

Otra posibilidad de mayor factibilidad es cambiar las propiedades dinámicas del suelo en forma local, como revelan las observaciones de la Fig. 33. Al considerar un suelo con un contenido de humedad cerca del límite LIP, el esfuerzo de deslizamiento ya es más o menos elevado, pero se le puede reducir de dos formas:

- a. bajar la humedad del suelo en contacto con el interfaz para eliminar el componente adhesivo, dejando solamente el componente friccional;
- b. aumentar considerablemente la humedad en contacto hasta alcanzar lubricación.

Varias investigaciones han sido realizadas para alcanzar tales objetivos; por ejemplo, es factible pasar la tubería de los gases del escape de los camiones de transporte de tierra por una red de tubería debajo del piso del cajón. Un calentamiento del piso hace que baja la humedad del suelo en contacto, lo que facilita la descarga de un suelo mojado. Aunque el uso de calor es promisorio para disminuir la humedad del suelo, hasta la fecha tiene muy pocas aplicaciones comerciales y sufre la desventaja de ser un proceso lento si no se utiliza una temperatura alta.



Fig. 36. Un cuerpo de vertedera cubierto con una lámina de PTFE para reducir los efectos de adhesión en un suelo plástico y mejorar el restregamiento (*National Tillage Machinery Laboratory, Auburn, Alabama, EUA*).

La Fig. 37 muestra un vertedero experimental¹² que permite lubricar la cara con agua, o mejor todavía con una solución de agua con 3 % de un polímero¹¹, introducida por un sistema de compuertas. Los ensayos indicaron la factibilidad de reducir la fuerza de arrastre entre 15 % y 25 % con la aplicación de entre 40 y 100 litros/hectárea de la solución de lubricante para ciertos suelos. Este volumen de lubricante es fácil de transportar sobre el tractor o el arado.

También se ha estudiado el aprovechamiento del principio de electro-osmosis para atraer el agua del suelo hacia el interfaz⁶, si bien se requiere de un suelo permeable y el proceso puede ser moroso. Se necesita crear una potencia eléctrica suelo/interfaz que, típicamente, podría ser de unos 100 voltios; así los dipolos del agua serán atraídos hacia el interfaz. Aunque hasta la fecha esto no ha sido utilizado

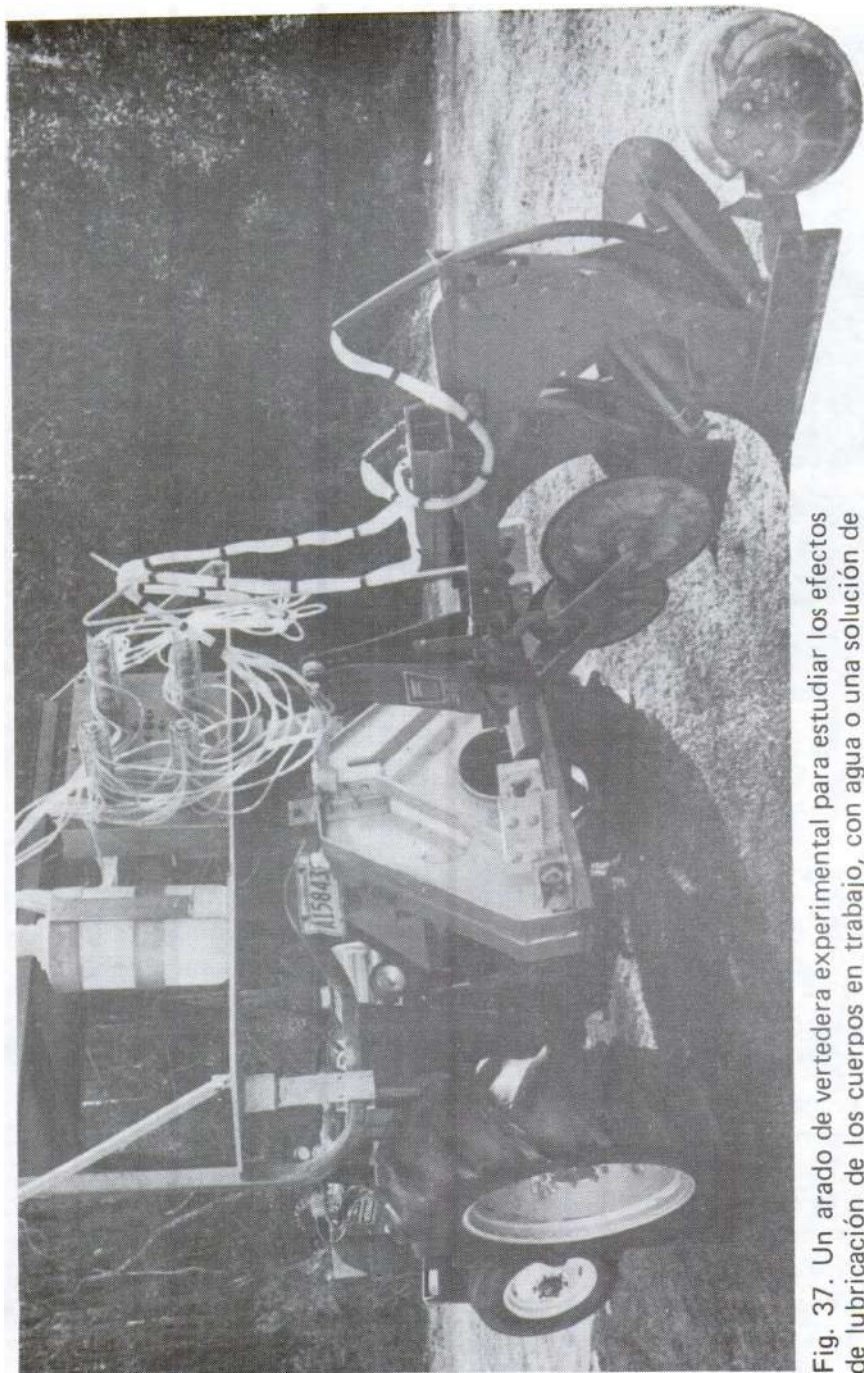
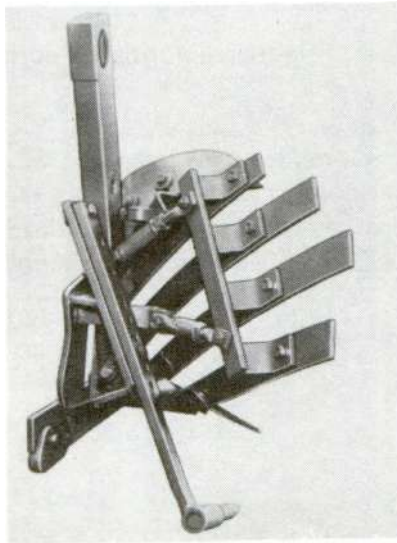
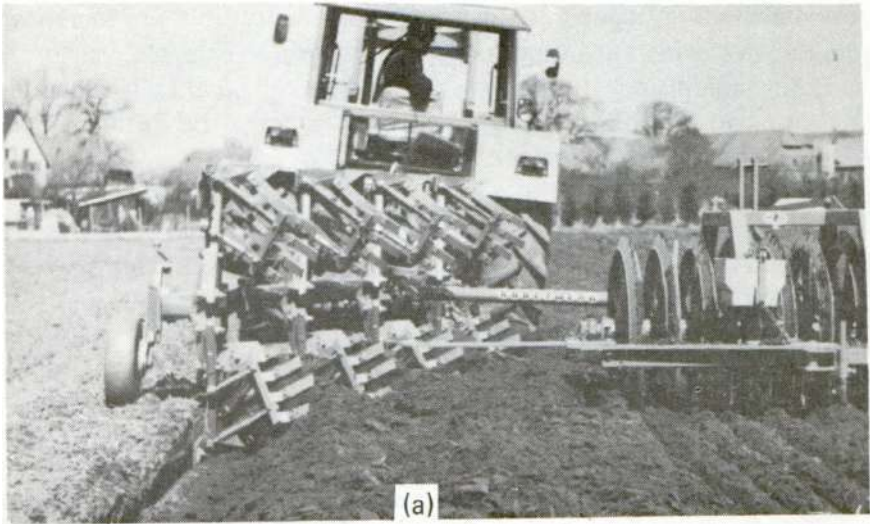


Fig. 37. Un arado de vertedera experimental para estudiar los efectos de lubricación de los cuerpos en trabajo, con agua o una solución de agua con 3% de un polímero. El sistema en uso actualmente en el campo es más simple y tiene una sola bomba, un divisor de flujo, y lubricante introducido por huecos en los pernos de fijación de las vertederas (*National Tillage Machinery Laboratory, Auburn, Ala-*



(b)

Fig. 38. El uso de un cuerpo listoneado disminuye el área de contacto y el componente de la fuerza de arrastre, debido a la cohesión del suelo. Tiene una ventaja especialmente en los suelos que atascan (*Rabewerk*, Alemania). (a) Un arado de vertedera reversible con cuerpo listoneado trabajando junto con un rodillo, para compactar el suelo y reducir la necesidad de rastrar después los suelos livianos. (b) Detalle de una vertedera listoneada con un diente subsolador.

comercialmente, siguen los estudios para su posible aplicación en donde la velocidad de avance de la herramienta es baja y la resistencia al deslizamiento constituye un componente principal en la fuerza de arrastre. Un ejemplo podría darse en las máquinas de instalación de drenaje en los campos agrícolas.

2.9.4.4 Reducción del área de contacto suelo/interfaz

Al multiplicar la ecuación 8 (sección 2.8.3) por el área de contacto (A) se determina la fuerza de deslizamiento F_d :

$$F_d = \tau' A = c_\alpha + \sigma A \tan \delta$$

$$F_d = c_\alpha A + Q \tan \delta \quad (9)$$

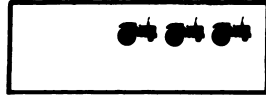
En donde $Q =$ la fuerza normal de contacto

Se observa que una reducción en el valor del área de contacto (A) puede aminorar el componente adhesivo, que será de beneficio en el caso de los suelos pesados y con mucha plasticidad. La Fig. 38 enseña un arado de vertedera listoneada, diseñado para aprovechar esta situación.

BIBLIOGRAFIA

1. **BAVER, L.D., GARDNER, W.H., GARDNER, W.R.** Soil physics. 4th edition, New York, Wiley, 1972. 498 p.
2. **CHILDS, E.C.** An introduction to the physical basis of soil water phenomena. London, Wiley, 1969. 493 p.
3. **DAVIES, B., EAGLE, D., FINNEY, B.** Soil management. Ipswich, U.K., Farming Press, 1972. 254 p.
4. **FORSYTHE, W.** Manual de laboratorio – física de suelos. San José, Costa Rica, IICA, 1975. 398 p.
5. **GARDNER, W.H.** In **BLACK, C.A.**, Ed. Methods of soil analysis. Part I, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy, 1965. pp. 92-96.
6. **GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E.** Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook No. 316, Washington, USDA, 1967. 511 p.
7. **HILLEL, D.** Soil and water – physical principles and processes. New York, Academic Press, 1971. 288 p.
8. **HOWE, S.** Plough points. London, Power Farming, 58(3):10-20. 1979; 58(4):10-13. 1979.
9. **NICHOLS, M.L.** The dynamic properties of soil. Parts 1, 2 and 3. Agric Engg 12(7):259. 1931; 12(8):321. 1931; 13(8):201. 1932.
10. **ROBINSON, G.W.** Los suelos – su origen, constitución y clasificación. Introducción a la edafología. (Traducción al español), Barcelona, Ediciones Omega, 1960. 485 p.

11. SCHAFER, R., GILL, W.R., REAVES, C.A. Lubrication of soil metal interfaces. *Trans ASAE*, 18(5):848-851. 1975.
12. _____, _____, _____. Experiences with lubricated plows. *Trans ASAE*, 22(1):7-13. 1979.
13. SOWERS, G.F. Consistency. In BLACK, C.A., Ed. *Methods of soil analysis. Part I, Chapter 31, Wisconsin, USA, American Society of Agronomy*, 1965. pp. 394-396.
14. SPOOR, G. Fundamental aspects of cultivations. In *Technical Bulletin 29, Soil physical conditions and crop production. London, MAFF, HMSO*, 1975. pp. 128-144.
15. SRIVASTAVA, A.K., DREW, L.O., GRAFF, K.F. Effect of sonic power on performance of soil tillage tools. *Trans ASAE*, 19(5):890-893. 1976.
16. WELLS, L.G., TREESUWAN, O. The response of various soil strength indices to changing water content and bulk density. *Trans ASAE*, 21(5):854-861. 1978.



MECÁNICA DE SUELO APLICADA A LAS HERRAMIENTAS DE LABRANZA

3.1 INTRODUCCION

En el Capítulo 1 se indicó que durante la labranza los suelos normalmente fallan en la cizalla y que su resistencia depende de los parámetros suelo/suelo y suelo/interfaz, que en el caso de las herramientas agrícolas generalmente es metálica. El Capítulo 2 explicó la importancia de la textura y la humedad de un suelo en su influencia sobre los parámetros de resistencia y cómo la resistencia puede cambiar dramáticamente entre los distintos suelos e interfaces, incluso para el mismo suelo. La ecuación fundamental de falla del suelo (Cap. 1 Ecuación 1) desarrollada por Coulomb en 1776 ha funcionado como base de la mecánica clásica de suelo, aún en uso actual^{3 7}. Esta ecuación también ha servido como base de teorías modernas desarrolladas para explicar el comportamiento de ciertas herramientas básicas de la labranza del suelo^{9,1 2 -1 3 ,1 5 -1 8,2 2 -2 7,2 9,3 5 -3 7,4 1} mientras que otra teoría moderna ha recibido mayor interés en la ingeniería civil por su capacidad en predecir la situación de esfuerzos y deformaciones antes de que ocurra una falla del suelo^{3 0}.

La labranza del suelo presenta un caso especial y difícil de solución debido a que la teoría clásica de mecánica de suelo trata solamente con el principio de falla, mientras que en la labranza el interés reside en los movimientos sustanciales del suelo y en los cambios efectuados en su estructura. Ya existe la posibilidad de la predicción de la fuerza de resistencia del suelo frente a un rango de herramientas simples, pero en la mayoría de los casos se debe medir directamente la fuerza en las distintas condiciones de campo. El Anexo 2 presenta un resumen de estos resultados, e información adicional se incluye en el Capítulo 7.

El objetivo de este Capítulo 3 es describir la naturaleza de la falla del suelo frente a las herramientas simples, e incluso indicar por medio de las referencias bibliográficas las teorías de predicción ya desarrolladas, de manera que en el Capítulo 4 se pueda formar un criterio para el diseño y selección de las herramientas apropiadas para la labranza. Se debe indicar que la presentación de la información se basa especialmente sobre el trabajo de enseñanza de Spoor^{32,33} en el *National College of Agricultural Engineering*, de Inglaterra.

3.2 MODELO DE FALLA DE SUELO CON DIENTES ANCHOS

3.2.1 Dientes rectos inclinados hacia adelante

La Fig. 39 indica el modelo de falla para un diente recto cuya forma tiene un ancho mucho mayor que su profundidad. Este modelo es similar para los dientes geoméricamente similares, siendo su única diferencia el volumen de suelo removido. En esta figura se observa una superficie de falla, en parte curva y en parte recta, rompiendo la superficie del suelo con un ángulo de $45^\circ - \phi/2$, en donde ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo²⁴; durante el avance el suelo se amontona sucesivamente al frente del diente, sobrecargando la superficie de falla suelo/suelo, lo que significa que la fuerza de resistencia aumenta durante el avance.

Se ha elaborado gráficos¹⁶ (ver numeral 3.2.4) que permiten calcular la fuerza de resistencia y el largo de ruptura de acuerdo con los parámetros suelo/suelo y suelo/interfaz.

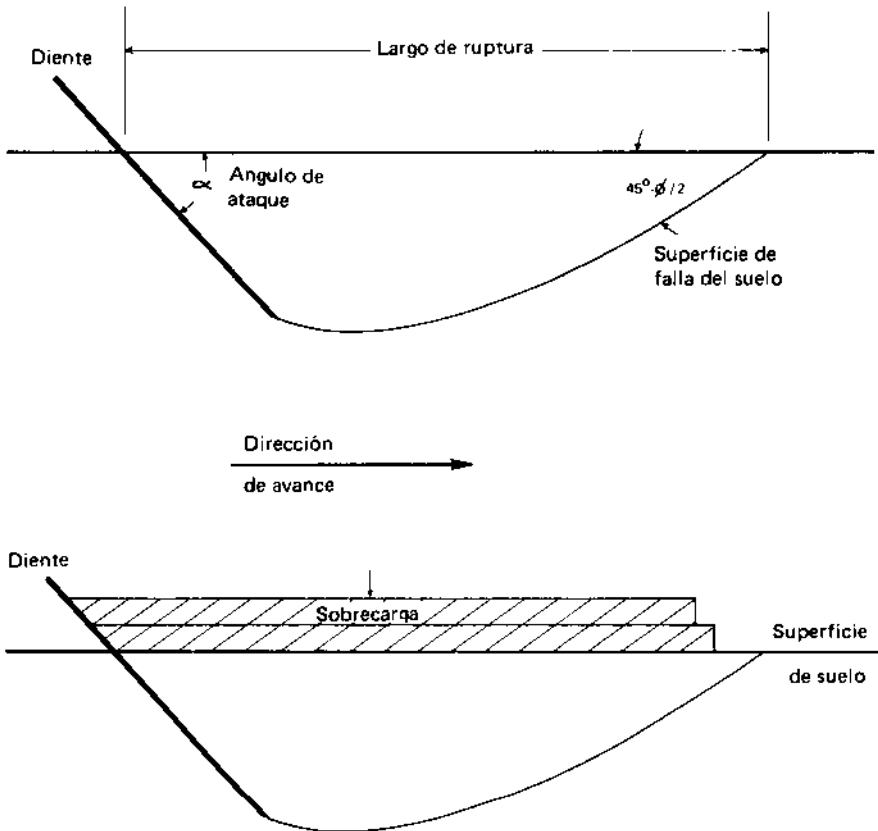


Fig. 39. Modelo de falla de suelo producido por un diente recto y ancho mostrando la serie de fallas durante el avance que ocasiona una sobrecarga.

3.2.2 Dientes rectos inclinados hacia atrás

La Fig. 40 indica que el modelo de falla es similar al caso anterior pero que un prisma de suelo se desarrolla al frente del diente y avanza como parte integral del mismo. La fuerza de resistencia se aumenta con mayor inclinación hacia atrás y el diente provoca más sobrecarga durante el avance, tal como se puede observar en la figura. Obviamente, la resistencia se incrementa más, al avanzar, que en el caso anterior; finalmente, se nota que la resistencia actúa hacia arriba, dificultando la penetración del diente.

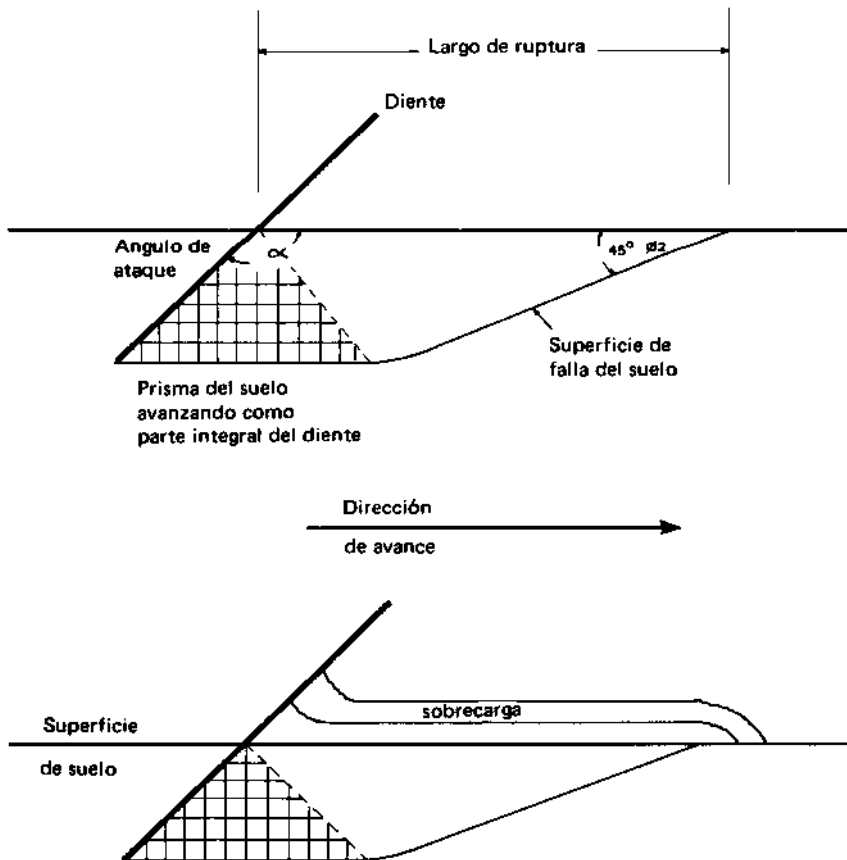


Fig. 40. Modelo de falla de suelo producido por un diente recto y ancho inclinado hacia atrás. La prisma avanza como parte integral del diente y el suelo se amontona ocasionando una sobrecarga.

3.2.3 Dientes curvos

El comportamiento de un diente curvo depende de si hay o no restregamiento (deslizamiento) en la cara suelo/interfaz. Sin éste la cara del diente se llena con suelo y el modelo de falla es similar al caso de un diente recto pero con algo de aumento en la fuerza de resistencia (Fig. 41):

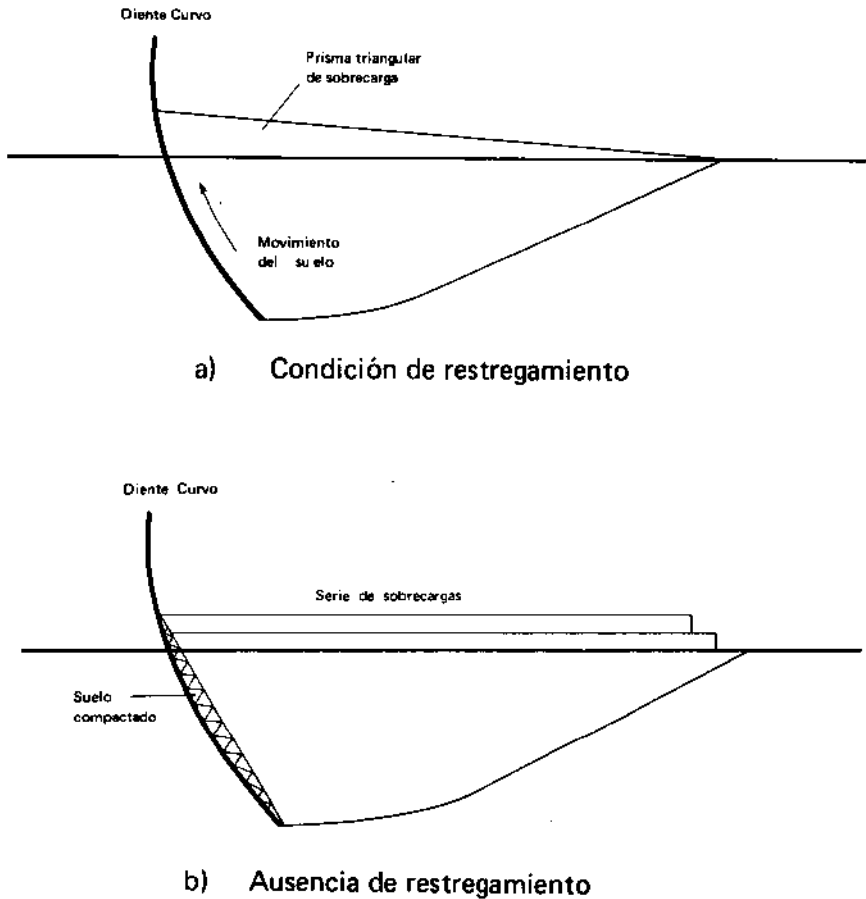


Fig. 41. Modelo de falla para un diente curvo y ancho que depende del restregamiento (deslizamiento) del suelo por la superficie del diente. El modelo con ausencia de restregamiento, es similar al caso del diente recto.

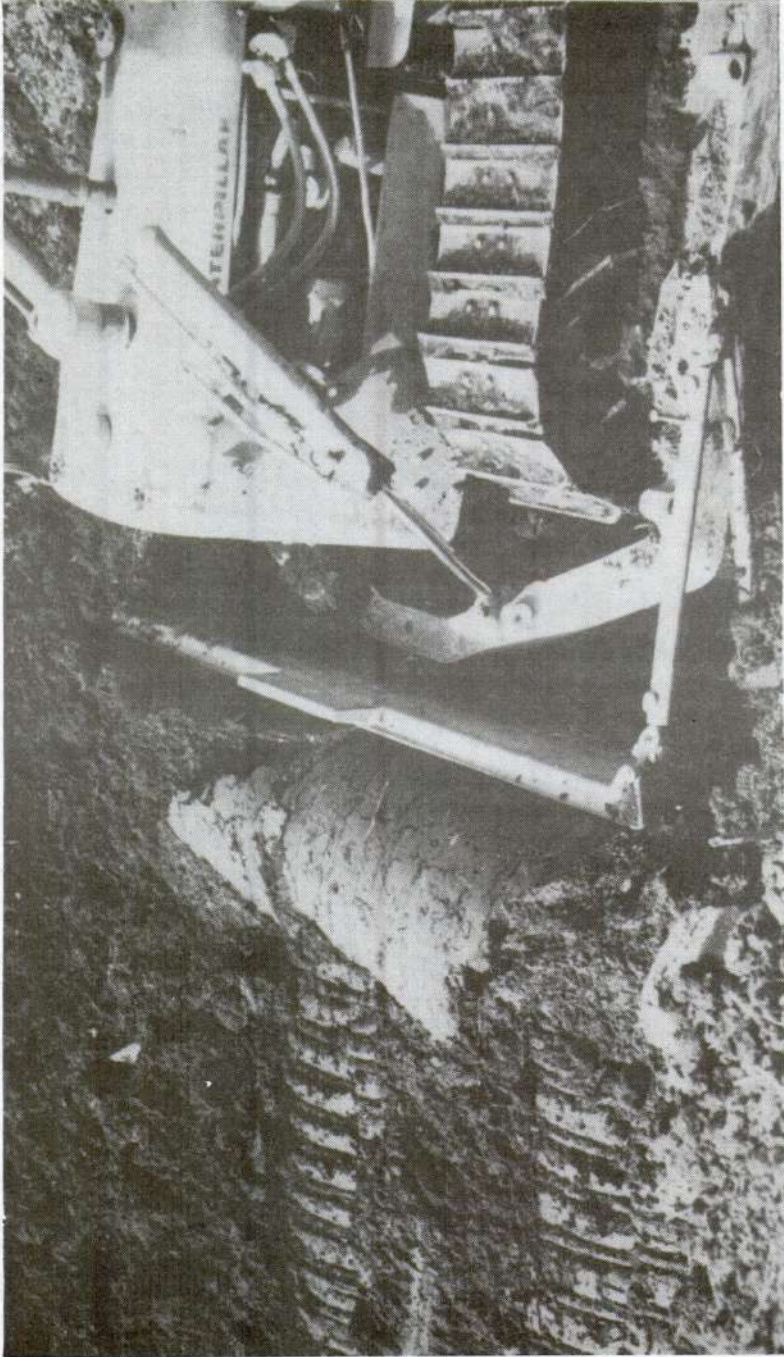


Fig. 42. El modelo de falla típico al frente de un diente ancho y curvo, con buen restregamiento del suelo (véase también la Fig. 102, como ejemplo del modelo de falla en un suelo friable).

Con restregamiento el suelo se desliza por la cara e incluso puede influir sobre su movimiento al salir hacia arriba del diente; generalmente el efecto de sobrecarga, y por tanto la resistencia, disminuye. La Fig. 42 muestra la acción típica en esta práctica.

3.2.4 Cálculo de la resistencia a la falla de dientes anchos

Se ha demostrado que la teoría clásica de falla desarrollada por Coulomb a partir de su ecuación provoca grandes errores, excepto en algunos casos muy especiales y poco prácticos. En cambio una teoría elaborada en Newcastle, Inglaterra, tiene ya buena aceptación y es capaz de predecir la resistencia de los dientes anchos y rectos o curvos con un ángulo de ataque entre $45^\circ - \phi/2$ y $180^\circ - \phi/2$. La precisión normal está dentro del 5 %, pero es necesario además determinar con precisión los parámetros del suelo.

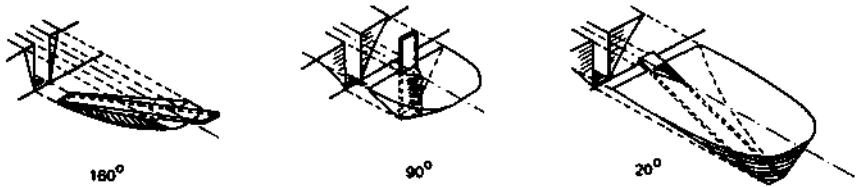
La presentación de dicha teoría se aleja del objetivo de este libro pero las investigaciones originales pueden ser consultadas en las obras de Hettiaratchi^{1 5 -1 8}, Osman^{2 4} y Reece^{2 9}. El cálculo mismo de la fuerza de resistencia y del largo de ruptura está simplificado por el uso de gráficos, reproducidos por Hettiaratchi^{1 6}.

3.3 FALLA DE SUELO CON DIENTES ANGOSTOS

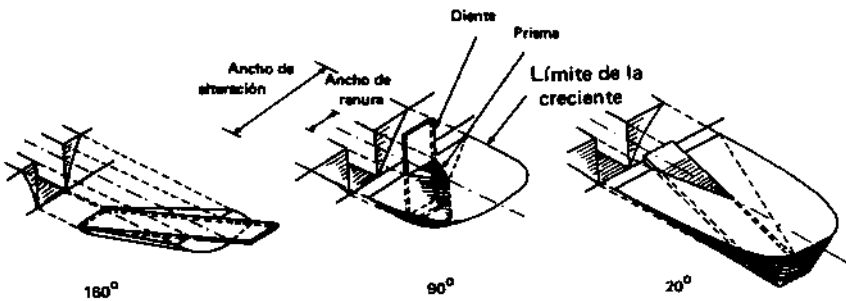
3.3.1 Modelo de falla de suelo con dientes angostos

La Fig. 43 muestra el modelo de falla de dientes angostos con una relación profundidad/anchura de 3:1 y 1.5:1 a diferentes ángulos de ataque, como fuera estudiado originalmente por Payne y Tanner^{2 7}.

Básicamente se forma un prisma de suelo frente al diente y el suelo se altera en forma de una creciente. Se observó una alteración máxima en cuanto al volumen de suelo para los ángulos de ataque pequeños, lo que también ofreció un valor menor de la fuerza de resistencia^{2 7, 3 6}, como se indica en la Fig. 44. La misma Figura demuestra que con un ángulo de ataque hasta de unos 45° , el componente vertical de la resistencia del suelo apoya la penetración mientras que con los ángulos mayores, existe la tendencia a que salga el diente del suelo.



- a) Diente de 2 pulgadas con relación profundidad/anchura de 3:1



- b) Diente angosto de 4 pulgadas con relación profundidad/anchura de 1.5:1

Fig. 43. Modelo de falla al frente de un diente angosto para distintos ángulos de ataque²⁷.

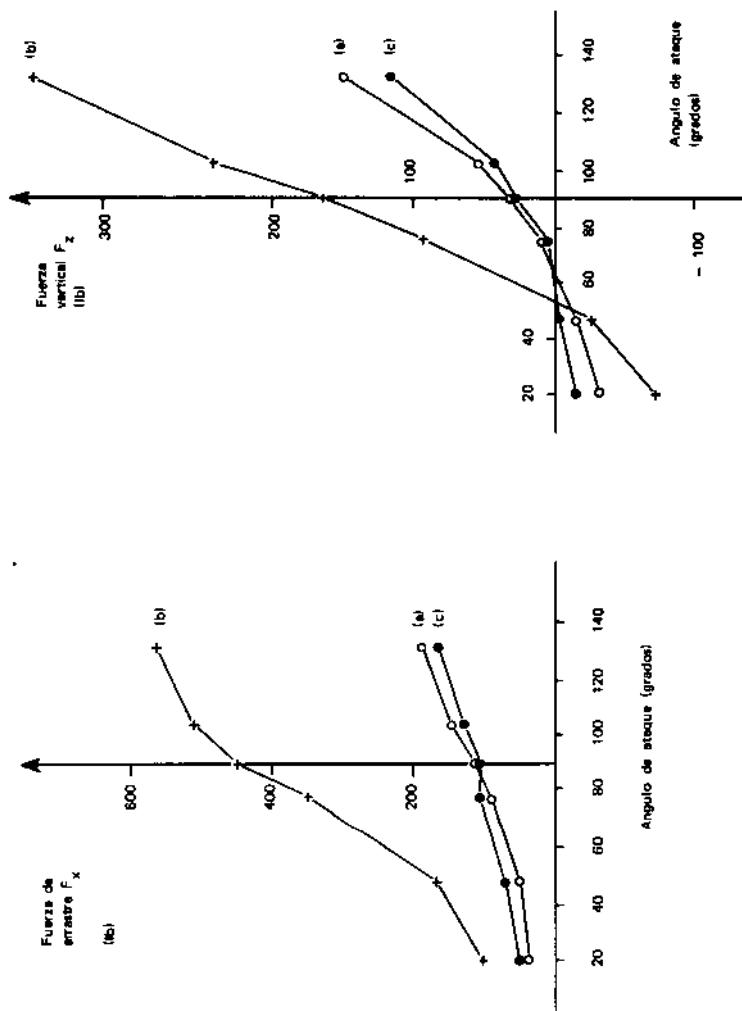


Fig. 44. Relación del ángulo de ataque de un diente angosto con la fuerza de arrastre F_x y la fuerza vertical F_z ; a) arena con 3.8 % de humedad; b) franco-arenoso con 9.4 % de humedad; c) arcilla con 18.2 % de humedad.

A mayor profundidad, el diente ocasiona un modelo de falla diferente, con un movimiento lateral, como se muestra en la Fig. 45.

La transición de falla en la forma de una creciente y falla lateral ocurre a una cierta profundidad crítica que puede ser calculada por el método propuesto por Godwin y Spoor^{1 3}. Generalmente esta profundidad crítica es mayor para los suelos sueltos; el efecto es que un diente profundo no efectúa una alteración correspondientemente mayor^{2 3}, tal como se demuestra en la Fig. 46, y podrá ser necesario incorporar alas en la punta para alcanzar un estallamiento aceptable. Este aspecto se discute en el numeral 4.5 y en la Fig. 66.

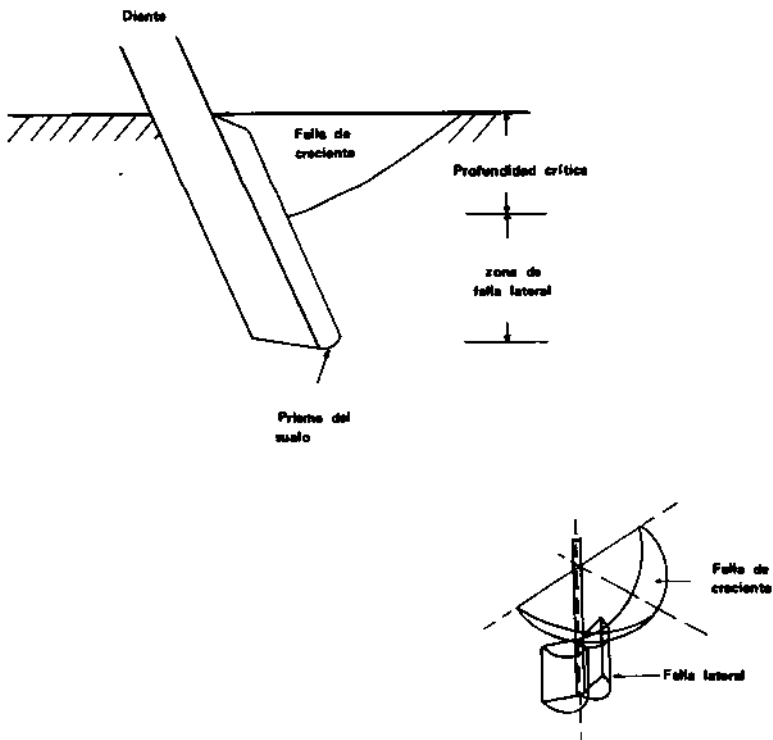
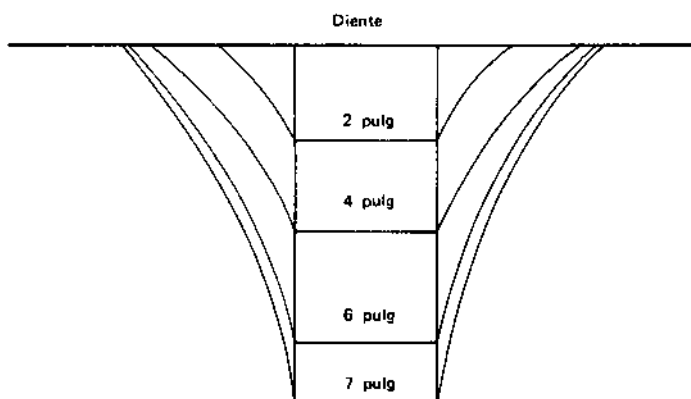
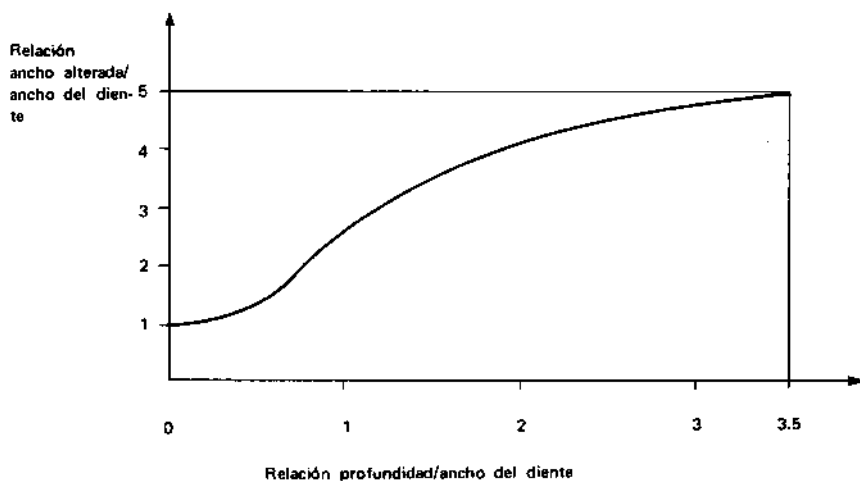


Fig. 45. El modelo de un diente angosto consiste de dos formas distintas: falla en la forma de creciente hasta una cierta profundidad crítica y luego una por movimiento lateral, alrededor de la prisma de suelo al frente del diente^{1 3}.



- a) Perfil de la zona alterada con distintas profundidades de trabajo del diente.



- b) Efecto de la geometría del diente en la zona alterada.

Fig. 46. Resultados de los estudios de la profundidad de trabajo de dientes angostos^{2,3}.

3.4 EFECTO DE UN PLATILLO HORIZONTAL

3.4.1 Generalidades

El efecto de un platillo horizontal sobre la estructura y falla de un suelo tiene dos aplicaciones prácticas distintas de acuerdo con la dirección de movimiento. Una fuerza hacia abajo da origen a la compactación del suelo, lo que puede influir dramáticamente en el crecimiento posterior de las plántulas (véase el Capítulo 5). En cambio, una fuerza para retirar el platillo desde abajo de la superficie afecta el diseño de las máquinas cargadoras/transportadoras de suelo (véase el numeral 4.11.3) y también las herramientas con alas de muy pequeño ángulo de ataque (véase el numeral 4.8.1).

3.4.2 Efecto de un platillo actuando con fuerza hacia abajo. Compactación

Básicamente se presenta acá un problema común de ingeniería civil en cuanto al análisis de la estabilidad de las fundaciones de una estructura, para lo cual existen los propios textos^{3,7} que ofrecen análisis en detalle. La Fig. 47 presenta un resultado típico del efecto de compactación de un neumático en comparación con una oruga de

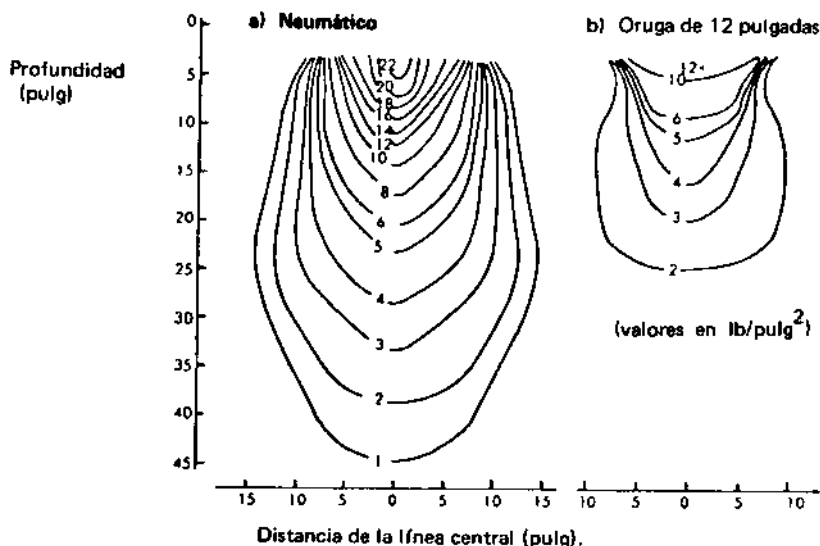


Fig. 47. Comparación del esfuerzo vertical ocasionado en un suelo franco-limoso por un neumático 13-38 y una oruga de 12'' pulg con la misma carga vertical y fuerza en la barra de tiro^{2,8}.

mucho mayor superficie de contacto^{2 8}. Aunque la compactación es menor en el caso de la oruga, no está reducida en proporción de la superficie de contacto, si se considera que la carga vertical es igual en ambos casos. Asimismo, se observa que los efectos de la compactación pueden alcanzar profundidades considerables, con las secuelas consiguientes sobre el desarrollo de las raíces de las plantas sembradas² (véase numeral 5.3.5).

3.4.3 Efecto de extraer un platillo horizontal desde abajo del suelo

La Fig. 48 indica la forma general de falla que ocurre al sacar un platillo horizontal por debajo de la superficie del suelo, hecho que provoca estallamiento en la superficie por un área mucho mayor que el área del platillo.

La fuerza necesaria para levantar el platillo es mucho menor que el caso en donde la falla está restringida por las paredes alrededor del espacio limitado. Los modelos de falla tienen mucha relación con el diseño de distintas herramientas ya sea, por ejemplo, en el aditamiento de alas para mejorar la eficiencia de un subsolador^{3 4} (véase el Cap. 4), o bien en el diseño de las tolvas de los cargadores/transportadores de suelo^{3 2} (numeral 4.11.3).

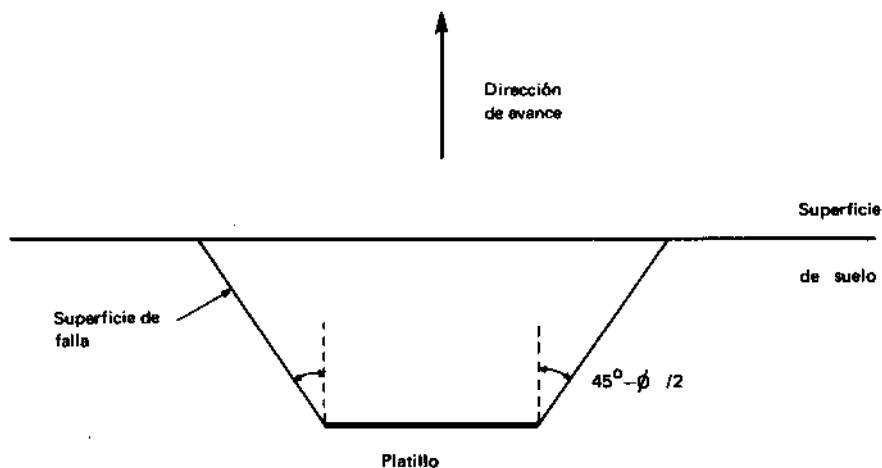
3.5 EFECTO DE LAS HERRAMIENTAS SOBRE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

3.5.1 Volumen de suelo alterado

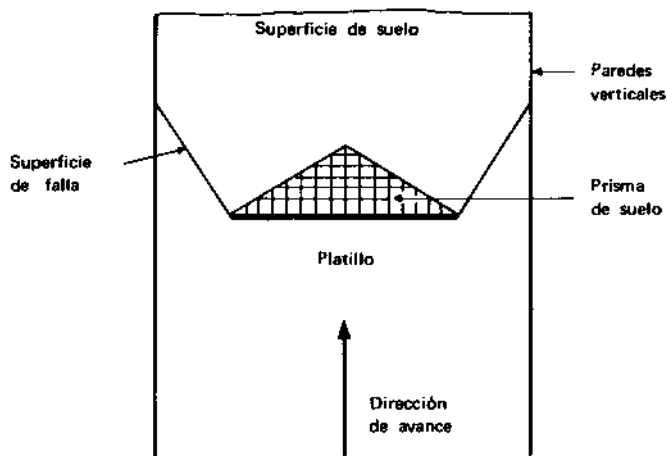
El volumen de suelo alterado por un diente depende de la profundidad de trabajo, el largo de ruptura y el ancho de la zona alterada. Para los dientes anchos, un ángulo de ataque pequeño (hasta unos 30°) y una buena profundidad de trabajo provocan mayor largo de ruptura y volumen de suelo alterado, aunque no se afecta mucho el ancho de la zona.

En el caso de los dientes angostos se observó que a mayores profundidades el volumen de suelo alterado no aumenta en forma correspondiente (Fig. 46). Este efecto depende de la compactación del suelo y muestra menor alteración para los suelos sueltos^{1 3}.

Finalmente, se notó que el volumen de suelo alterado al extraer un platillo horizontal es menor si el espacio es limitado por las paredes de una tolva u otros. Debido a que el platillo puede mover mucho



a) Platillo en un suelo libre de restricciones



b) Platillo en un espacio de suelo limitado por paredes verticales

Fig. 48. Modelo de falla al sacar un platillo horizontal desde abajo de la superficie del suelo. Las paredes verticales restringen la zona de falla y aumentan la fuerza de resistencia en el caso (b).

suelo, se le puede incorporar un diente angosto y así alterar mucho más suelo, aunque con una fuerza baja de arrastre. Este principio se discute con detalle en la aplicación práctica para subsoladores^{3,4}, en el Cap. 4.

3.5.2 Cambios en la densidad del suelo

Estos cambios dependen en gran magnitud de la dirección de la fuerza resultante del diente que actúa sobre el suelo. La Fig. 44 muestra que para los ángulos de ataque menores que los 45° , la fuerza resultante actúa hacia arriba en la mayoría de suelos y tiende así a moverse de igual manera, en apoyo al mullimiento del mismo. Con ángulos mayores de ataque la fuerza actúa hacia abajo compactando el suelo y aumentando la carga normal entre las partículas y agregados, a la vez que incrementa significativamente la fuerza de resistencia (Fig. 44). A pesar de este incremento en la resistencia de la masa del suelo no se afecta la resistencia de los terrones, por depender ésta de la cohesión (véase el numeral 2.9.1). Así, un diente angosto vertical o inclinado hacia atrás puede romper los terrones en un suelo seco al ofrecer éstos ahora menor resistencia que la masa del suelo (véase Fig. 34, imaginando un aumento en la resistencia de la masa del suelo a baja humedad).

3.5.3 Reordenamiento de las partículas y agregados del suelo

Los dientes angostos de ángulo de ataque menor que los 60° tienden a levantar los agregados grandes del suelo hacia la superficie, mientras que con un ángulo de unos 90° se ocasiona más bien una mezcla dentro del perfil de suelo. Como se anotó en el numeral 3.3.1, el prisma de suelo frente al diente angosto se levanta desde el pie del diente hacia la superficie, dado que la profundidad de trabajo es poca; esto también depende mucho del ancho e inclinación del diente y de la humedad del suelo; consideraciones más detalladas al respecto se encuentran en las obras de Buckingham⁶ y Kouwenhoven^{2,1}.

3.6 FUERZA DE ARRASTRE DE LAS HERRAMIENTAS SIMPLES DE LABRANZA

3.6.1 Generalidades

La fuerza de arrastre depende básicamente de cinco factores principales:

- a. los parámetros suelo/suelo
- b. los parámetros suelo/interfaz
- c. la forma de la herramienta
- d. la velocidad de avance
- e. la vibración del diente

En el numeral 2.9 se analizó ya la importancia de la humedad del suelo y su influjo sobre la factibilidad y eficiencia de labranza, y se anotó también su influjo sobre la resistencia de la masa del suelo y los terrones, lo que en forma similar afecta la fuerza de arrastre de la herramienta. Fueron mencionadas las posibilidades de manipuleo de los parámetros suelo/interfaz (numeral 2.9.4) al remover la oxidación y lubricar la cara del diente, entre otros, para así reducir la fuerza de arrastre.

A continuación se analiza la influencia de la forma de la herramienta, su velocidad de avance y las posibilidades de reducir la fuerza de arrastre por medio de vibraciones.

3.6.2 El influjo de la forma de la herramienta

La fuerza de arrastre se ve muy influida por el ángulo de ataque (Figs. 35 y 44) y obviamente por el ancho del diente, que afecta el volumen de suelo alterado (Fig. 44). Generalmente la fuerza de arrastre se aumenta ligeramente en el rango de los ángulos de ataque de 10° hasta unos 50° pero los ángulos mayores producen un aumento rápido en su tasa de incremento; ello significa que se debe tratar de seleccionar un ángulo menor que 50° , provisto que esto es capaz en efectuar el laboreo deseado.

Como se observó previamente, la sobrecarga de la superficie y la compactación aumentan la resistencia del suelo. Así, para minimizar la fuerza de arrastre, la herramienta no debería seguir normalmente en las huellas del tractor; obviamente esto no siempre es deseable en el objetivo del laboreo (consultar también los numerales 5.4 y 5.5). El diseño mismo de la herramienta puede disminuir los efectos innecesarios de una sobrecarga por una selección cuidadosa del espaciamiento de los dientes, el diseño de la estructura y la ubicación de las ruedas de profundidad. Por ejemplo, la Fig. 49 ilustra cómo una rueda de profundidad puesta al frente del diente, y no a un lado, produce una sobrecarga. El mismo efecto resulta en la Fig. 50, en la cual la estructura interfiere con el flujo del suelo por el diente en el caso a), y donde el diente curvo trabaja demasiado profundo en el caso b).

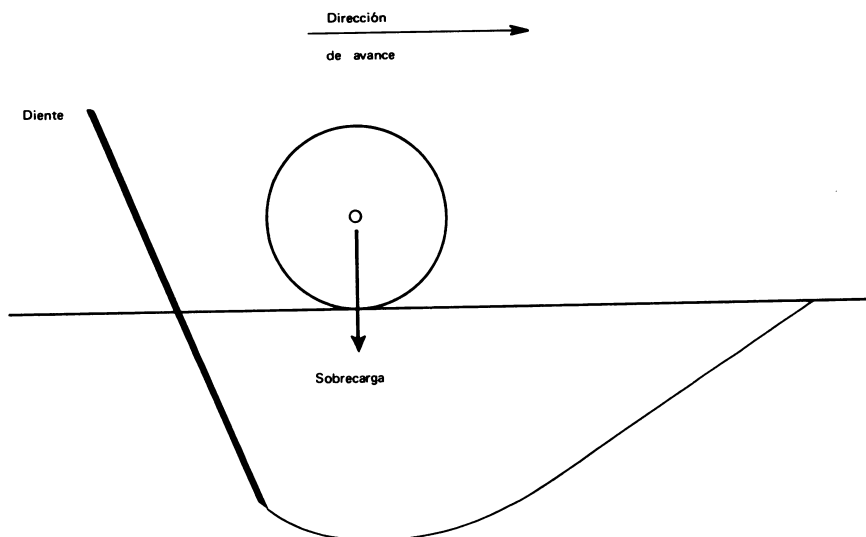
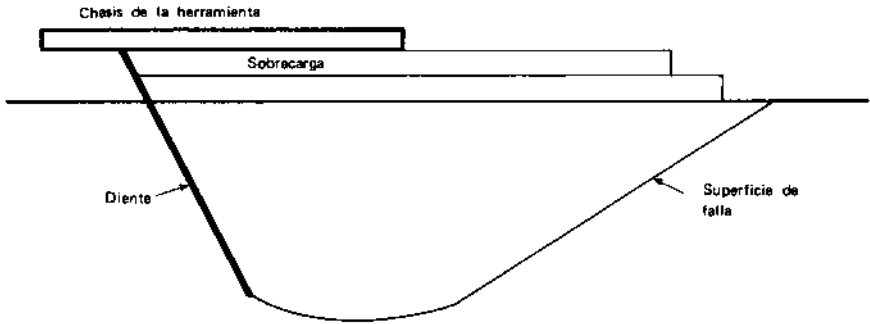
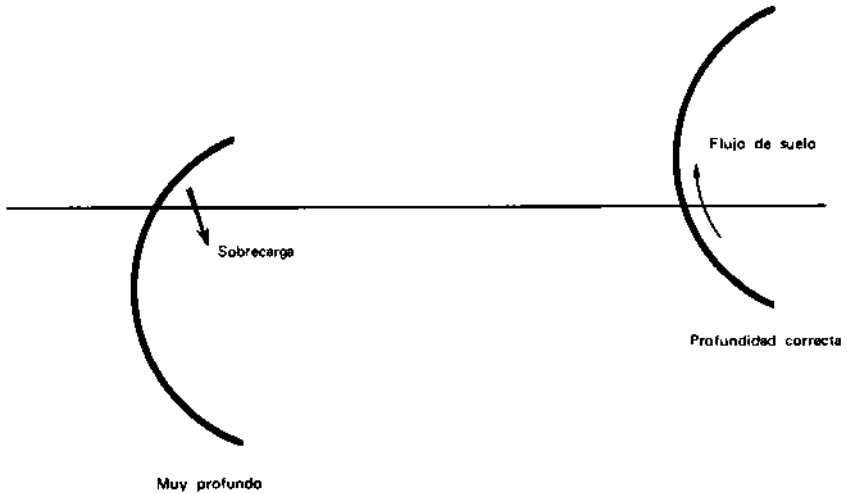


Fig. 49. Manera en que la mala ubicación de una rueda de soporte de la herramienta sobrecarga la zona de falla del suelo y aumenta la fuerza de arrastre.

Finalmente debe anotarse la importancia de propiciar un restregamiento del suelo por el diente. Los numerales 2.8.3 y 2.9.2, y los Cuadros Nos. 1 y 2, indican que la resistencia suelo/suelo normalmente se incrementa más rápido que la resistencia suelo/interfaz debido a que ϕ es mayor que δ , por lo que entonces es importante eliminar cualquier curvatura del diente que pudiera dar origen a regiones de baja presión en el suelo. Esto significa que las curvas deben ser ligeras, empezando óptimamente con un ángulo de ataque pequeño y luego aumentándose. En todos los casos el restregamiento apoya una fuerza de arrastre reducida, y en las condiciones difíciles del terreno vale la pena considerar las posibilidades de lubricación (numeral 2.9.4.3), vibración (numeral 3.6.4) u otros métodos apropiados (numerales 2.9.4.2 y 2.9.4.4).



- a) Interferencia de la estructura de la herramienta en el flujo de suelo



- b) Sobrecarga producida por un diente curvo al trabajar a demasiada profundidad.

Fig. 50. El diseño o uso inapropiado de las herramientas puede producir una sobrecarga innecesaria que aumenta la fuerza de arrastre.

3.6.3 El efecto de la velocidad de avance

Una mayor velocidad de avance de la herramienta ocasiona un incremento en la aceleración de las partículas y agregados del suelo. Por esta razón la fuerza de arrastre tiende a ser proporcional a la velocidad al cuadrado. Pero la velocidad también aumenta el esfuerzo normal suelo/interfaz y puede incrementar el esfuerzo entre las partículas; éste eleva la resistencia del suelo y, así, la fuerza de arrastre. Una posibilidad es diseñar el diente para cambiar su agresividad de acción de acuerdo con la velocidad de avance; por ejemplo, se ha estudiado la óptima articulación en un arado de vertedera para acomodar una variación en la velocidad de trabajo¹, donde básicamente los cuerpos se mantienen en su posición por medio de un sistema de resortes que permite cambiar el ángulo de los cuerpos durante la labor (Fig. 52).

Las investigaciones más recientes^{3 5} han indicado la importancia de la humedad en la relación resistencia/velocidad. Parece ser que con un contenido de humedad algo menor que el límite inferior de plasticidad (LIP), la resistencia es aproximadamente proporcional a la velocidad al cuadrado, como se indica en la Fig. 51. En el futuro esta humedad se evaluará probablemente por el método propuesto por Campbell, consistente en dejar caer un cono sobre la muestra del suelo^{7,3 5}. En cambio, con un mayor contenido de humedad la relación es exponencial, mostrando muy poco aumento en la fuerza de arrastre con velocidades mayores a unos 5 m/s (18 km/h), probablemente debido al comportamiento del suelo como una clase especial de líquido viscoso^{3 5}. La Fig. 170 muestra otro resultado del estudio de la relación fuerza/velocidad, en esta ocasión para una herramienta más complicada que consiste de una serie de discos con cuerpo inclinado (arado de discos).

Se debe anotar también que normalmente se practica una labranza del suelo con un contenido de humedad menor que el LIP, ocasión en que la velocidad sí afecta sustantivamente la fuerza de arrastre y el requerimiento de energía para una operación específica.

3.6.4 Reducción de la fuerza de arrastre por medio de vibración

La posibilidad de reducir la fuerza de arrastre por medio de vibración ha sido estudiada por casi un siglo, especialmente con referencia a su aplicación en herramientas con alto requerimiento de

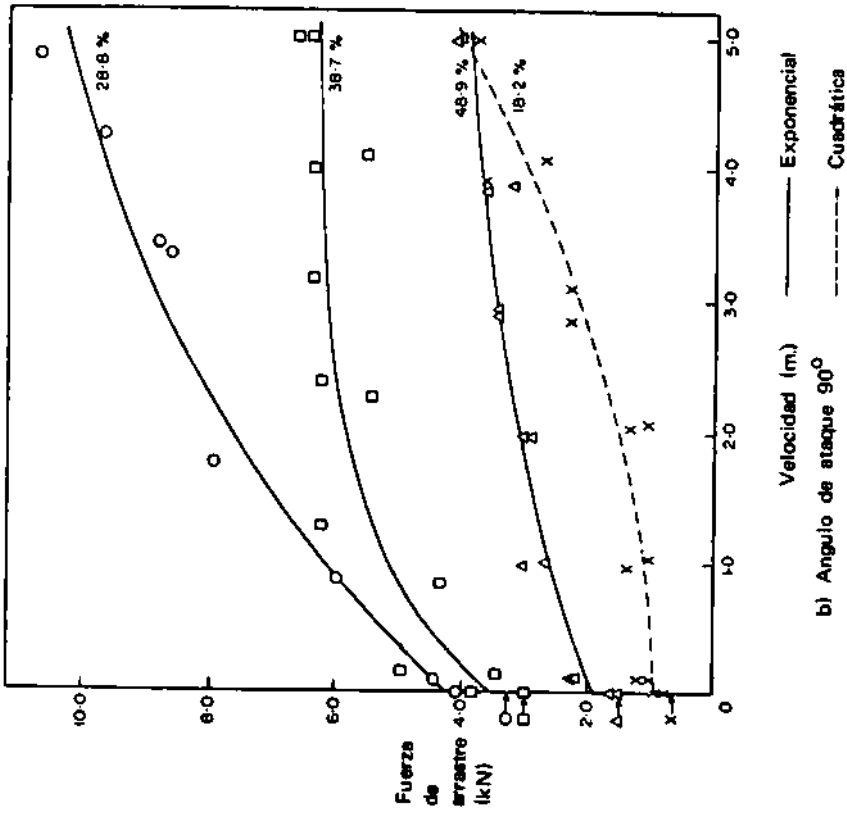
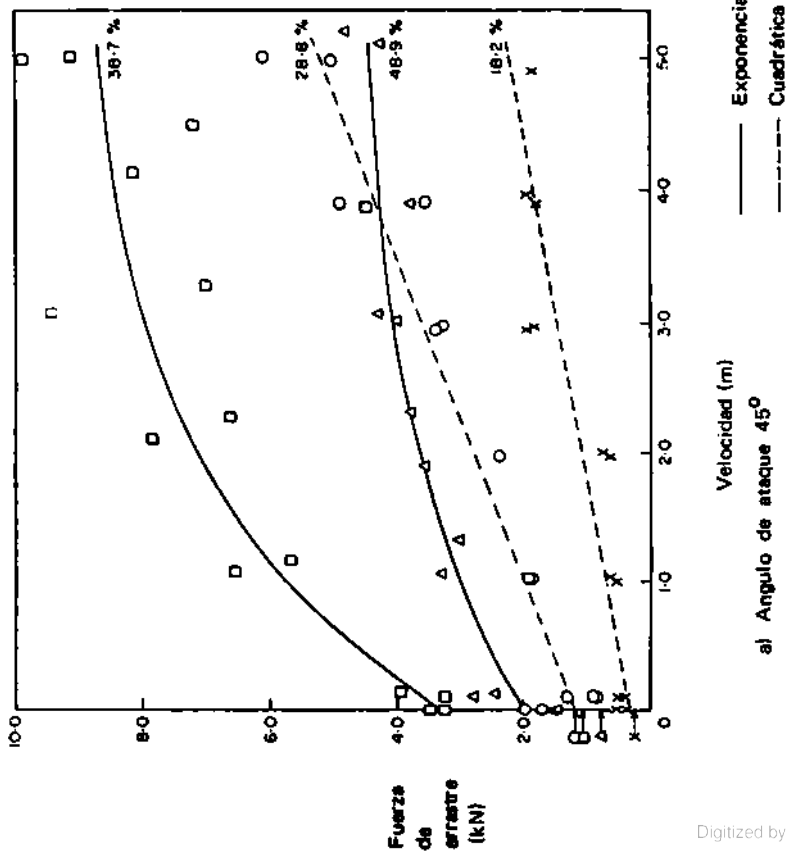


Fig. 51. La relación de la fuerza de arrastre de un diente depende de la velocidad depende del contenido de humedad, siendo una relación cuadrática con baja humedad y exponencial a alta humedad. Los resultados son para un suelo arcilloso con LIP 39 %^{3 s}. Humedad: X 18.2 %, O 28.8 %, □ 38.7 %, △ 48.9 %.



Fig. 52a. Un arado de vertedera experimental que permite cambiar la inclinación de los cuerpos hidráulicamente, durante el trabajo (*National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, Inglaterra*).

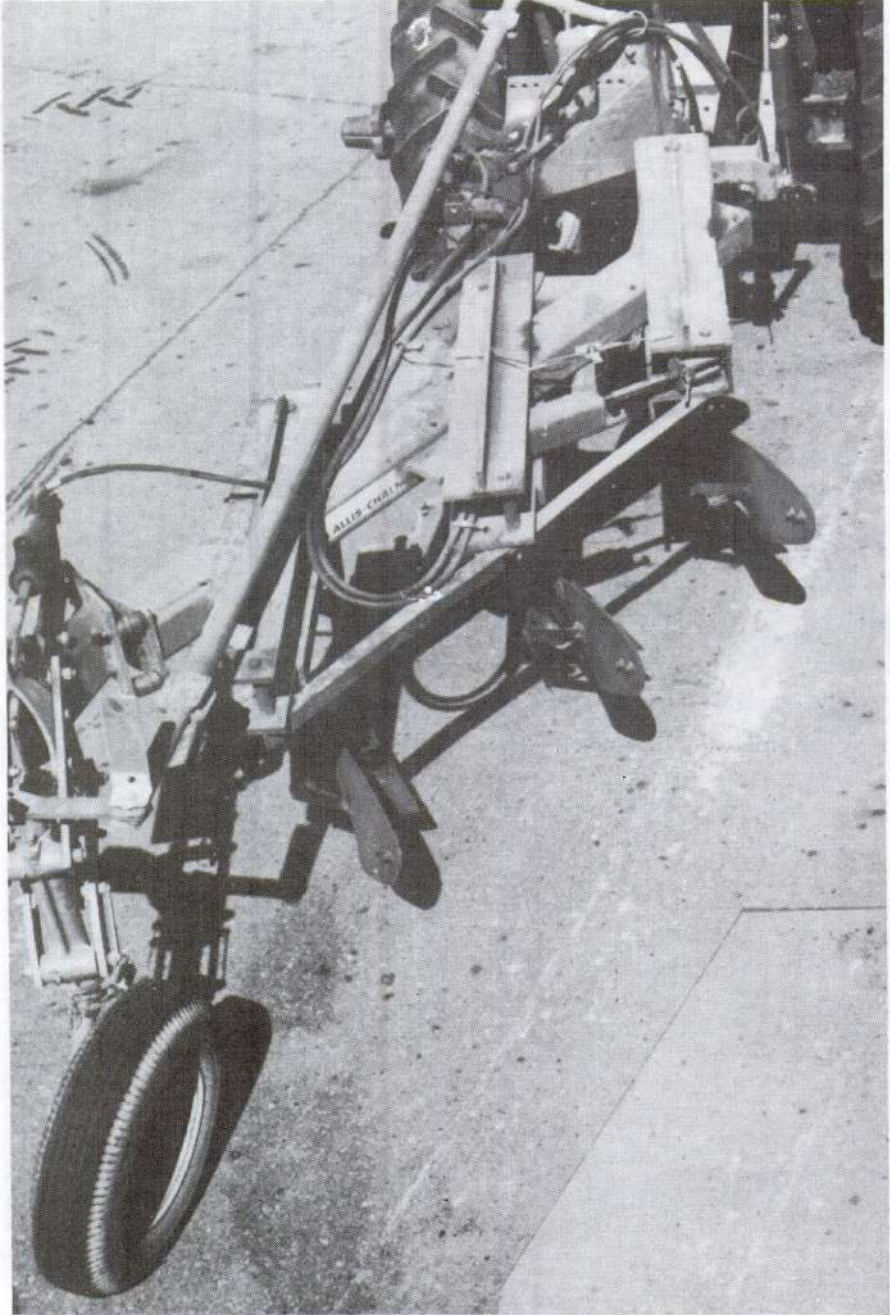


Fig. 52b. Detalle del arado de vertedera experimental.

fuerza, como subsoladores y máquinas de drenaje. Hay algunos buenos ejemplos de trabajos recientes sobre este aspecto^{11,20,38,39} y se puede encontrar resúmenes del avance de la investigación en forma breve^{3,12,19} o en forma detallada^{4,5,10,40}.

No está claro el mecanismo por el cual la fuerza se reduce pero se ha sugerido dos posibilidades: en los suelos arenosos aparentemente la vibración disminuye la reacción suelo/interfaz, y quizás también la reacción entre las partículas y agregados del suelo, reduciendo también el componente de resistencia debido a la fricción; en los suelos arcillosos se ha sugerido que la vibración produce una migración del agua del suelo hacia la punta del diente^{4,5}.

La vibración puede ser longitudinal, en la dirección de avance que aparentemente dé una mayor reducción en la fuerza que una vibración vertical. Es posible que la situación óptima ocurra al provocar una vibración inclinada a 30° en la dirección de avance. La frecuencia de la vibración debe estar relacionada con la velocidad de avance para asegurar que durante parte del ciclo el diente se mueva hacia atrás con respecto al suelo.

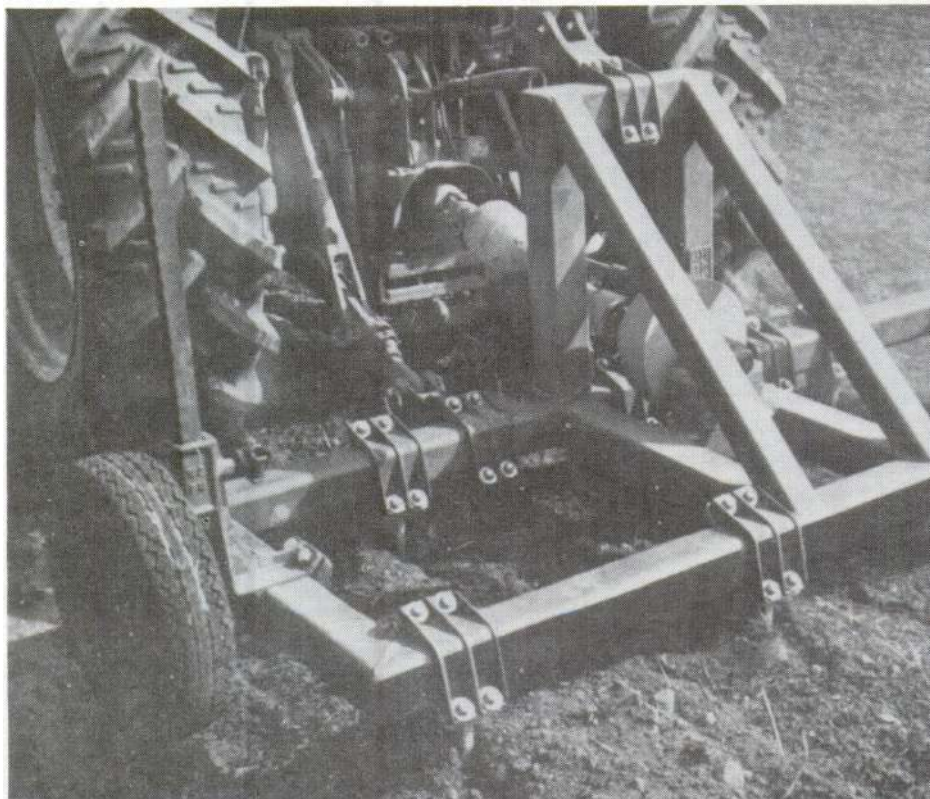
Aunque la vibración realiza una mejor pulverización del suelo y puede reducir la fuerza de arrastre, normalmente la potencia total de la herramienta es mayor que en el caso de una herramienta simple. La Fig. 53 muestra una aplicación comercial de vibración.

3.7 LABRANZA GIRATORIA

3.7.1 Generalidades

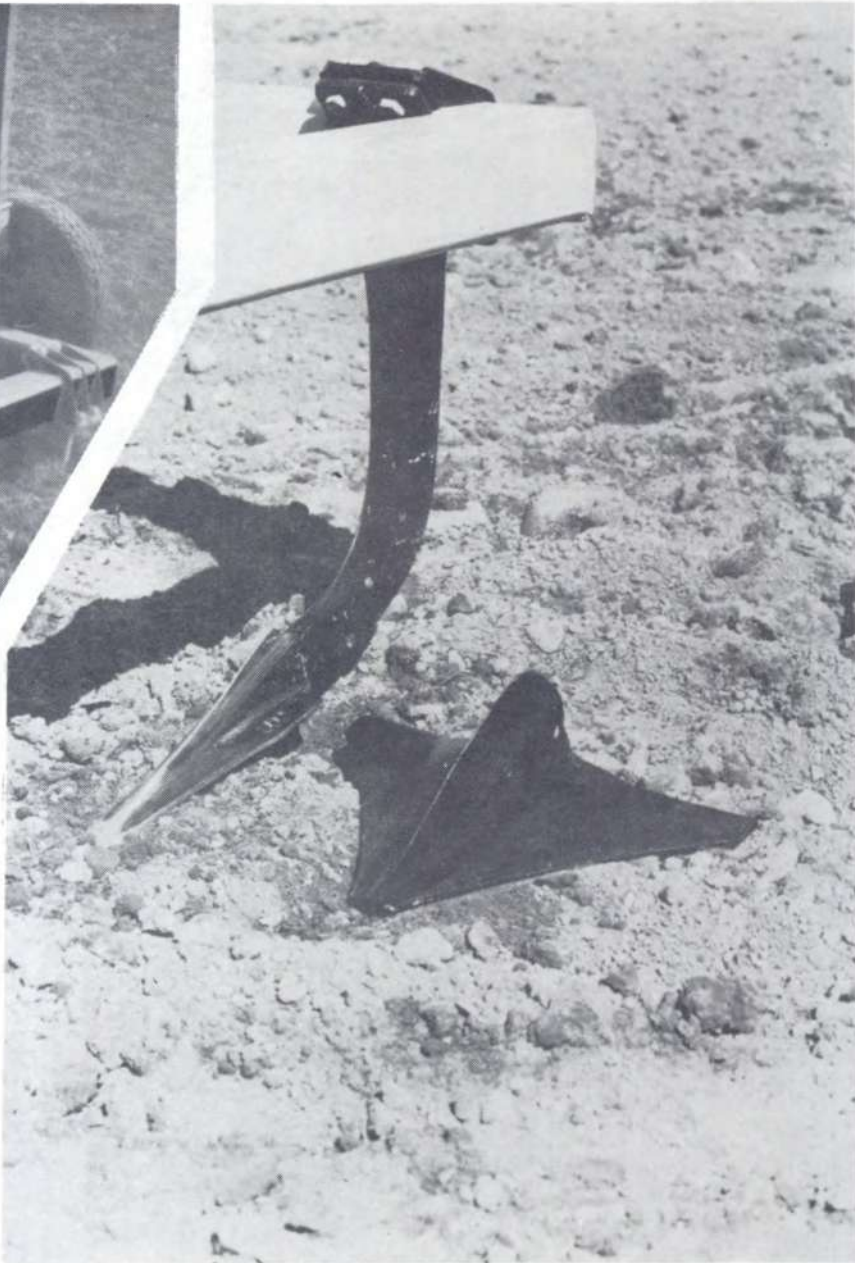
El uso de herramientas giratorias ha recibido mucha atención de los investigadores. Normalmente este tipo de máquina consiste de un eje horizontal que lleva un juego de cuchillas en forma de una 'L', girando en el sentido de avance del tractor (Fig. 54).

También se ha fabricado rotores que giran por ejes verticales, normalmente de tipo cultivador para una labranza secundaria, un ejemplo de los cuales aparece en la Fig. 55. Si bien la teoría está poco desarrollada¹² y no se la elabora en este texto, existen algunos resúmenes de los estudios de labranza giratoria con eje horizontal^{3,5,12,14,19,31}. Un ejemplo del desarrollo del principio⁸ es la combinación del rotor con un juego de dientes cinceles para alcanzar una mayor profundidad de alteración del suelo así como una buena estabilidad de la herramienta en el trabajo (Fig. 138 y numeral 5.5.8).



(a)

Fig. 53. Aspectos del diseño del *Shakaerator* como un ejemplo de la aplicación de vibración para la labranza (*McConnel*, Ludlow, UK). (a) Vista general de una herramienta para estallar el suelo por medio de cinceles vibratorios. (b) Dos tipos de diente para provocar estallamiento del suelo, por medio de vibración.



(b)

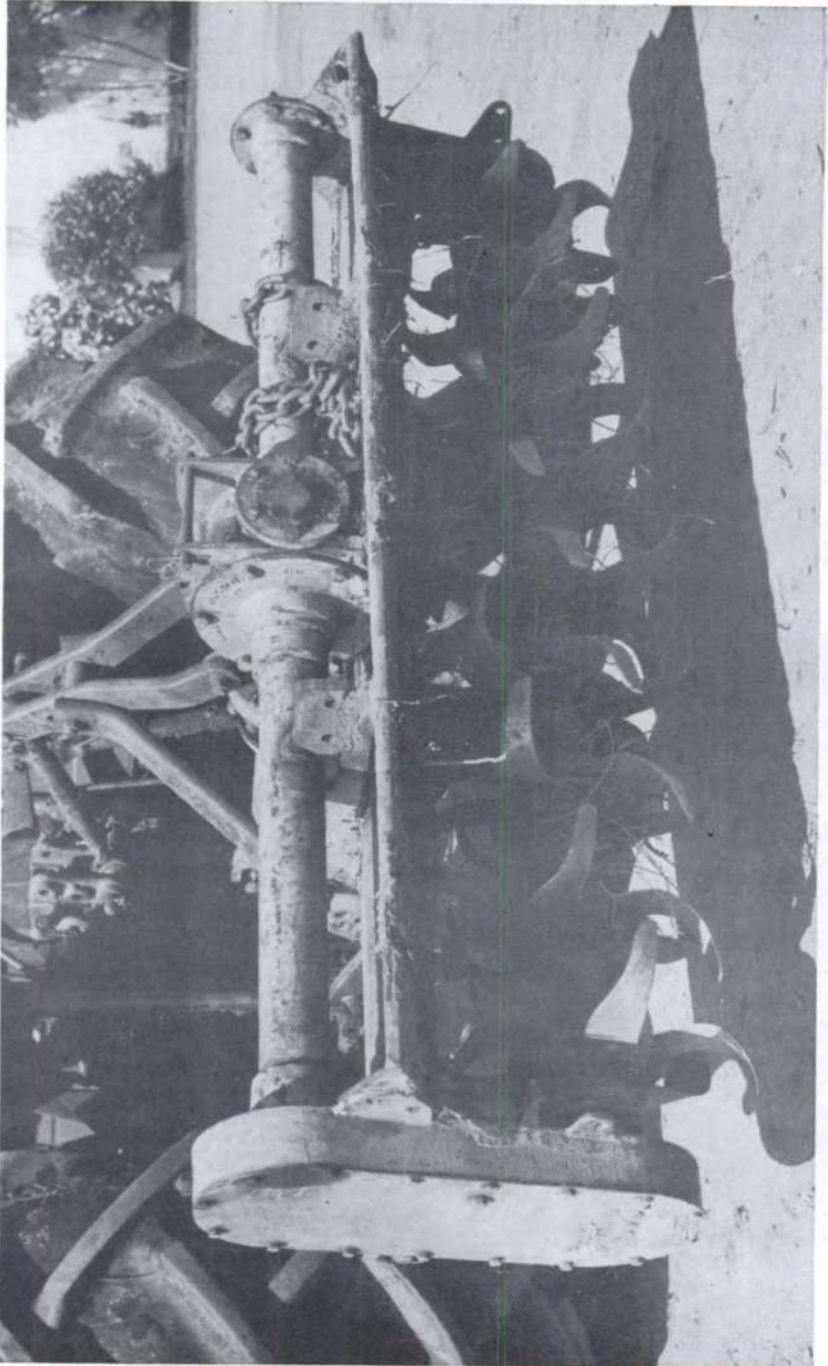


Fig. 54. Cultivador giratorio (rotovator) con las cuchillas en 'L' muy gastadas (Lloyd Johnson).

Generalmente el objetivo del sistema es producir, durante un solo paso, la rotura y pulverización del suelo. Pero además tiene una aplicación importante en la preparación de arrozales, aspecto que se discute en el numeral 4.6.1. A continuación se describen el modelo de falla del suelo y el efecto de varios parámetros de diseño sobre el rendimiento de la máquina, mientras que en el numeral 8.4 se encuentran los aspectos mecánicos del acople al tractor.

3.7.2 Efecto de los parámetros de diseño sobre la labranza de un cultivador giratorio de eje horizontal

La Fig. 56 presenta los efectos básicos sobre la pulverización del suelo debidas a la velocidad de avance, velocidad del rotor y el uso del plato bisagrado atrás del rotor. Un factor de primera importancia encontrado en el comportamiento de la máquina es la mordedura ilustrada en la Fig. 57. Se puede mostrar⁸ que la mordedura 1_m en mm está relacionada con los otros parámetros de diseño, en la siguiente forma:

$$1_m = \frac{v}{N n}$$

En donde

v	=	velocidad de avance (mm/s)
N	=	velocidad del rotor (rev/s)
n	=	número de cuchillas en una sección del rotor

Las investigaciones han probado que al aumentar la mordedura se aumenta el torque del rotor pero se disminuye la potencia necesaria en el eje de toma de fuerza del tractor para efectuar la operación, y el grado de pulverización del suelo se reduce.

El trabajo de Hendrick y Gill¹⁴ indica que la relación del diámetro del rotor/profundidad de trabajo debe estar en el rango de 1.1 a 1.4 para una eficiencia óptima en cuanto a la utilización de potencia. Se debe observar la importancia de la forma de las cuchillas o dientes giratorios sobre la calidad de labranza. Generalmente esto es un área poco estudiada y no cubre todo el rango de máquinas en el mercado actual (Fig. 58). Además, se puede utilizar una estructura sobre el eje giratorio para permitir la construcción de camas de semilla (Fig. 59).



Fig. 55. Este cultivador giratorio tiene una serie de rotores con eje vertical, cada uno con dos dedos penetrando el suelo y comandado por el eje de toma de fuerza. Finalmente, el rodillo trasero efectúa una nivelación y compactación. Se observa la eficiencia para eliminar los terrones (*Lely Import Ltd., St Neots, RU*).

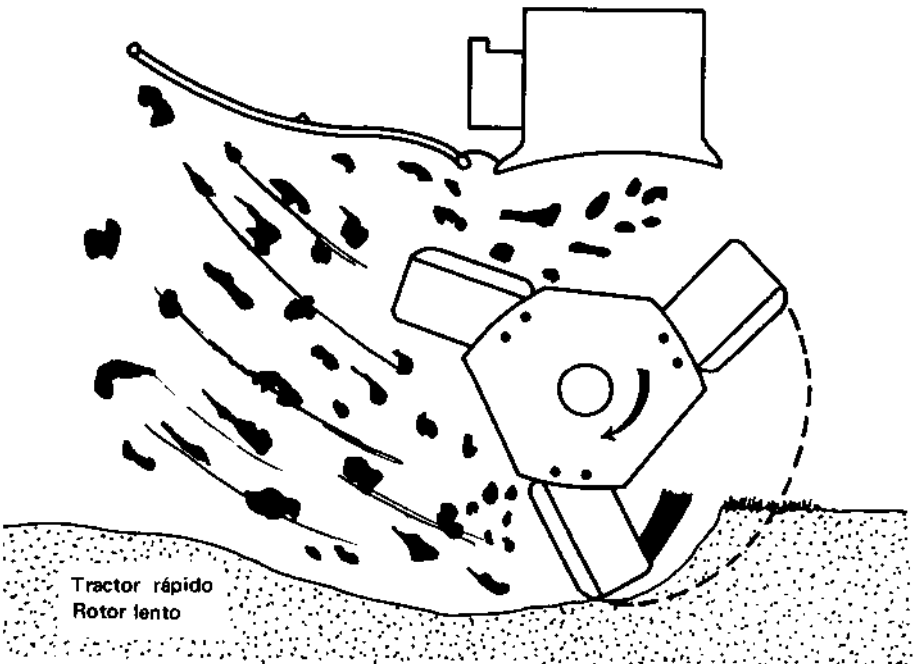
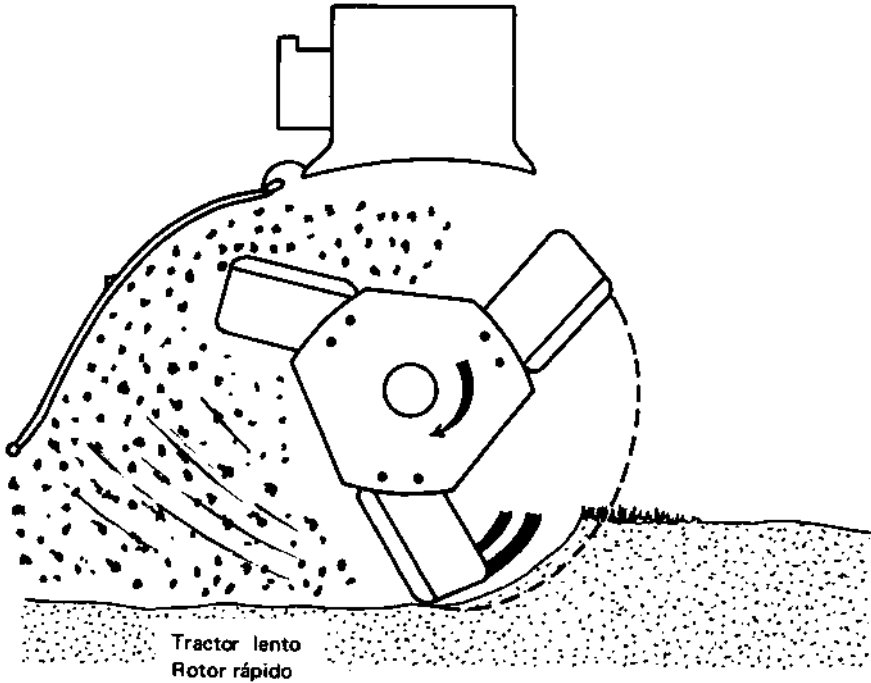


Fig. 56. Efecto en el grado de pulverización del suelo al ajustar el plato del cultivador giratorio, la velocidad del rotor y tractor.

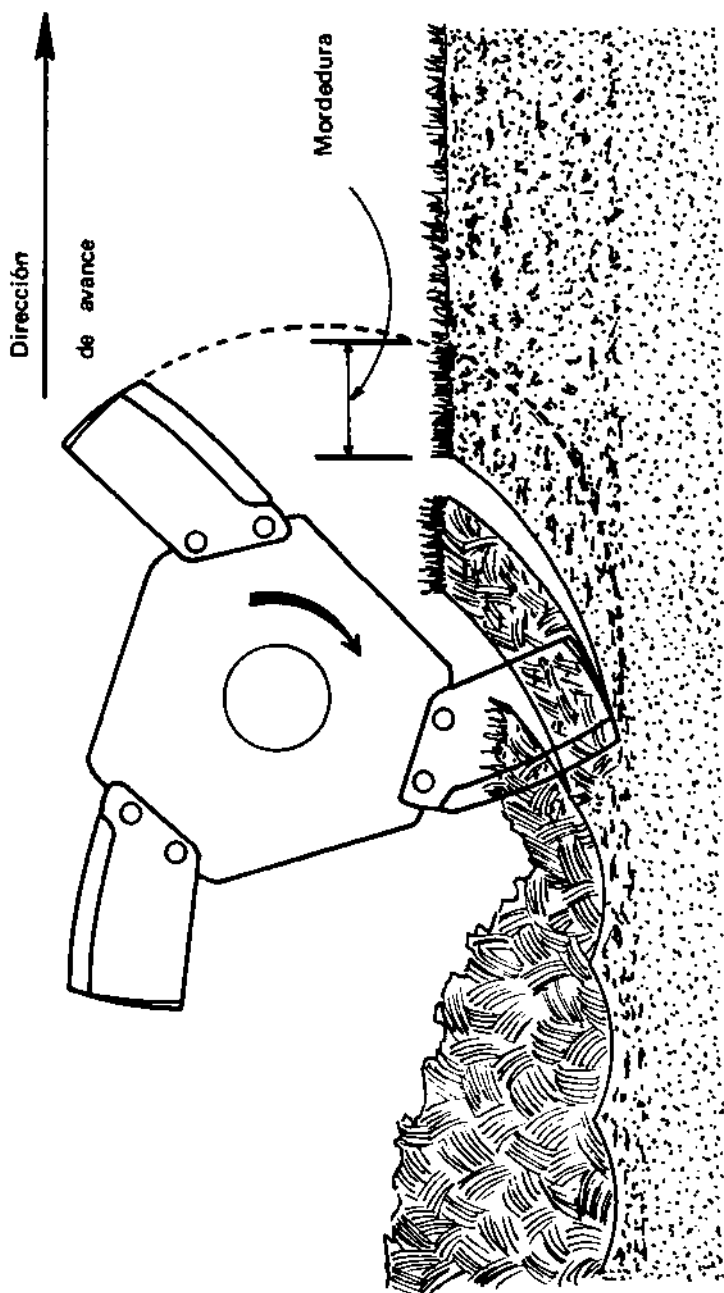


Fig. 57. La distancia de la mordedura afecta el grado de pulverización del suelo y la potencia de operación del cultivador giratorio.

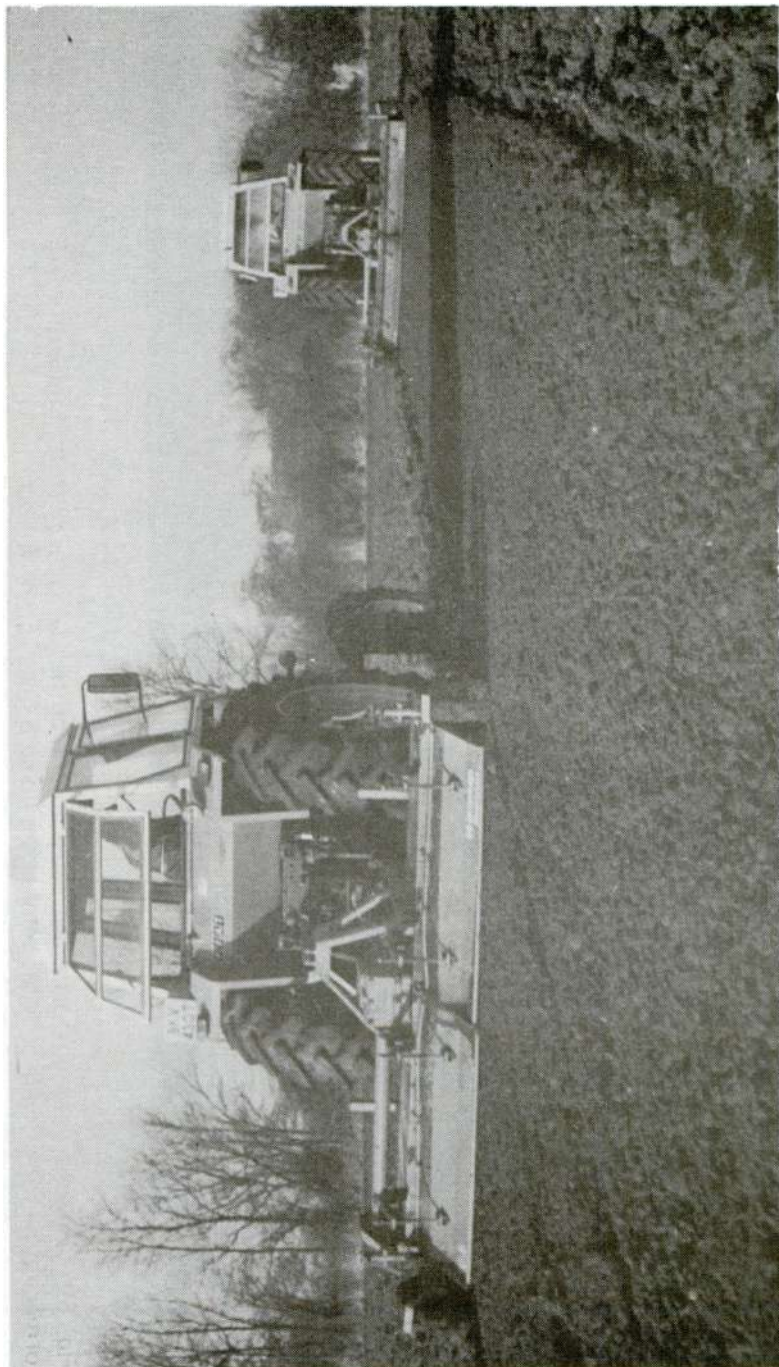


Fig. 58. La labor del *Howard Rotaspike* consiste en romper los terrones por medio del impacto de los dedos de barrilla redonda en el eje giratorio (*Howard Rotavator Co Ltd*).

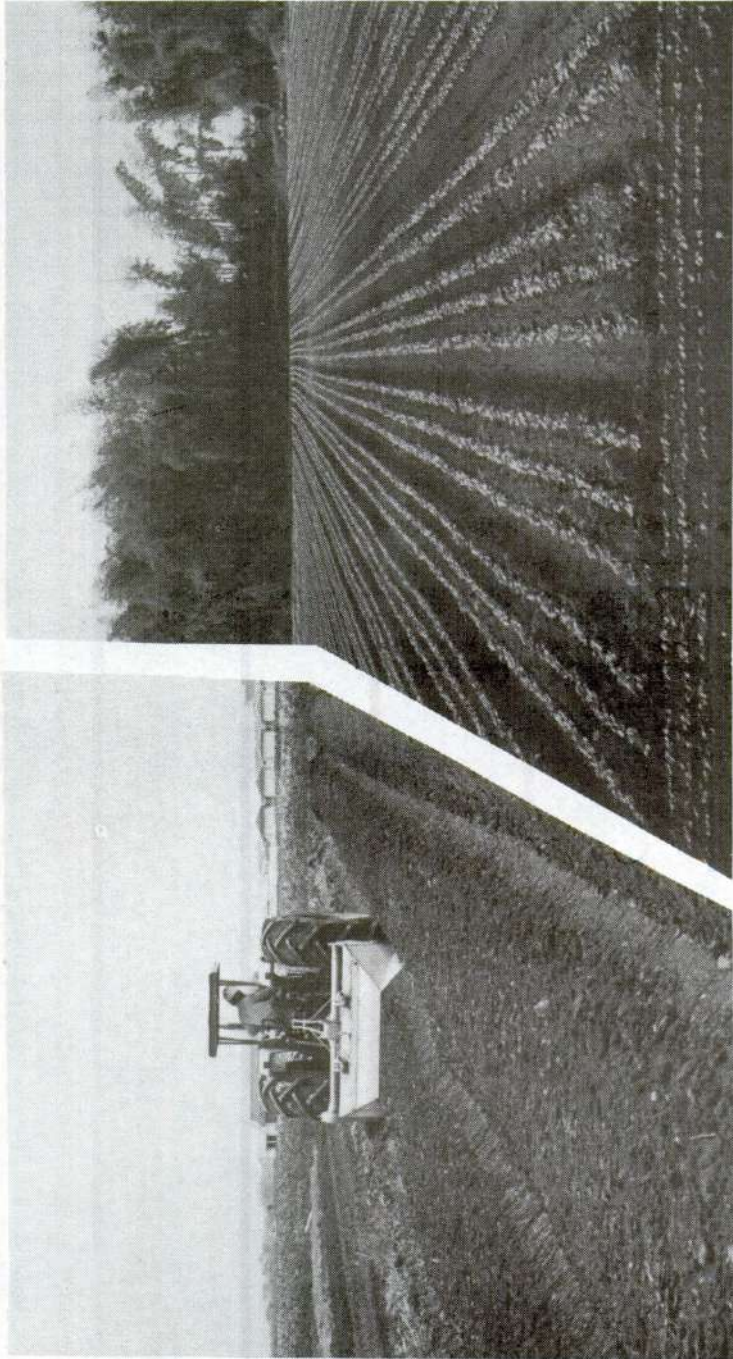


Fig. 59. Un cultivador giratorio con estructura modificada, para permitir una roturación del suelo y la formación de mesas en la cama de semilla, en un solo paso (*Lloyd Johnson*).

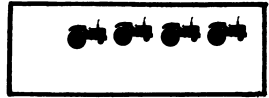
BIBLIOGRAFIA

1. AL-JALIL, H.F., MARLEY, S.J., BUCHELE, W.F. Spring-damper control for lateral cutting angle of a variable-speed moldboard plow. *Trans ASAE*, 22(3):494-497. 1979.
2. ASAE. Compaction of agricultural soils. St. Joseph, Michigan USA, ASAE Monograph, 1971. 471 p.
3. BERNACKI, H., HAMAN, J., KANAFOJSKI, Cz. Agricultural machines, theory and construction. Vol 1 (1967); English translation, Washington, USA, USDA, 1972. 883 p.
4. BLIGHT, D.P. A summary of published experiments with oscillating tines. *J.I. Agric. Engrs.*, 25(4):173-180. 1970.
5. ———. Research into powered cultivations. *The Agric. Engr.*, 34(4):96-98. 1979.
6. BUCKINGHAM, F. Cultivo. Fundamentos de funcionamiento de maquinaria (FMO). Moline, Illinois, USA, John Deere, 1976. 368 p.
7. CAMPBELL, D.J., STAFFORD, J.V., BLACKWELL, P.S. The plastic limit as determined by the drop cone test, in relation to the mechanical behaviour of soil. *J. Soil Sci.* 31(1):11-24. 1980.
8. CHAMEN, W.C.T., COPE, R.E., PATTERSON, D.E. Development and performance of a high output rotary digger. *J. Ag. Engg. Res.* 24(3):301-318. 1979.
9. DRANSFIELD, P., WILLATT, S.T., WILLIS, A.H. Soil-to-impliment reaction experienced with simple tines at various angles of attack. *J. Ag. Engg. Res.* 9(3):220. 1964.
10. DUBROVSKII, A.A. Vibration engineering in agriculture (1968). English translation, Washington, USA, USDA, 1977. 248 p.

11. EGGEMULLER, A. Various studies with oscillating and rotating tools. (4 artículos en alemán), *Grundl. der Landtech.* 10:55-70. 1958 (English translation No. 228, Silsoe, Bedford, UK, NIAE); 10:70-88. 1958; 10:89-95. 1958 (NIAE translation No. 151); 11:81. 1959.
12. GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. Soil dynamics in tillage and traction. *Agricultural Handbook No. 316*, Washington, USA, USDA, 1968. 511 p.
13. GODWIN, R.J., SPPOR, G. Soil failure with narrow tines. *J. Ag. Engg. Res.* 22(4):213-228. 1977.
14. HENDRICK, J.G., GILL, W.R. Rotary tiller design parameters. *Trans ASAE*, Parts I-III, 14:669. 1971; Part IV, 17(1):4.1974; Part V, 21:658. 1978.
15. HETTIARATCHI, D.R.P. The present state of the theory of soil cutting. *J. of Terramech.* 2(1):63. 1965.
16. _____, WITNEY, B.D., REECE, A.R. The calculation of passive pressure in two-dimensional soil failure. *J. Ag. Engg. Res.* 11(2):89-107. 1966.
17. _____, REECE, A.R. Symmetrical three-dimensional soil failure. *J. of Terramech.* 4(3):45. 1967.
18. _____. The mechanics of soil cultivation. Silsoe, Bedford, UK, *Ag. Engg. Symposium, NCAE, Paper No. 3/245/C/28*, 1967. 9 p.
19. KEPNER, R.A., BAINER, R., BARGER, E.L. Principles of farm machinery. 3rd edition, Westport, Conn., USA, Avi, 1978. 486 p.
20. KOFOED, S.S. Kinematics and power requirements of oscillating tillage tools. *J. Ag. Engg. Res.* 14(1):54-73. 1969.
21. KOUWENHOVEN, J.K., TERPSTRA, R. Sorting action of tines and tine-like tools in the field. *J. Ag. Engg. Res.* 24(1):95-113. 1979.

22. McKYES, E. The calculation of draft forces and soil failure boundaries of narrow cutting blades. *Trans. ASAE*, 21(1):20-24. 1978.
23. O'CALLAGHAN, J.R., FARRELY, K.M. Cleavage of soil by tined implements. *J. Ag. Engg. Res.* 9(3):259. 1964.
24. OSMAN, M.S. The mechanics of soil cutting blades. *J. Ag. Engg. Res.* 9(4):313-328. 1964.
25. PAYNE, P.C.J., FOUNTAINE, E.R. The mechanism of scouring for cultivation implements. Silsoe, Bedford, UK, NIAE Technical Memorandum No. 116, 1954. 11 p.
26. _____. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *J. Eg. Engg. Res.* 1(1):23-50. 1956.
27. _____, TANNER, D.W. The relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. *J. Ag. Engg. Res.* 4(4):312-325. 1959.
28. REAVES, C.A., COOPER, A.W. Stress distribution in soils under tractor loads. *Agric. Engg.* 41(1):20-21, 31. 1960.
29. REECE, A.R. The fundamental equation of earth-moving mechanics. Symposium on Earthmoving Machinery, Inst. Mech. Engrs. Proc. 179, Part 3E, 1964-1965.
30. SCHOFIELD, A., WROTH, P. Critical state soil mechanics. London, McGraw-Hill, 1968. 480 p.
31. SINEOKOV, G.N. Design of soil tilling machines. (1965), English translation, Washington, USA, USDA, 1977. 407 p.
32. SPOOR, G. Design of soil engaging implements. Parts I and II, London, Farm Machine Design Engg., 3:22-25, 28. 1969.
33. _____. Fundamental aspects of cultivations. In Technical Bulletin No. 29, Soil physical conditions and crop production, London, MAFF, HMSO, 1975. pp. 128-144.

34. _____ . Series of articles on subsoilers. London, Power Farming, 54(9):14-15. 1975; 55(1):34-35. 1976; 57(9):18-20. 1978.
35. STAFFORD, J.V. The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. J. Ag. Engg. Res. 24(1):41-56. 1979.
36. TANNER, D.W. Further work on the relationship between rake angle and the performance of simple cultivation implements. J. Ag. Engg. Res. 5(3):307-315. 1960.
37. TERZAGHI, K. Theoretical soil mechanics. New York, Wiley, 1947.
38. TOMPKINS, F.D., BLEDSOE, B.L. Vibratory furrow opening tool for minimum tillage planters. Trans. ASAE 22(3):498-503. 1979.
39. TRAPP, A.D., ABRAHAMS, M., REECE, A.R. The performance of longitudinally vibrating earth cutters. J. Ag. Engg. Res. 19(4):371-390. 1974.
40. VERMA, B.P. Oscillating soil tools – a review. Trans. ASAE, 14(6):1107-1115, 1121. 1971.
41. WOLF, D., LUTH, H.J. Tillage equipment for clod-forming soils. Trans. ASAE, 22(5):1029-1032. 1979.



DISEÑO Y SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS PARA LAS OPERACIONES BÁSICAS DE LABRANZA

4.1 INTRODUCCION

En los capítulos anteriores fueron descritos los distintos parámetros del suelo que afectan su resistencia y los modelos de falla frente a las herramientas más simples. La mayoría de estos casos puede ser ya analizada teóricamente, llegándose a una predicción suficientemente precisa del comportamiento de la herramienta en un rango amplio de suelos, tal como se ha indicado por medio de las referencias bibliográficas de cada capítulo. La predicción exacta del comportamiento de las herramientas de formas más complejas, pero aún así comúnmente empleadas en la labranza del suelo, todavía no puede ser lograda de manera general.

A pesar de las limitaciones de las teorías aplicables, se presenta a continuación un análisis descriptivo que permite entender y predecir la forma de falla que ocasionaría una herramienta de una forma dada, para así apoyar su apropiada selección; la descripción y análisis servirá, asimismo, como un apoyo en el diseño de herramientas para una labor específica.

Cabe anotar que normalmente los criterios de selección y de diseño son distintos; un comprador selecciona la herramienta capaz de hacer la labor, sin romperse, en la forma más barata y que presente la menor resistencia al suelo, con el menor consumo de potencia y, consecuentemente, menor costo de operación. El fabricante, en cambio, diseña la herramienta para un bajo costo de producción y considera, por ejemplo, máxima resistencia de material con un peso mínimo, facilidad de fabricación, y otros.

Finalmente, debe señalarse que la forma de presentación de este capítulo ha sido desarrollada según los cursos de enseñanza de Spoor^{26,27} en el *National College of Agricultural Engineering*, Silsoe, Bedford, Inglaterra.

4.2 OPERACIONES BASICAS EN LA LABRANZA DEL SUELO

La primera consideración para cualquier labor en el suelo es su consistencia y, como se indicó en el Capítulo 2, ésta depende de varios factores, entre los cuales la humedad es la más importante (véase numeral 2.6). El contenido de humedad afecta la resistencia relativa de la masa del suelo, los terrones y el deslizamiento suelo/interfaz, tal como se indicó en la Fig. 34 (véase Fig. 60). Esto significa que la humedad determina la factibilidad de cada operación básica y raramente se puede realizar una operación dada en más que uno de los estados físicos del suelo: cementado, friable, plástico y líquido.

La mayoría de las labores del suelo es muy compleja; por ello se pretende, a continuación, dividir las en sus operaciones básicas²⁶:

- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| a. Estallamiento | f. Mezcla |
| b. Compactación | g. Movimiento |
| c. Desintegración | h. Emparejamiento |
| d. Corte | i. Anclaje (un caso especial) |
| e. Inversión | |

Esto permite reconocer la forma necesaria de una herramienta para cumplir una o más de estas operaciones y así facilitar su diseño o selección apropiados en la práctica.

4.3 OBJETIVOS DE LAS OPERACIONES BASICAS Y LA INFLUENCIA DE LA CONSISTENCIA DEL SUELO

4.3.1 Generalidades

El Cuadro No. 5 presenta un resumen de los objetivos de las operaciones básicas y de la consistencia necesaria del suelo para permitir el laboreo, según un estudio²⁷ de la Fig. 60.

4.3.2 Estallamiento

El objeto de esta labor es disminuir la densidad en masa del suelo (D_b) con un mínimo de esfuerzo. En general, esto se puede lograr trabajando el suelo cerca del límite de contracción o sobre el límite superior de plasticidad, cuando la resistencia de la masa del

CUADRO No. 5. Consistencia del suelo y las herramientas típicas para las operaciones básicas del suelo.

OPERACION BASICA	OBJETIVO	CONSISTENCIA DEL SUELO OPTIMA	RESISTENCIA SUELO/SUELO Y SUELO/INTERFAZ (Valores relativos - véase Fig. 60 y Capítulo 2)			HERRAMIENTA TIPICA PARA CUMPLIR LA OPERACION
			Masa del suelo (óptima)	Terrones (óptima)	Suelo/Metal	
Estallamiento	Levantar ligeramente o estallar el subsuelo para provocar grietas extensas.	Friable (rango bajo)	Similares			Subsoidador con alas o dientes angostos de 45°
C O M P	Compactar por medio de la destrucción de la estructura del suelo formando una capa impermeable y superficie blanda.	Plástica (rango bajo) o Líquido	Alto Muy bajo	Muy bajo Muy bajo	Alto Bajo	Riestra de discos Cultivador giratorio
A T A	Formar un hueco continuo para drenaje o profundidad con suelo suelto y permeable encima.	Friable (superficial) Plástica (a profundidad) (rango bajo)	Bajo Alto	Variable Bajo	Bajo Alto	Arado de topo
C J O N	Rearreglar los aglomerados del suelo para llenar los poros grandes con aglomerados pequeños y así aumentar la densidad en masa del suelo.	Friable (rango bajo)	Bajo	Alto	Bajo	Riestra de clavos que puede ser vibratoria
Desintegración	Reducir el tamaño de los terrones por medio de rotura.	Friable	Alto	Bajo	Alto	Rodillo Cultivador giratorio
Corte	Normalmente se realiza en conjunto con una otra operación y el objetivo varía.	Cualquiera	Bajo	Variable	Bajo	Depende de las demás operaciones realizadas.

CUADRO No. 5. (Cont.)

Inversión	Invertir el suelo para enterrar capa y/o materia superficial.	Alto	Variable	Bajo	Arado de vertedera
Mezcla	Mezclar capa y/o materia superficial con los estratos inferiores.	Bajo	Variable	Bajo	Cultivador giratorio Diente angosto de 45° Plastr de discos
Movimiento	Trasladar el suelo a corta, mediana o larga distancia. El objetivo es variable.	Bajo	Variable	Bajo	Surcador, etc. (corta distancia) Cuchilla ancha (mediana distancia) Cargador-transportador (larga distancia)
Emparejamiento	Nivelar la capa superficial	Bajo Muy bajo	Variable Muy bajo	Bajo	Nivelador (<i>Land plane</i>) Tablón o rastro de clavos suspendidos
Anclaje	Objetivo variable, pero normalmente para formar rápidamente un anclaje firme pero provisorio.	Alto	Variable	Variable	Oruga Diente ancho de unos 45° con plancha horizontal al frente.

suelo al esfuerzo de corte y al deslizamiento presentan valores mínimos. Pero en la práctica, con el suelo cementado o con el suelo líquido, es difícil de trabajar, por lo que se debe seleccionar la zona en que el suelo esté friable, en las proximidades del límite de contracción (Fig. 60).

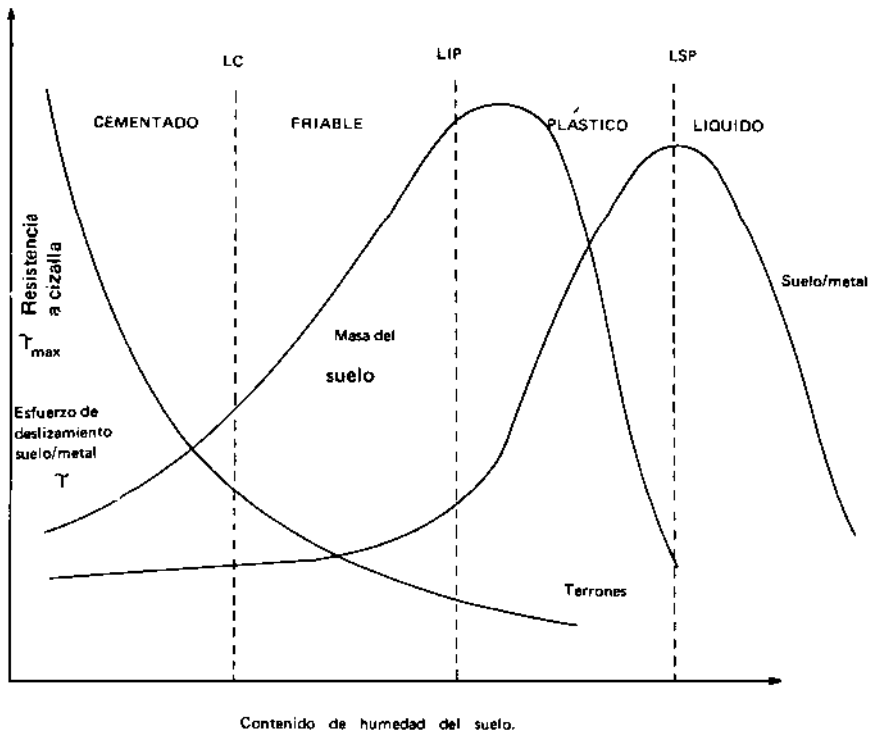


Fig. 60. Relación del contenido de humedad del suelo con la resistencia de los terrones, la masa del suelo y al deslizamiento en el interfaz suelo/metal²⁷.

4.3.3 Compactación

Esta operación básica puede presentarse en situaciones diferentes, como por ejemplo:

- a. Preparación de suelo para arroz.
- b. Drenaje subterráneo.
- c. Rearreglo del suelo para la preparación de camas de semilla o la construcción de embalses y caminos de tierra.

4.3.3.1 Compactación en la preparación de arrozales

Lo fundamental es destruir terrones en la superficie con el fin de producir una cama y una capa impermeable que retengan el agua. Estas condiciones pueden ser logradas tanto con suelos de consistencia friable próxima al límite de contracción (arrozales en secano) como en estado plástico sobre el límite inferior de plasticidad (arrozales bajo inundación) siendo preferible éste último ya que se asegura un óptimo sellamiento del suelo a cierta profundidad. Se debe tener presente que en el límite superior de plasticidad la resistencia al deslizamiento es grande y que a medida que aumenta la humedad sobre este límite el esfuerzo disminuye. También cabe anotar que con el suelo líquido no se obtendrá resultados positivos de compactación, por lo que es importante coordinar la inundación del arrozal con la labor de fanguero.

4.3.3.2 Compactación en el drenaje subterráneo

Esta labor consiste en producir canales bajo la superficie del suelo con el propósito de facilitar el drenaje. La construcción de dichos canales se efectúa con un arado de topo, el mismo que trabajará con el suelo en estado plástico como única forma de asegurar la estabilidad de los canales. El contenido de humedad óptimo para el trabajo del topo se encuentra en el sector de estado plástico, próximo al límite inferior de plasticidad, ya que la cohesión superficial y la resistencia de la masa del suelo son máximas (Figs. 26 y 60).

Por otra parte, el trabajo del brazo o soporte del subsolador es importante^{12,17}, y es óptimo cuando el suelo se encuentra en estado friable en el sector sobre el canal (Fig. 61).

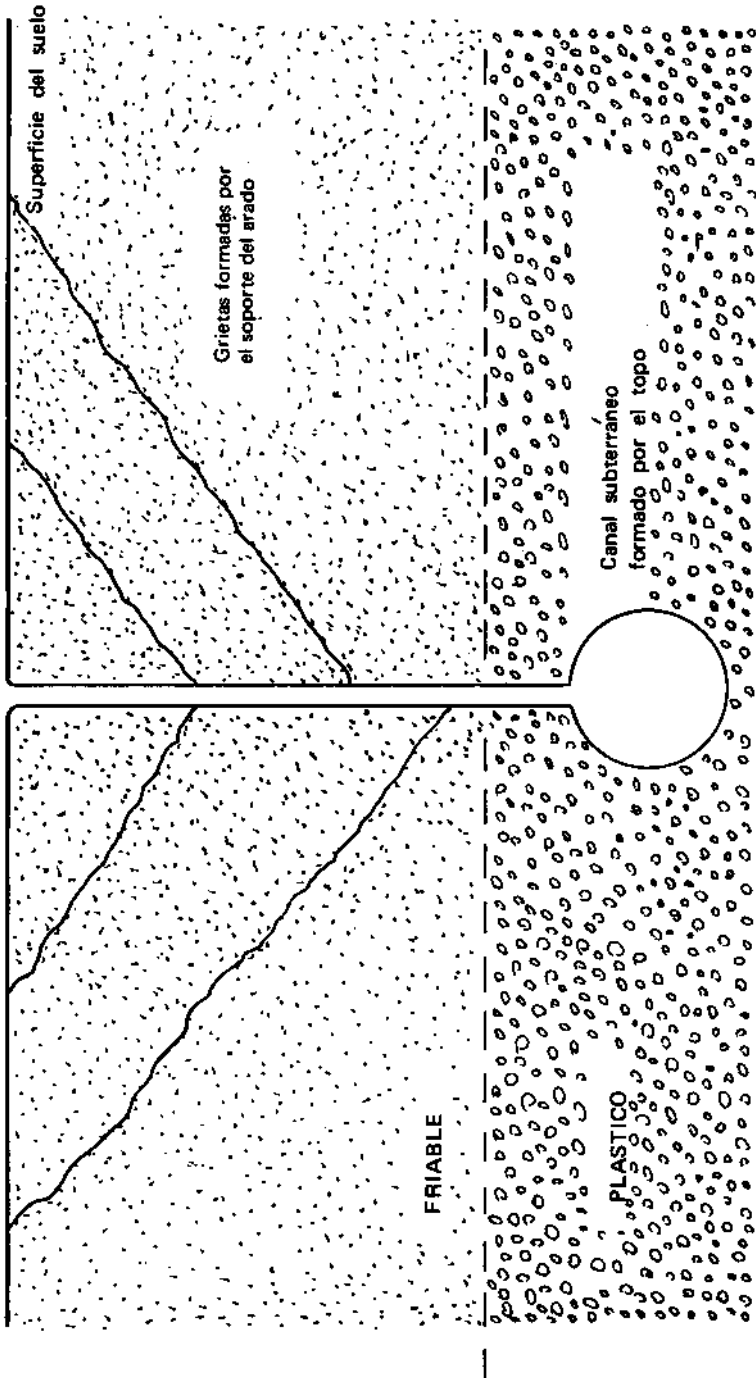


Fig. 61. Formación de grietas por el arado de topo en la zona friable para acomodar infiltración del agua y drenes subterráneos en la zona plástica.

En un suelo pesado con número de plasticidad elevado, (véase numeral 2.5) es posible construir 'drenes' durante más tiempo en el año que con un suelo de bajo número de plasticidad, debido a que existe un rango más amplio de humedades del suelo al mostrar esa plasticidad, pero debe anotarse que estos suelos pueden también permanecer demasiado húmedos en la superficie, lo que elimina la zona en estado friable; esto probablemente hace imposible el establecimiento con sólo un subsolador, de un sistema de drenaje^{1 2}.

4.3.3 Compactación por rearreglo del suelo

En el caso de la preparación de una cama de semilla la compactación requerida pretende aumentar la densidad del suelo por medio de un rearreglo de las partículas y agregados más que por destrucción y desmenuzamiento de ellos. Esto se puede lograr ubicando las partículas y agregados pequeños en los espacios porosos grandes del suelo; la consistencia óptima para esta labor se encuentra alrededor del límite de contracción.

Por otro lado, para la construcción de embalses y caminos de tierra el objetivo es 'minimizar' la porosidad en todo el perfil, lo que implica la destrucción de la estructura y los agregados del suelo; por esto se debe trabajar en un estado de consistencia tal que la masa del suelo ofrezca mayor resistencia al esfuerzo de corte que la resistencia de los terrones, lo que se logra ventajosamente trabajando alrededor del límite inferior de plasticidad.

4.3.4 Desintegración

Esta es una labor clásica de preparación de una cama de semillas y consiste en reducir el tamaño de los terrones. Para llevarla a cabo se debe producir falla en los terrones, lo que se logra cuando la resistencia de éstos es menor que la de la masa del suelo; la Fig. 60 demuestra que ello ocurre en los estados de consistencia plástico y friable. En el estado plástico esto no conviene ya que el esfuerzo de deslizamiento aumenta, actuando negativamente en el requerimiento de fuerza de arrastre; de allí que sea preferible hacerlo con un suelo friable.

4.3.5 Corte del suelo

Esta operación básica se ocupa generalmente en labores como:

- a. Control de malezas y corte de rastrojos, para dejar una cubierta protectora.
- b. Corte vertical del prisma de suelo en arados de vertedera.
- c. Corte del suelo en labores de siembra.

4.3.5.1 Corte para el control de malezas

Para controlar malezas se debe considerar condiciones que permitan el trabajo de cuchillas a poca profundidad actuando paralelas a la superficie, lo que se puede conseguir adecuadamente en condiciones de suelo friable.

Un suelo cementado presenta alta resistencia al diente y un suelo plástico favorece el restablecimiento de las malezas, ocasiona remoldeo y una capa impermeable que también requiere una fuerza elevada.

4.3.5.2 Corte vertical

Para las labores de arado es importante asegurar un corte vertical del prisma de suelos, para lo que se utilizan discos cortadores o cuchillas fijas. Esto se puede efectuar tanto en condiciones friables como en condiciones plásticas.

4.3.5.3 Corte para la siembra

En el caso de la labor de siembra es común usar discos abridores para cortar el suelo; esta labor se ejecuta en forma eficiente en condiciones friables. Es altamente inadecuado trabajar en suelos en estado plástico, pues se produce sellamiento en las paredes del corte a causa de un remoldeo, lo cual perjudica el movimiento del agua y el desarrollo de las raíces, y permite el ataque de pájaros y gusanos que comen la semilla al no existir adecuado cubrimiento.

4.3.6 Inversión

Esta operación pretende fundamentalmente enterrar la parte superficial del suelo para controlar malezas, por lo que es importante que el prisma del suelo se invierta del todo y no se desintegre prematuramente. Lo anterior ocurre cuando se trabaja en suelos cementados en los que se producen grandes terrones que al rodar dificultan

una adecuada inversión (Fig. 60). La mejor consistencia para esta labor es la friable ya que aún cuando en el estado plástico el prisma también mantiene su forma, es negativo el aumento del esfuerzo de deslizamiento y se produce el problema de sellamiento o remoldeo en las superficies de corte.

4.3.7 Mezcla o incorporación

Esta labor básica consiste en mezclar o incorporar fertilizantes, plaguicidas, rastrojos o incluso estratos orgánicos superficiales al suelo. La labor se ejecuta con gran facilidad cuando el suelo está en estado líquido, y en forma razonablemente fácil con el suelo en estado friable.

4.3.8 Movimiento

Esta operación implica el traslado del suelo ya sea en labores de construcción de reservorios, nivelación de suelos o simplemente formación de estructuras tales como surcos, mesas y camellones. Para trasladar el suelo con bajo requerimiento de fuerza es importante tener valores bajos de resistencia al esfuerzo de corte de la masa del suelo, tales como para los suelos friables. Los suelos cementados o plásticos, en cambio, presentan mucha mayor resistencia a la herramienta.

4.3.9 Emparejamiento

El objetivo de esta operación es producir una superficie uniforme. El contenido de humedad para trabajar el suelo varía de acuerdo al objetivo de la labor. Para el caso de emparejar una cama de semillas en seco se debe trabajar con el suelo en estado friable. En el caso de requerir también una superficie impermeable, se debe laborar en estado plástico; en la inundación del suelo previo a la siembra de arroz se necesita trabajar con el suelo líquido.

4.3.10 Anclaje

Aunque se necesita desarrollar anclaje en un rango amplio de condiciones de suelo en el proceso de tracción, éste se alcanza óptimamente con alta resistencia de la masa del suelo, lo que se da en el estado plástico cerca del límite inferior de plasticidad (Fig. 60).

Lamentablemente esta condición no siempre coincide con los requisitos de las demás operaciones normalmente realizadas al mismo tiempo (por ejemplo: la necesidad de desarrollar la tracción para halar otra herramienta).

4.4 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO Y SELECCION DE LAS HERRAMIENTAS APROPIADAS PARA LAS OPERACIONES BASICAS

Al analizar el problema de diseño o selección de las herramientas de labranza del suelo es importante considerar algunos factores utilizados en la selección de una herramienta para una labor determinada; estos factores son descritos a continuación:

- a. Condición del suelo que debe ser obtenida con la operación, lo cual determina el tipo de herramienta que se va a utilizar.
- b. Condición inicial del suelo (véase el numeral 4.3 para las condiciones óptimas).
- c. Profundidad de trabajo.
- d. Requerimiento de fuerza de arrastre y potencia.
- e. Velocidad de operación.
- f. Costo de la herramienta.

Con el objeto de simplificar el problema se procederá a discutir aspectos del diseño de herramientas para operaciones básicas en forma individual, aún cuando en la práctica normalmente se utilizan herramientas que ejecutan al mismo tiempo dos o más operaciones básicas.

4.5 HERRAMIENTAS PARA PROVOCAR EL ESTALLAMIENTO

Estallamiento significa romper, quebrar y abrir el suelo aumentando su porosidad con el movimiento hacia arriba. Al efectuar la labor a profundidad también se puede destruir los estratos impermeables, como consecuencia de la compactación, y en la superficie se puede dejar las malezas sueltas y completamente desenterradas para



Fig. 62. Dos aspectos de un arado cincel con pequeño ángulo de ataque (*Vicon Ltd*).

que mueran y formen una capa de materia orgánica (*mulch*); por esta razón el estallamiento puede servir como base principal en la preparación de los suelos secos^{1 5}.

En la Fig. 44 se observó que en un diente con ángulo de ataque menor que unos 45° la fuerza resultante actúa hacia arriba, provocando estallamiento. La misma Fig. 44 y la Fig. 35 mostraron también que la fuerza de arrastre es baja para un ángulo de ataque en el rango de 15° hasta 50° , con lo que desde todo punto de vista se reconoce que la mejor herramienta para provocar estallamiento es la que tiene un ángulo menor de 45° .

Lamentablemente es difícil fabricar un diente de 20° para trabajar a profundidad (sin embargo véase Fig. 62) por el excesivo largo resultante y de allí que normalmente se seleccione una forma curva.

La Fig. 63 muestra un diente rígido bastante popular en Europa, mientras que en la Fig. 64 se observa un diente de resorte que también da una cierta vibración natural, apoyando así el mullimiento del suelo y una reducción en la fuerza de arrastre. Cabe anotar que el trabajar demasiado profundo con este diente en 'C' el suelo y el rastrojo se acumulan en el centro de la curva e impiden la labor de estallamiento.

Ante la necesidad de diseñar un diente bastante fuerte para trabajar a profundidad, Spoor^{2 8} sugirió incorporar alas en la punta del arado subsolador, el que efectivamente es un diente medio ancho con muy pequeño ángulo de ataque. La Fig. 65 muestra su acción mejorada y la Fig. 66 indica una herramienta comercial que combina la idea con cinceles de menor profundidad y permite provocar bastante estallamiento por todo el perfil del suelo.

Finalmente se debe destacar un aspecto del diseño: debido a que en el proceso de estallamiento el suelo se mueve hacia arriba, hay que eliminar cualquier obstáculo que pueda obstruir su flujo. La Fig. 67 revela la influencia que puede tener un diente demasiado cercano a las ruedas del tractor y la obstrucción que puede ocasionar la estructura misma de la herramienta (véase también la Fig. 65 para un buen diseño). Además, se debe tomar iguales precauciones en la ubicación de las ruedas de profundidad en la herramienta.

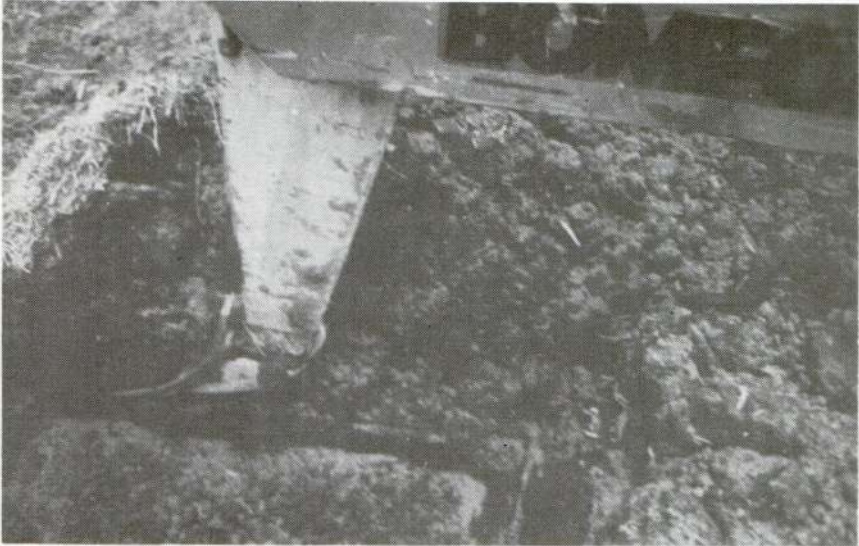


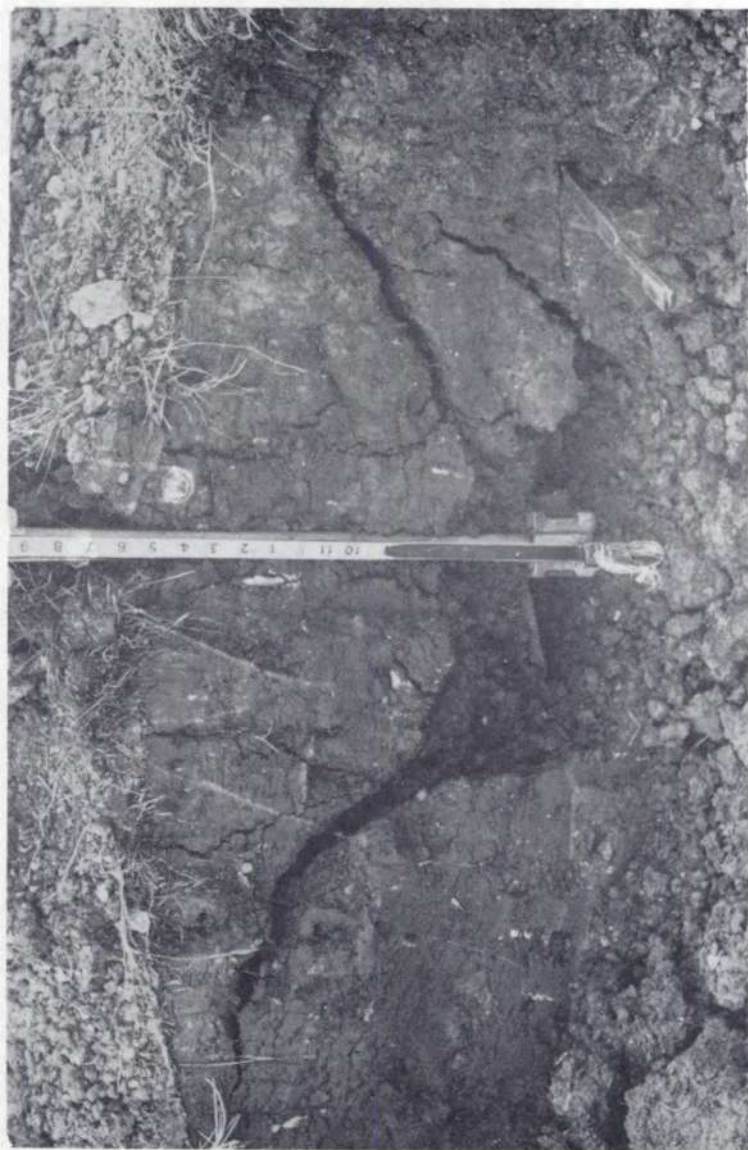
Fig. 63. Perfil que muestra la acción del diente de un arado cincel, provocando un estallamiento del suelo (véase también la Fig. 134).



Fig. 64. El uso de cincelos de resorte en la forma de 'C' para provocar el estallamiento y mullimiento del suelo. La materia orgánica queda en la superficie formando una capa protectora (John Deere -- Ponce Yepes, Quito).



(a) Un subsolador convencional de trabajo a profundidad provoca poco estallamiento.



(b) Un subsolador provisto de alas provoca un estallamiento en una zona amplia.

Fig. 65. El efecto del uso de alas en un subsolador para provocar el estallamiento (*Agricultural Press Ltd*).

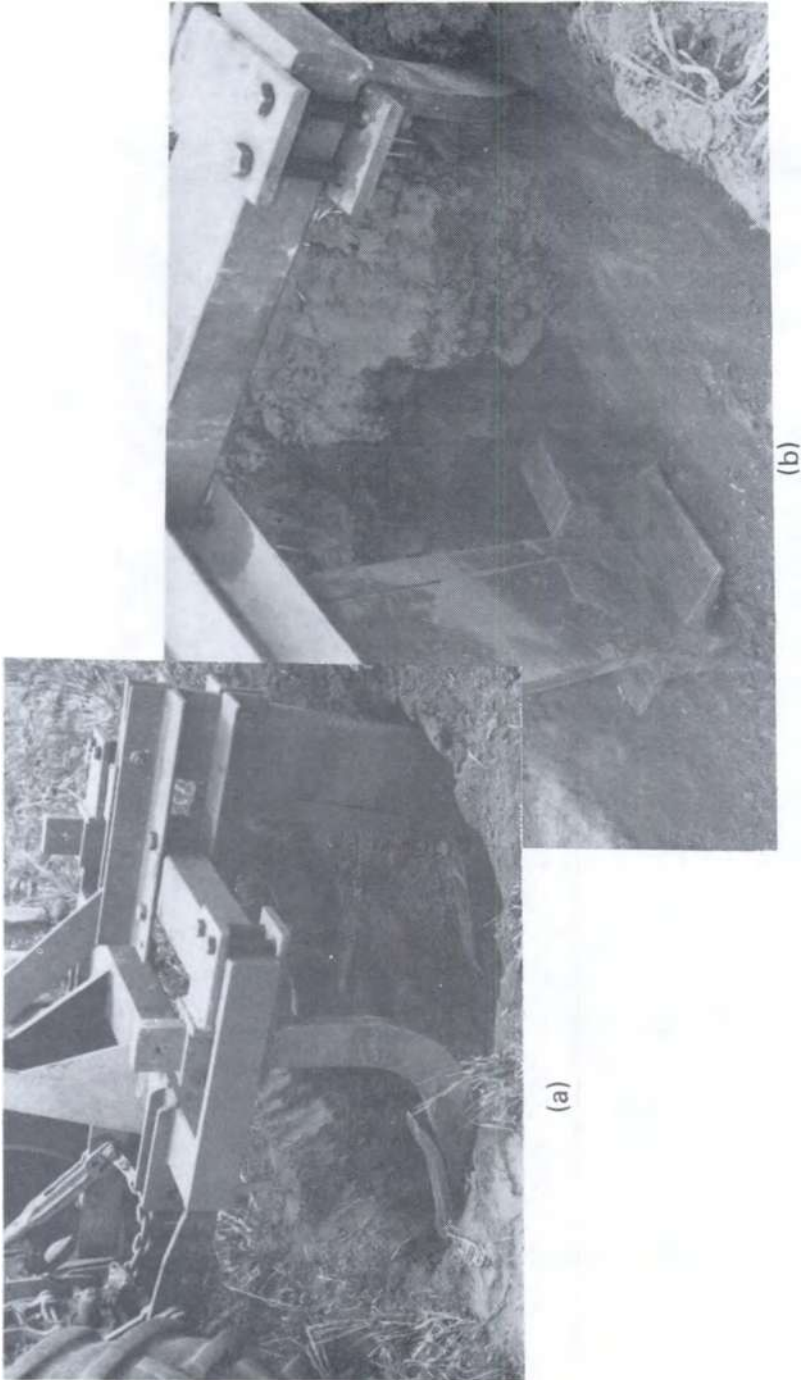
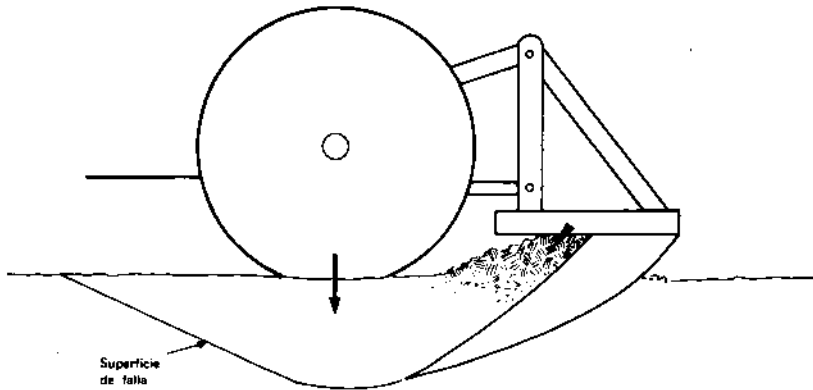
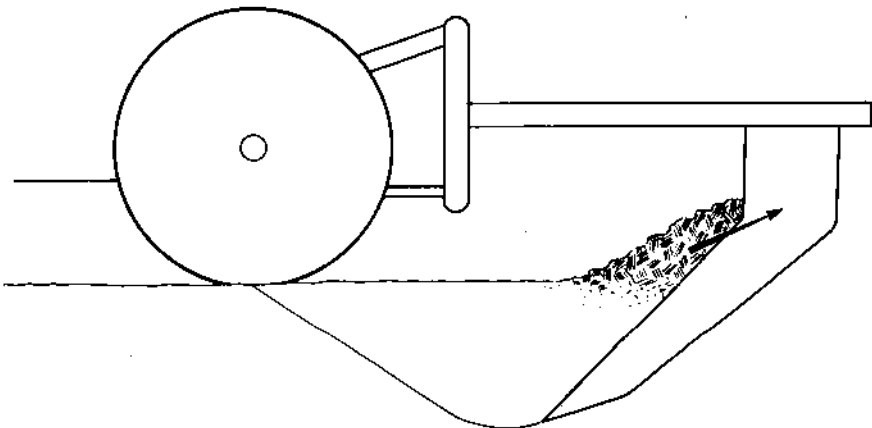


Fig. 66. Herramienta que provoca estallamiento por medio de una combinación de cinceles y subsolador con alas.

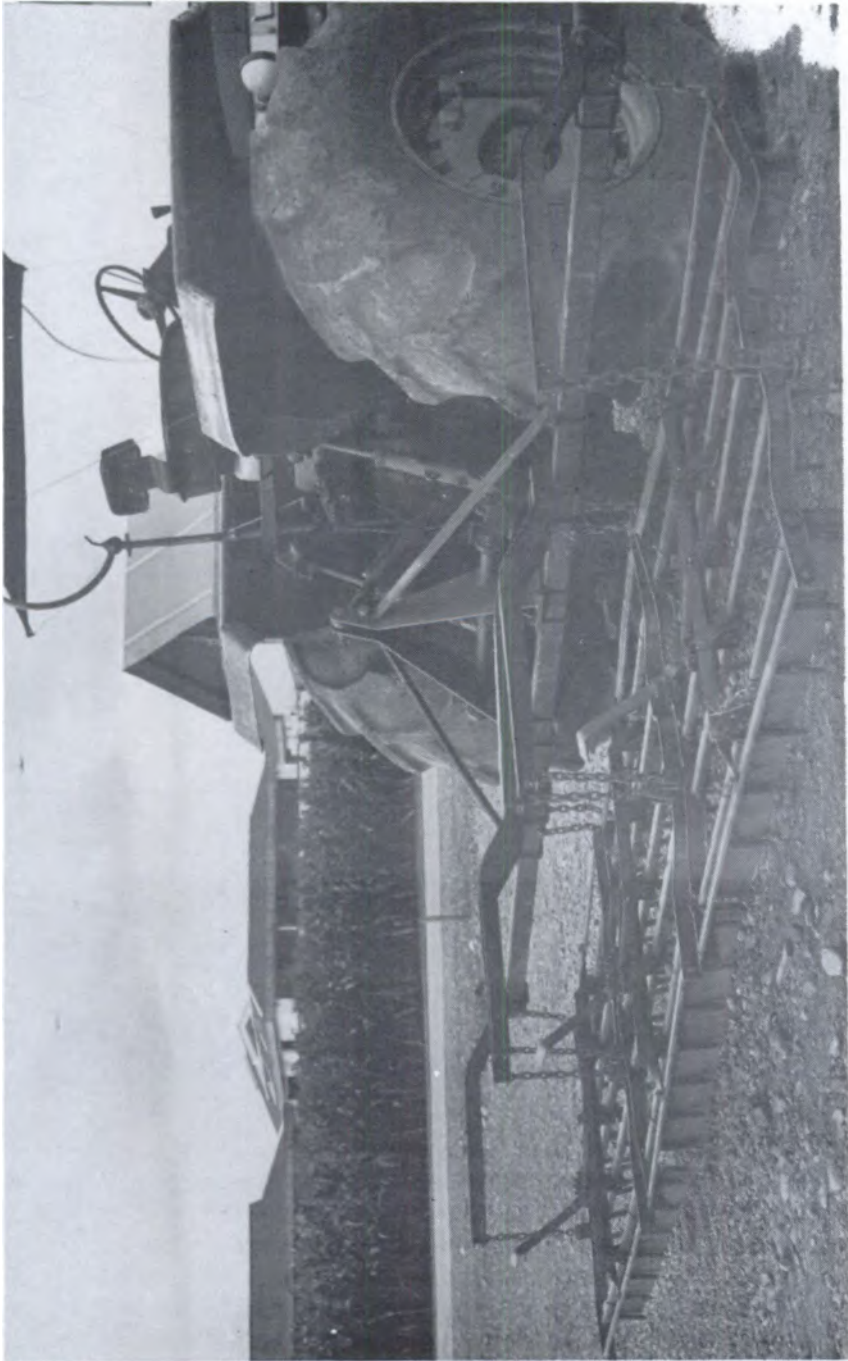


- a) Diseño inadecuado con rueda de tractor sobrecargando la zona de falla y la estructura de la herramienta impidiendo el flujo del suelo.



- b) Diseño esquemático que evita sobrecarga y permite el libre flujo del suelo.

Fig. 67. Manera en que el diseño de la herramienta puede afectar la fuerza de arrastre.



(a)



(b)

Fig. 68. Una rastra de clavos suspendida permite efectuar una nivelación del arrozal, después del fangueo con tractor y cultivador giratorio como se ilustra en la Fig. 237 (*Lloyd Johnson*).

4.6 METODOS PARA OCASIONAR LA COMPACTACION

Aunque la compactación representa uno de los problemas consiguientes de la mecanización agrícola, por el excesivo paso de tránsito (véase Capítulo 5), también en ciertas situaciones existe la necesidad de provocarlo, aspecto que se discute a continuación.

4.6.1 Métodos para la preparación de arrozales

Como se indicó en el numeral 4.3.3.1, existen dos métodos distintos en la preparación de arrozales — secano y bajo inundación. El primero realmente no involucra la compactación, salvo la ocasionada por la base del arado de vertedera que se introduce después de quemar el rastrojo de la cosecha anterior, y antes de las lluvias siguientes. Es normal también cruzar la aradura con una rastra de discos, y al iniciar las lluvias (y la siembra) se controlan las malezas por inundación o, en algunos casos, químicamente.

Los objetivos de la preparación para arrozales bajo inundación son varios pero pueden ser resumidos como sigue:

- a. Compactación de la base del arrozal para reducir pérdidas de agua por infiltración.
- b. Crear lodo encima del estrato impermeable para facilitar disponibilidad de nutrimentos a las raíces del arroz, y la exclusión de aire a las malezas para que se mueran y descompongan dentro del lodo.
- c. Sumergir, picar y mezclar en el lodo las malezas.

Igual que en los arrozales de secano se puede emplear arado y rastra pero las desventajas son la poca tracción que puede desarrollar el tractor y la poca compactación que dan las herramientas. De todas maneras, cabe notar que la rastra al trabajar en el suelo plástico/líquido sella la base por el deslizamiento lateral de los discos y por la acción al rodar. Las Figs. 68 y 237 presentan un sistema bastante aceptable en que el cultivador giratorio apoya el impulso del tractor, sumerge las malezas, compacta la base y crea un estrato de lodo. Finalmente el paso de la rastra de dientes suspendida efectúa una labor de nivelación del arrozal.

El influjo de la forma de las cuchillas en el cultivador giratorio es muy interesante y la Fig. 69 indica de manera simplificada las interacciones de la velocidad de avance, velocidad de giro y el ángulo de la cuchilla.

Hendrick y Gill¹³ presentan un análisis detallado del problema pero es suficiente aquí observar que en el caso de la superficie exterior de la cuchilla en contacto con el suelo resulta una compactación, lo que en esta situación es lo deseable. Generalmente ésta se alcanza de las siguientes maneras:

- a. Alta velocidad de avance (difícil de cumplir).
- b. Baja velocidad de giro.
- c. Angulo de ataque de la cuchilla reducida.

Por el contrario, un contacto primero del interior de la cuchilla provoca la desintegración, tema que se discute en el numeral 4.7.

Finalmente, cabe anotar que la práctica de utilizar sólo las ruedas de jaula del tractor para el fangueo en algunas regiones es muy peligrosa, dado que un volcamiento trasero es muy común al atascar el tractor en el lodo, con mínimas posibilidades de que pueda sobrevivir el operador en esta circunstancia (Fig. 236).

4.6.2 Herramientas para formar un drenaje subterráneo

En los suelos arcillosos se puede formar drenajes subterráneos muy fácilmente al forzar un cilindro, normalmente seguido por un tapón expansor, por el estrato en estado plástico, mientras que el soporte del cilindro trabaja en la capa superficial en estado friable provocando grietas extensas por medio de estallamiento (Fig. 61). El cilindro y el tapón compactan y remoldean las paredes del drenaje, el que normalmente tiene una vida aprovechable de cinco años o más antes de que se necesite repetir la operación. Cabe advertir que la labor no es factible en suelos arenosos ni tiene un efecto durable en los suelos francos, además de que para ser efectiva es imprescindible asegurar que los drenajes tengan salidas permanentemente abiertas a canales, o a veces a otros drenajes transversales permanentes construidos de lastre y/o arena (Fig. 70). Estos drenajes deben estar nivelados o ligeramente inclinados para provocar el flujo del agua.

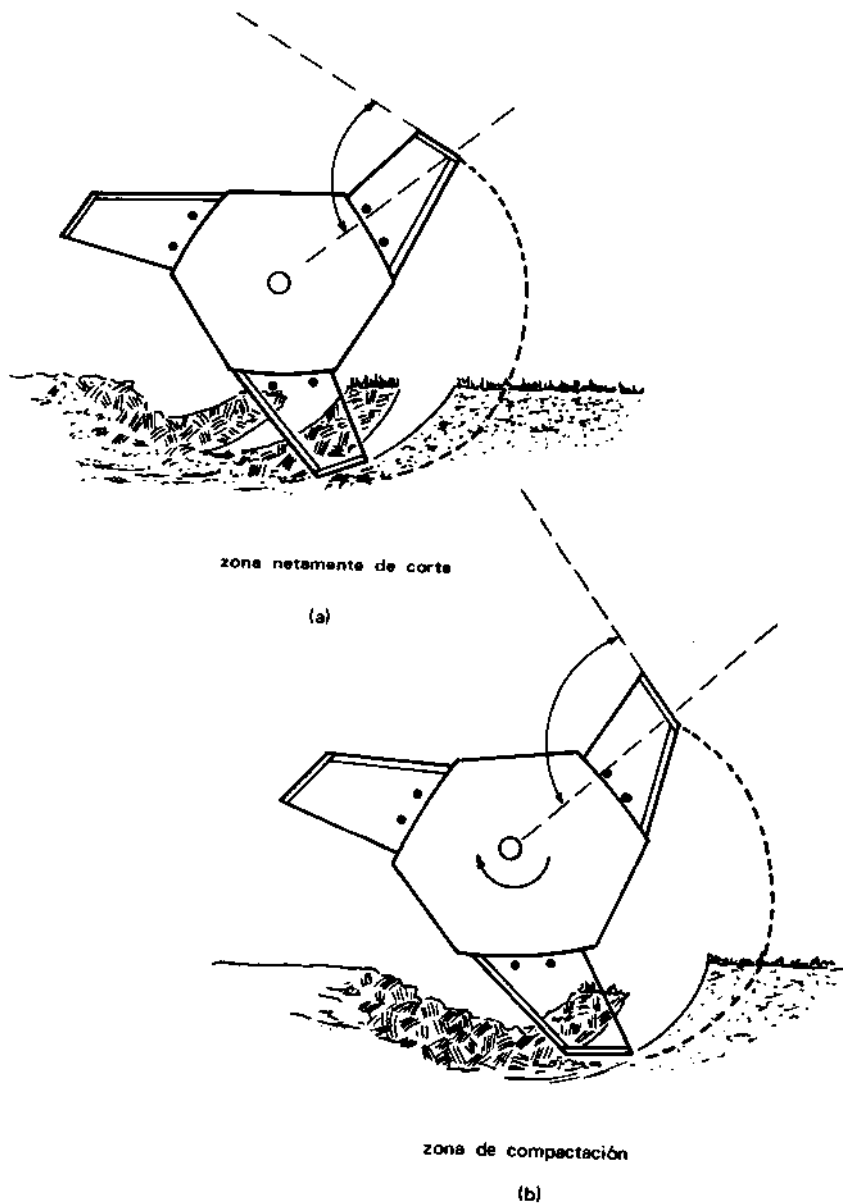


Fig. 69. Efecto del ángulo de las cuchillas del cultivador giratorio. Al aumentar éste o la velocidad de avance se puede producir una compactación del suelo, por ejemplo, para la preparación de arrozales.

La Fig. 71 presenta un diseño óptimo de la herramienta, el arado de topo, que permite realizar la labor y que incluye los siguientes aspectos^{5,10,26}:

- a. Chasis largo para permitir al topo mantener un curso recto y nivelado aunque la superficie puede ondular hasta cierto punto. Con un acople por los tres puntos del tractor, este curso se puede alcanzar con un diseño que da un punto de acople virtual (véase el numeral 7.1.3) bastante adelante del tractor, como se indica.
- b. Espacio entre el chasis y la superficie e inclinación del soporte del topo a 45° o menos para permitir y provocar un máximo estallamiento con mínimo de resistencia.
- c. Topo con punta para reducir la resistencia, y largo para asegurar que sigue un curso recto.
- d. Un tapón de expansión arrastrado para dar la forma final del hueco.
- e. Ausencia de una rueda de profundidad o un patín que ocasionaría al topo seguir el perfil de la superficie en vez de un curso recto.

4.6.3 Herramientas para compactar por rearreglo del suelo

4.6.3.1 Compactación de la cama de semilla

En el numeral 3.5.3 se observó que los dientes angostos de unos 90° tienden a mezclar los agregados grandes y pequeños en el perfil del suelo, los mismos que permiten llenar los poros grandes con los aglomerados pequeños y así provocar un cierto grado de compactación del suelo; una rastra de clavos, entonces, sirve para esta labor. Cabe anotar que con una baja velocidad de avance existe poca mezcla, mientras que una velocidad elevada puede ocasionar una dilatación y además provocar una desintegración que quizás no sea deseable. Una oscilación de los clavos en sentido de 90° a la dirección de avance apoya la desintegración pero afecta en forma adversa la compactación (Fig. 72).

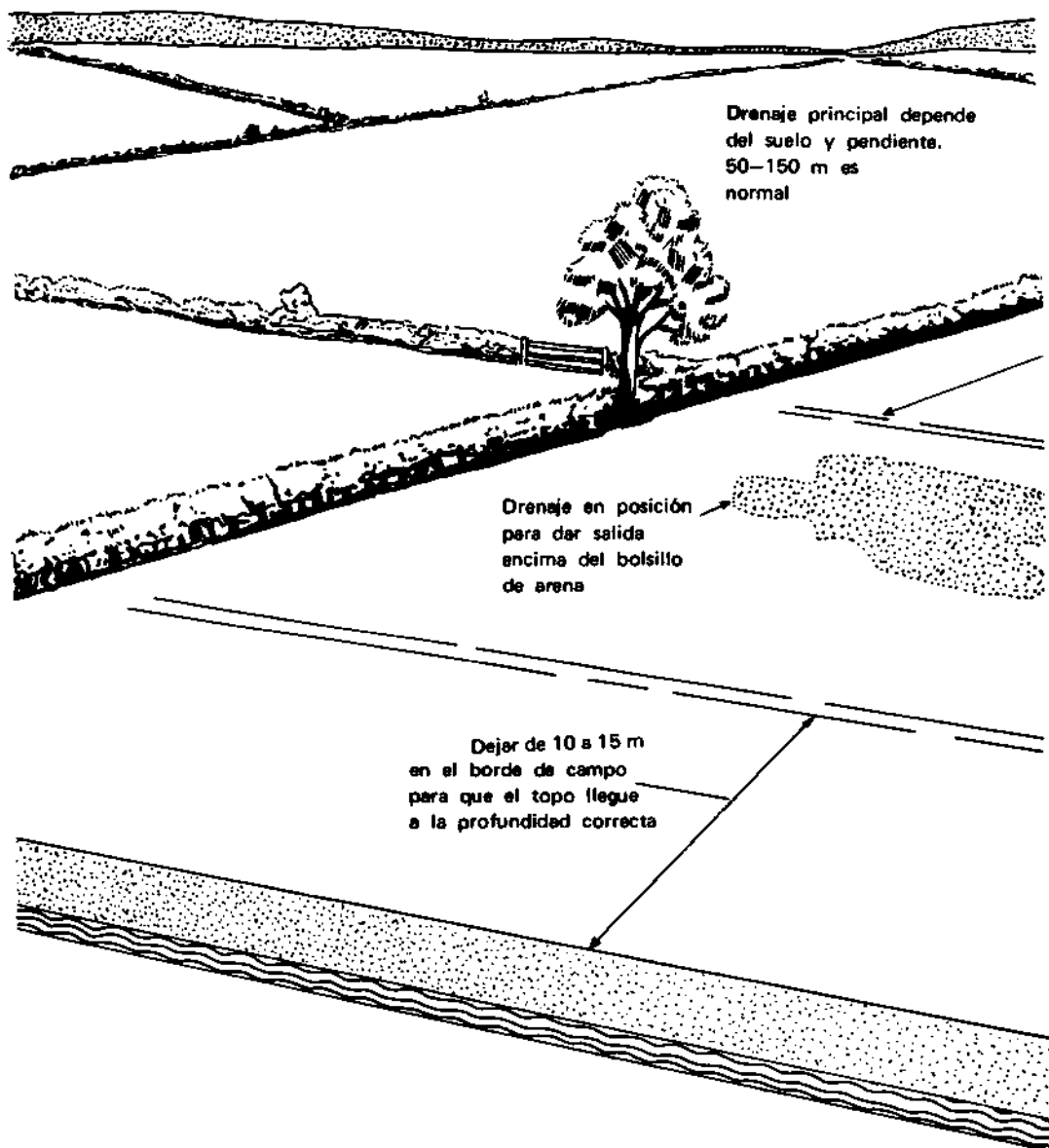
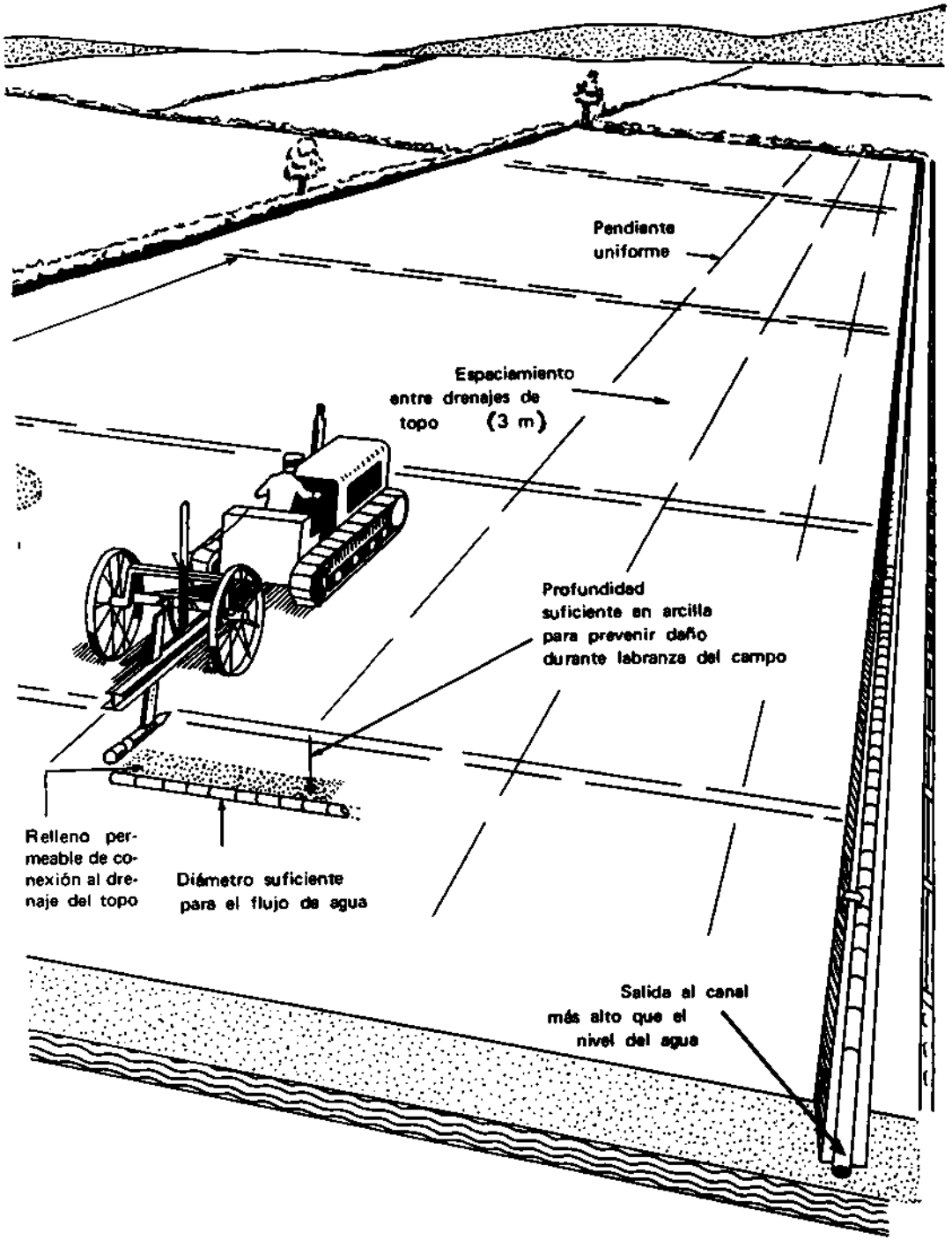
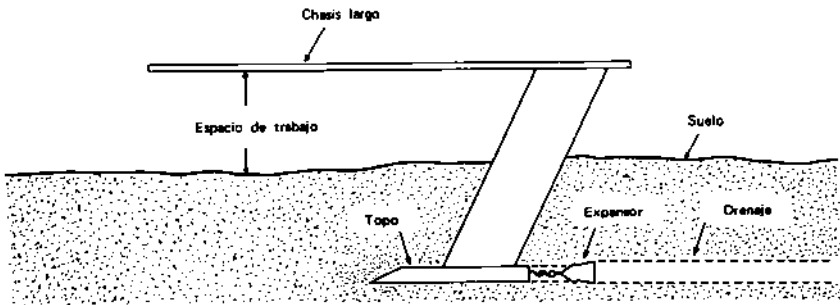
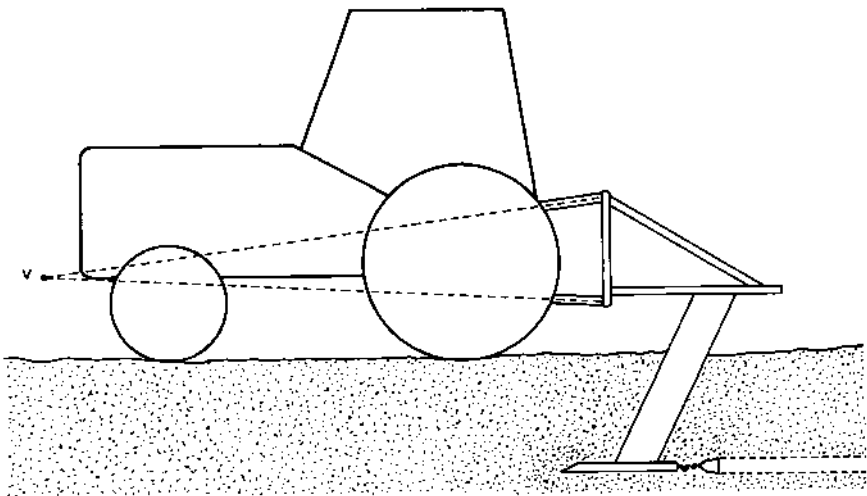


Fig. 70. Utilización del arado de topo para interconectar los drenajes principales de tubo y de canal en una instalación típica. (Bibliografía complementaria: *Getting down to drainage* — No. 11 *Mole drainage*, MAFF, London 1971).





- a) Con acople de tiro se necesita un chasis largo, para permitir construir un drenaje recto.



- b) Con acople por los tres puntos se debe asegurar un punto de acople virtual V (véase el numeral 7.4.2) bien en adelante, que tiene el mismo efecto que un chasis largo.

Fig. 71. Diseño óptimo del arado de topo para acople de tiro o por los tres puntos del tractor^{5, 10, 26}.

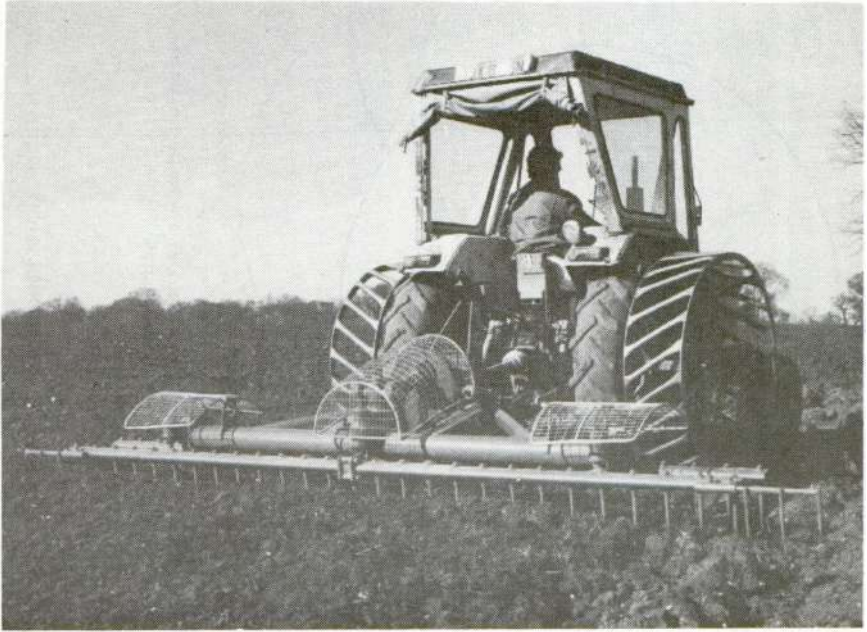


Fig. 72. Una rastra de clavos oscilatoria, con mando por el eje de toma de fuerza, permite una desintegración de los terrones en forma eficiente (*Vicon Ltd*).

El uso de un rodillo liso o corrugado apoya la compactación en el suelo superficial pero también puede ocasionar desintegración de los aglomerados grandes a velocidades mayores que unos 3 km/h. Es común en las plantadoras traer un par de ruedas metálicas o de caucho (Fig. 133), o un rodillo en el caso de algunas sembradoras (Fig. 139) para compactar nuevamente el suelo alrededor de la semilla recién sembrada. La Fig. 73 demuestra que una rueda o rodillo tiene el mismo efecto que un diente con ángulo de ataque muy grande, superando al mismo tiempo el problema de la fuerza de arrastre elevada.

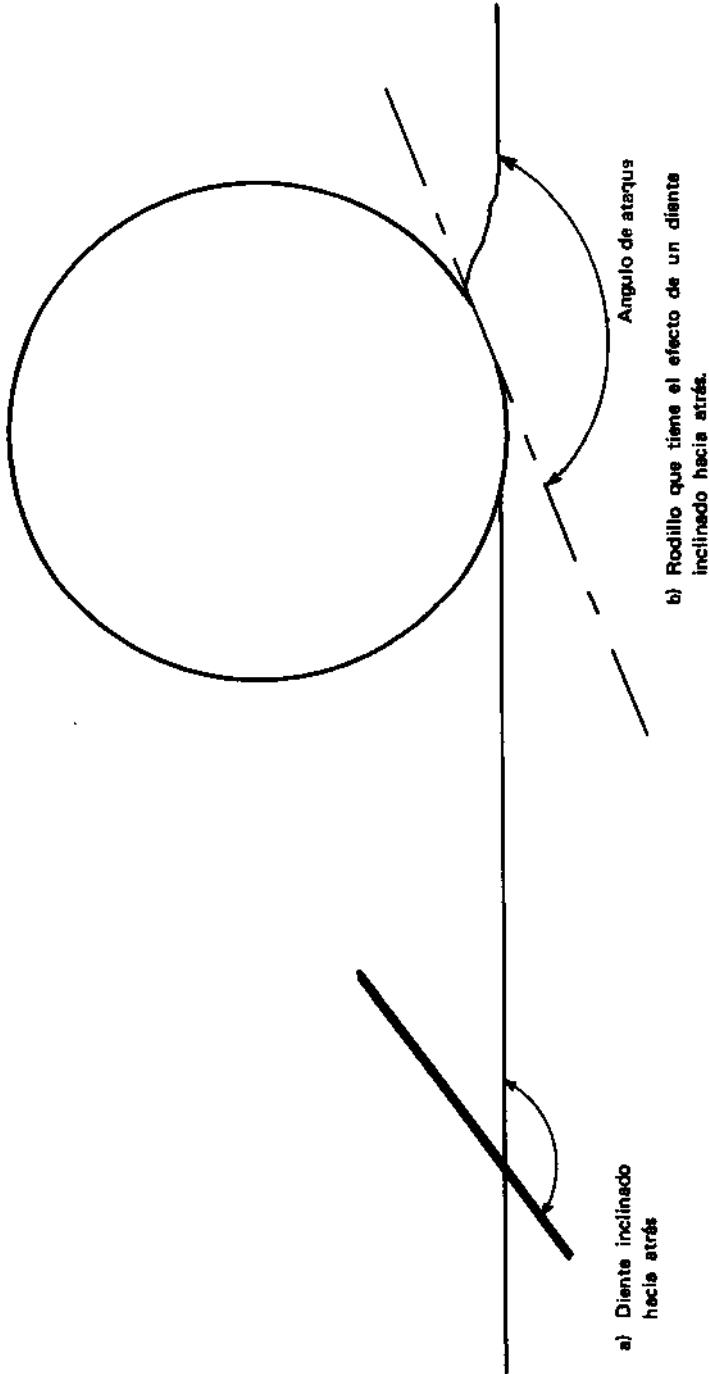


Fig. 73. Los dientes inclinados hacia atrás efectúan una labor de compactación, mientras se utiliza un rodillo con baja velocidad de avance.

4.6.3.2 Equipo para la compactación durante la construcción de embalses y caminos

La construcción de embalses y caminos demanda un alto grado de compactación para asegurar la estabilidad futura de la estructura; se debe romper los aglomerados y terrones grandes y eliminar los poros al máximo. En la Fig. 73 y el numeral 3.2.2 se demostró que aunque un diente inclinado hacia atrás produce compactación también tiene una alta resistencia, lo que puede ser solucionado por el uso de un rodillo. Un diámetro mayor reduce la resistencia al rodaje (véase el numeral 9.2.4) y aumenta el efecto de la compactación. El uso de caucho (neumáticos) en vez de los rodillos metálicos reduce el atascamiento del suelo húmedo y plástico, por ejemplo en los suelos arcillosos, mientras que la vibración del rodillo en una dirección perpendicular a la superficie (Fig. 74) contribuye a sobrecargar y compactar los suelos friccionales. También se utilizan rodillos con patas de cabra (Fig. 75) que permiten penetrar, con el efecto de la compactación, en los suelos muy resistentes, por ejemplo los arcillosos en estado cementado.

4.7 HERRAMIENTAS PARA LA DESINTEGRACION DEL SUELO

La desintegración del suelo es una de las operaciones básicas más comunes en la labranza, con la cual se logra romper los terrones y aglomerados grandes. Una operación previa de estallamiento (véase numeral 4.5) provoca una desintegración y además los dientes utilizados con un ángulo de ataque menor que unos 45° tienden a rearmar el suelo levantando los terrones y aglomerados grandes hacia la superficie y facilitando una operación subsiguiente netamente de desintegración.

La humedad del suelo es muy importante para permitir la desintegración y es óptima en el estado friable, en el que los terrones tienen mayor resistencia que la masa del suelo. En los suelos secos y cementados, por el contrario, solamente se puede romper los terrones por corte o a veces lanzándolos contra una pared, como se da por ejemplo con el uso de un cultivador giratorio (Fig. 56).

Las herramientas adecuadas para desintegrar los suelos friables incluyen los cultivadores giratorios de varios tipos (véase el numeral 3.7) y la utilización del concepto de un diente inclinado hacia atrás,



Fig. 74. Un rodillo vibratorio en sentido vertical para efectuar una compactación de suelo en obras de ingeniería civil.

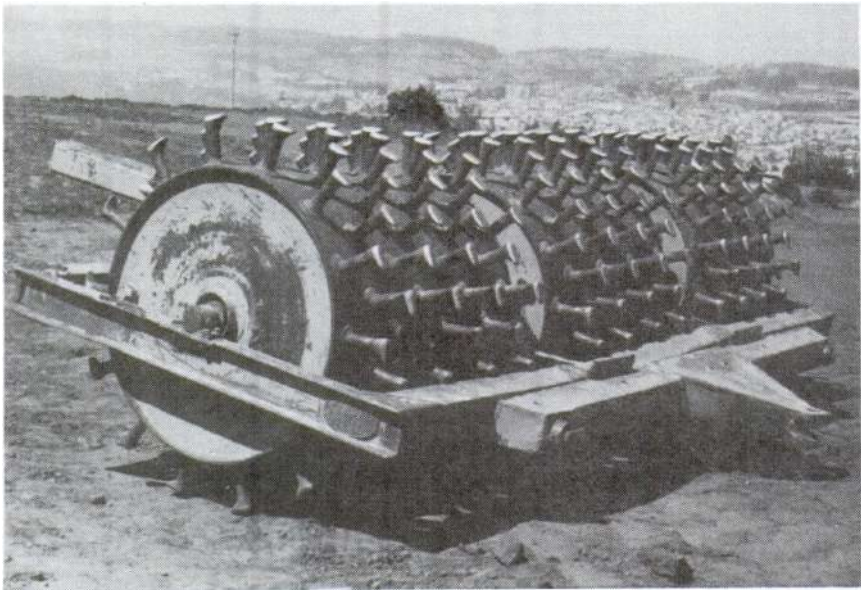


Fig. 75. Un rodillo de 'patas de cabra' utilizado para la compactación de suelo durante la construcción de caminos, embalses, otros.

o diente, disco o rodillo (Fig. 73). Este último causa una sobrecarga sobre el suelo (numerales 3.2.2 y 3.3) que rompe los terrones por su menor resistencia. Aumentando la sobrecarga ya sea por peso adicional en la herramienta o por una oscilación vertical sobre el diente, se mejora la desintegración en estos suelos friables.

La herramienta más común es la rastra de disco que combina la desintegración con el corte, y que es de utilidad en el caso de la existencia de mucha materia vegetativa superficial. La angulación de los cuerpos y forma de los discos (Fig. 76) pueden variar la agresividad de acción y la profundidad de penetración; además, se debe seleccionar un peso adecuado de acuerdo con el tipo de suelo y la acción deseada.

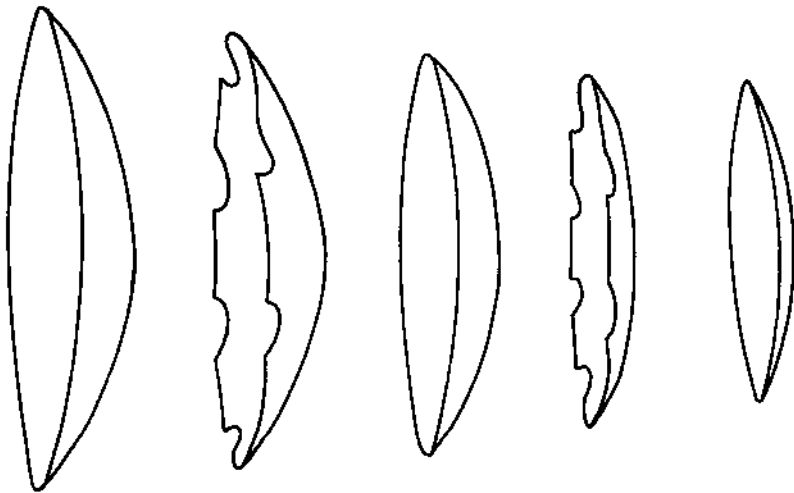


Fig. 76. Los distintos tipos de discos disponibles para provocar la desintegración del suelo. Los discos bien curvos efectúan menor corte pero mayor movimiento del suelo, mientras los discos cortados permiten penetrar por materia vegetativa superficial. Comúnmente, las rastras llevan un conjunto de discos cortados seguido por otro de discos lisos.

En términos generales se las puede clasificar de la siguiente manera (Fig. 77):

- a. Rastras livianas 15 – 30 kg/disco
 - b. Rastras medianas 30 – 60 kg/disco
 - c. Rastras pesadas 60 – 100 kg/disco
 - d. Rastras extra pesadas 100 – 700 kg/disco
- (tipo *Rome*)

El uso del cultivador giratorio fue discutido en el numeral 3.7 y la forma de las cuchillas en el numeral 4.6.1, mientras que un desarrollo del principio³ está descrito más adelante en el numeral 5.5.8 (Fig. 140). Generalmente los requerimientos para una buena desintegración son:

- a. Baja velocidad de avance.
- b. Alta velocidad de giro.
- c. Angulo de ataque de la cuchilla, suficiente para prevenir contacto de la superficie exterior.

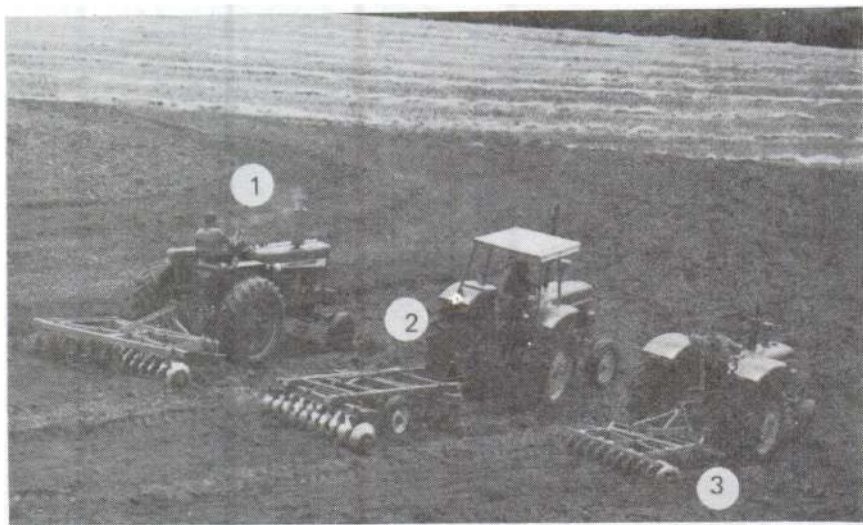


Fig. 77. Tres rastras medianas en trabajo, (1) acople integral de una rastra tándem de cuatro cuerpos; (2) acople de tiro de una rastra excéntrica con rueda de soporte; (3) acople integral de una rastra excéntrica.

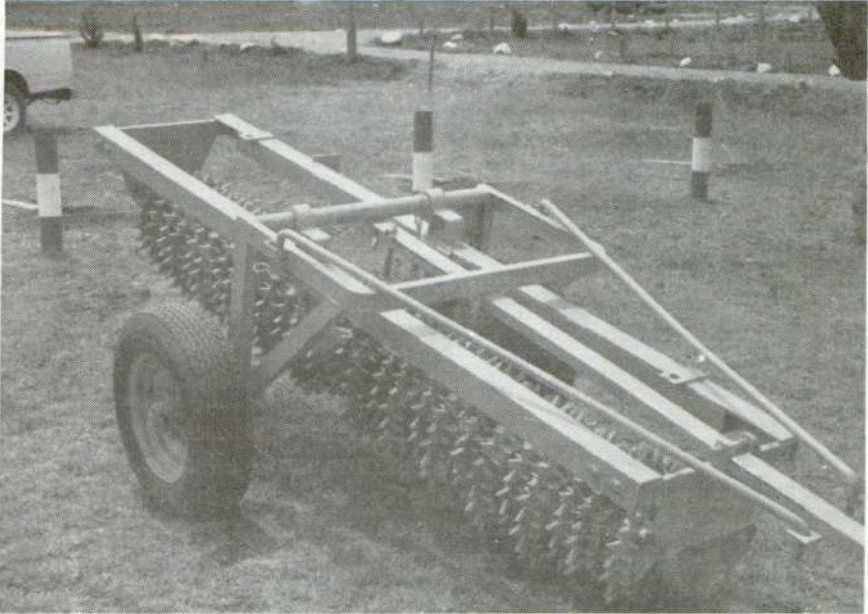


Fig. 78. Serie de rodillos excéntricos y dentados para romper terrones. La herramienta está suspendida en su remolque, para facilitar su transporte.

Finalmente, se mencionó el efecto de desintegración por los dientes angostos de 90° , especialmente al aplicar una oscilación horizontal (numeral 4.6.3.1 y Fig. 73). Un rodillo liso operado a una velocidad mayor que unos 3 km/h, desintegra el suelo y la acción es mejorada con un rodillo corrugado o dentado (Fig. 78). También se han utilizado conjuntos de ruedas estrelladas pesadas con puntas finas para quebrar los terrones cementados y muy duros³¹.

4.8 METODOS PARA EFECTUAR UN CORTE AL SUELO

Existen tres operaciones principales que implican un corte del suelo:

- a. Corte horizontal para el control de malezas.
- b. Corte vertical y horizontal durante la preparación del suelo.
- c. Corte para permitir la siembra.

4.8.1 Herramientas de control de malezas por medio de corte horizontal del suelo

Básicamente se puede controlar las malezas por medio de un corte por encima o debajo de la superficie del suelo. Una discusión del corte por encima se puede encontrar en Culpin⁸, Kepner^{1 6} y otros autores. En resumen, las herramientas consisten en segadoras de barra, tambor o disco, rozadores o guadañadoras y picadoras dotadas de un eje horizontal giratorio con una serie de cuchillas anguladas para cortar la vegetación; en esta sección se restringe la discusión a las herramientas que permiten control por medio de un corte por debajo de la superficie del suelo.

Generalmente el diseño de la herramienta depende del tipo de malezas, en cuanto a su sistema radicular, y se las puede dividir en tres grupos:

- a. Control de malezas con sistema radicular superficial y manejo de rastrojo.
- b. Control de malezas con raíces profundizadoras (mayor que unos 30 cm).
- c. Control de malezas rizomatomas perennes.

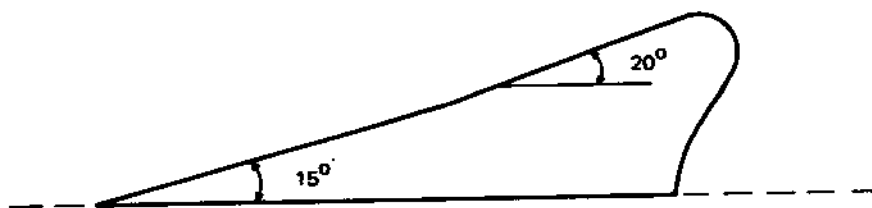


Fig. 79. Diseño de la cuchilla para cortar malezas superficiales y levantarlas a la superficie.

4.8.1.1 Malezas con raíces superficiales y rastreo

El método de control mecánico de éstas consiste en cortar el suelo en plano horizontal y levantarlas hacia la superficie, provocando la separación de suelo y raíces para que las malezas mueran. Obviamente, esto sólo ocurre en condiciones ambientales secas, pero el método permite una cobertura vegetativa para resistir los dos problemas principales de estas zonas: la pérdida de la poca humedad del suelo y la erosión eólica.

El diente debe tener un ángulo de ataque de unos 15° para facilitar el corte y levantar el suelo⁴. Generalmente tiene una ligera curva de hasta 20° ó 25° que, al operar la herramienta a velocidad, provoca la separación del suelo de las raíces (Fig. 79); por otra parte, el ángulo de acercamiento (vista de planta) y el traslape entre los dientes es muy importante (Fig. 80).

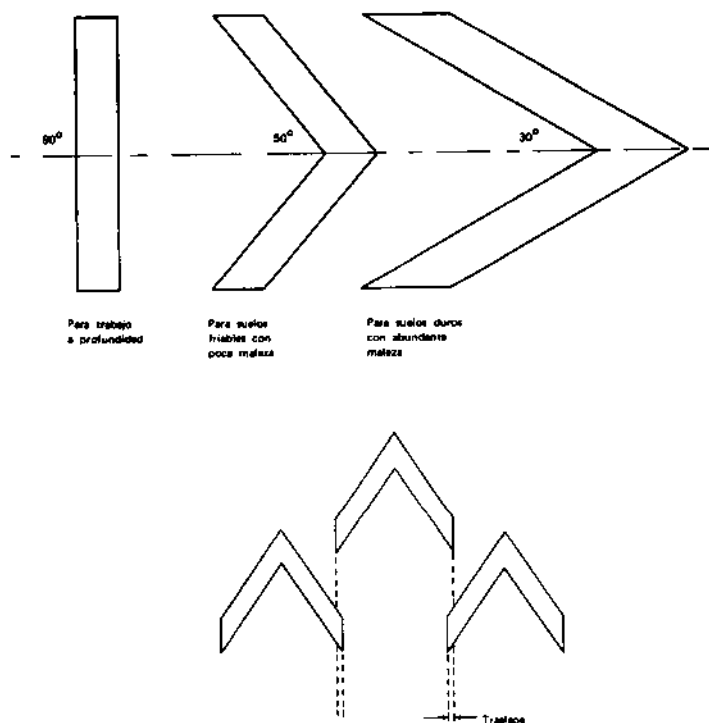


Fig. 80. La selección del ángulo de acercamiento y de la distancia de traslape de las cuchillas afecta la eficiencia de trabajo en las distintas condiciones del campo.

Aunque un ángulo de acercamiento de 90° efectúa el mejor corte, resulta que es difícil mantener una penetración adecuada cerca de la superficie. Por otro lado, un ángulo menor que 30° sí penetra, pero no corta las raíces, las que pasan por un lado de la cuchilla. Generalmente se encuentran los ángulos de acercamiento óptimos en 50° para suelos friables, y en unos 30° para suelos cementados, duros y difíciles de penetración⁴. En cuanto al traslape entre las cuchillas, se encuentra que unos 4 cm son adecuados en el caso de malezas con raíces débiles, mientras que 7 a 10 cm son el óptimo para las raíces más resistentes. La Fig. 81 muestra un cultivador equipado con cuchillas cortadoras de 27 cm de ancho, mientras que también se utilizan cuerpos hasta de casi 2 m, como se ilustra en la Fig. 137. El soporte de las cuchillas debe ser diseñado para que la vegetación atascada quede levantada, libre de la superficie (una curva en 'C' es ideal) y se pueda incorporar un disco cortador por delante del soporte, como se observa en la Fig. 137. Sial y Harrison²⁰ incluyen los resultados de algunas mediciones de las fuerzas que actúan sobre las cuchillas.

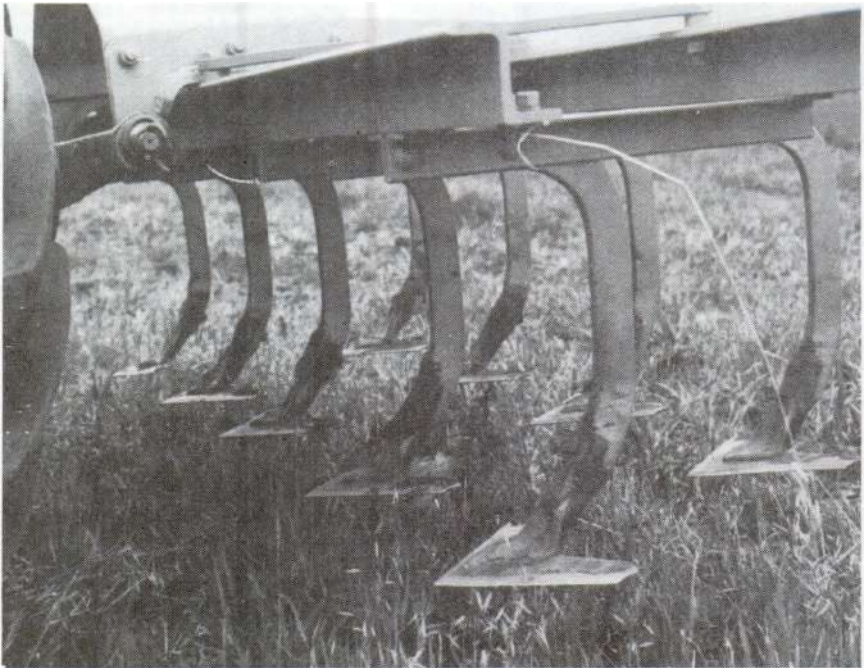
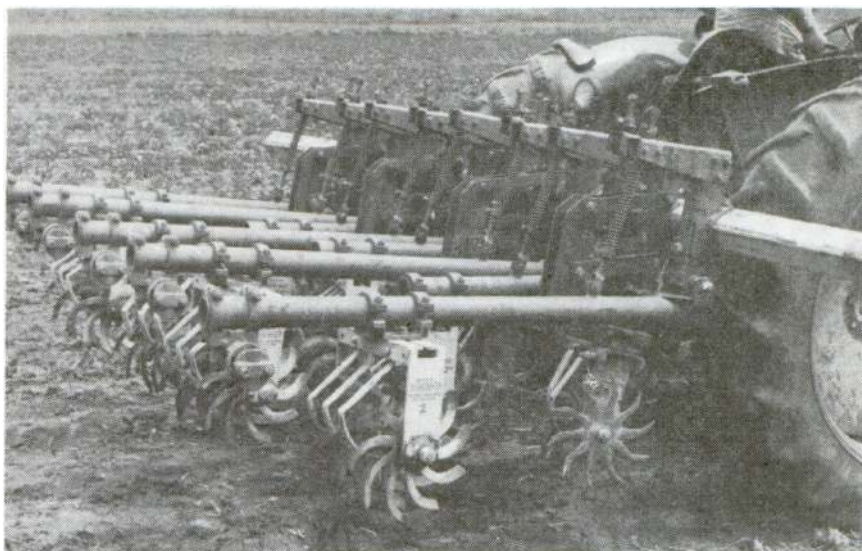
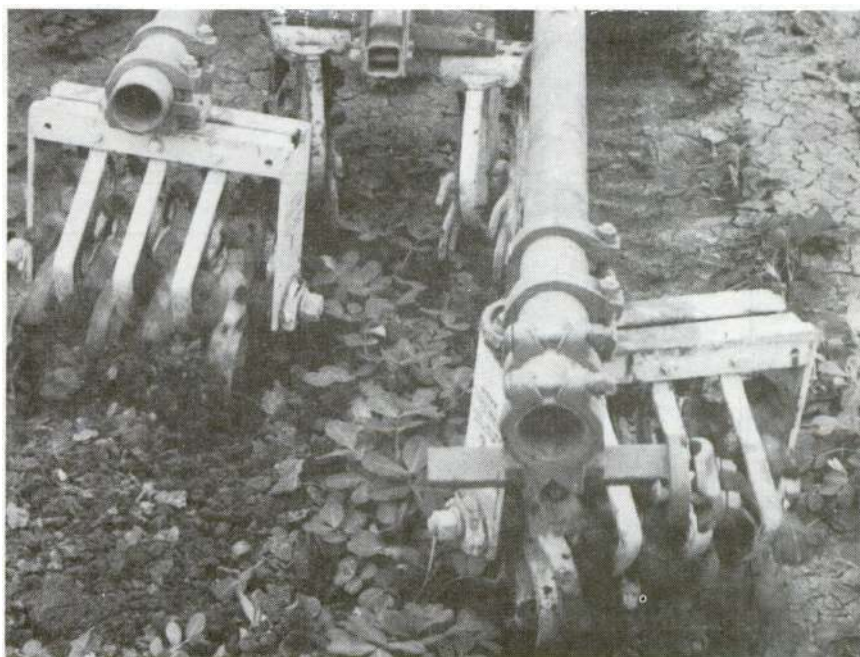


Fig. 81. Un cultivador con dientes en 'A' y escaso ángulo de ataque para cortar las malezas bajo la superficie, pero permitiendo la formación de una capa protectora.



(a)



(b)

Fig. 82. Un cultivador rodante ajustado para limpiar las malezas entre hileras.

Cabe señalar que el efecto en rastrojo es similar al caso de las malezas, ya que también queda en la superficie formando una capa protectora.

La Fig. 82 muestra una herramienta muy diferente, que penetra superficialmente el suelo y bota las malezas, limpias de suelo, por encima. La curva de los rodillos dentados penetra el suelo con un corte vertical y luego la maleza es levantada por el rodillo. La inclinación de los cuerpos de rodillos permite también realizar un movimiento lateral del suelo, formando surcos o camellones; normalmente estas herramientas son utilizadas para los controles secundarios, entre las hileras del cultivo establecido.

4.8.1.2 Malezas con raíces profundizadoras

Estas malezas son controladas en forma convencional con el arado, sea de vertedera, disco o tipo *rome* (rastra de discos extra pesada). Alternativamente se las puede controlar por el corte de las raíces a una profundidad de unos 25 cm, pero sin tratar de levantarlas hasta la superficie. La Fig. 83 ofrece dos distintos diseños, en los que el ángulo de ataque es solamente de unos 10° y el ángulo de acercamiento está entre 75° y 90° .

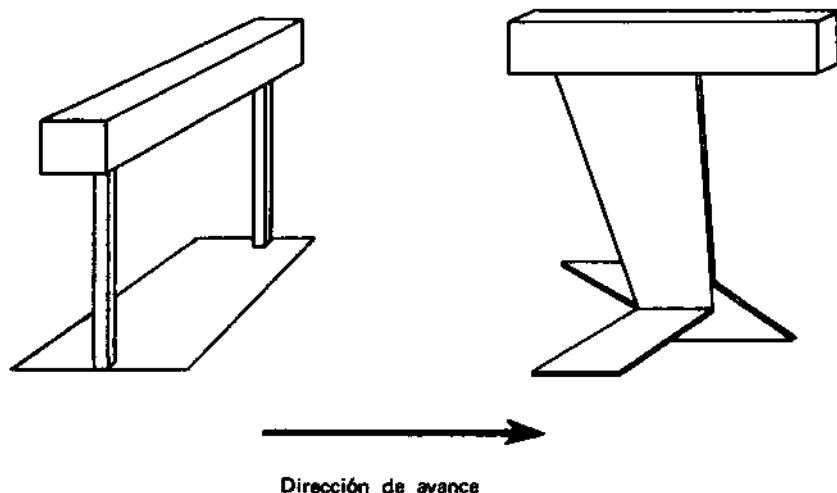


Fig. 83. Distintos diseños de la cuchilla para cortar malezas con sistema radicular profundo.

La Fig. 84 exhibe el uso del mismo principio, desarrollado en CIAT, Colombia, para facilitar la cosecha, a mano, de yuca. La cuchilla de ángulo de acercamiento de 90° y ángulo de ataque de 17° suelta los tubérculos y quiebra el suelo alrededor para así facilitar su cosecha en los suelos cementados y duros⁹. Igualmente, el principio es utilizado en las cavadoras de papa para soltar el suelo, apoyando así la limpieza al subir la cadena limpiadora (Fig. 85).

4.8.1.3 Malezas rizomatomas perennes

Para el control de malezas rizomatomas es necesario cortar los rizomas óptimamente, a fin de que cada trozo genere una nueva planta. Esta también debe ser cortada nuevamente al emerger, antes de que comience a elaborar reservas; desde este punto de vista resulta favorable el uso del cultivador giratorio, empleando una alta velocidad de giro y baja velocidad de avance.

4.8.2 Corte vertical y horizontal durante la preparación del suelo

En general, el corte vertical del suelo se realiza mejor usando las herramientas de gran ángulo de inclinación hacia atrás; para reducir la



Fig. 84. Herramienta desarrollada en CIAT (Colombia) para efectuar un corte horizontal, luego soltar el suelo alrededor de dos hileras de tubérculos de yuca con los platillos inclinados a 17° . Los tallos son previamente cortados con machete o un rozador giratorio y la cosecha se hace a mano (CIAT, Cali, Colombia).

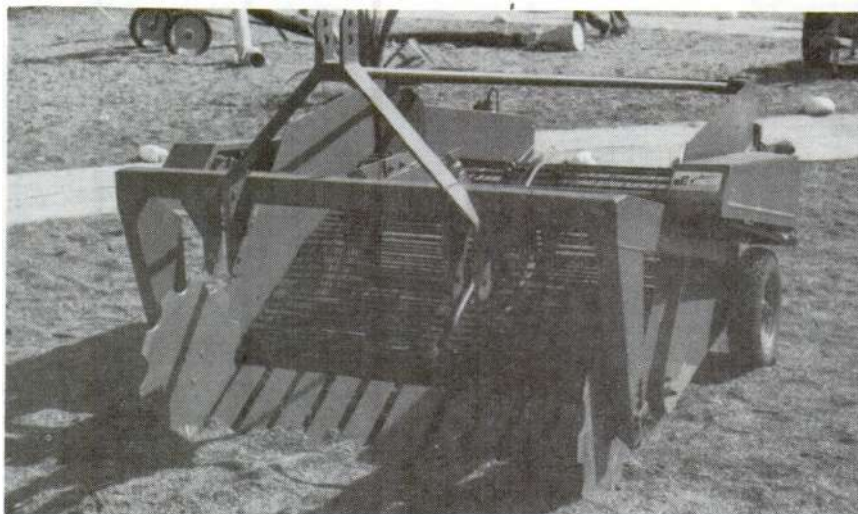


Fig. 85. Una cavadora de papas con una serie de cuchillas inclinadas para levantar los tubérculos hacia la cadena elevadora, donde una limpieza es realizada por vibración. Luego las papas son dejadas sobre la superficie para su recolección a mano.

resistencia normalmente se selecciona un disco (Fig. 73), el que debe ser construido de los aceros de liga para asegurar que se le puede mantener afilado y penetrar en los suelos duros (véase Fig. 77).

Para el corte horizontal se sigue los mismos principios ya señalados en los numerales 4.8.1.1 y 4.8.1.2. El corte horizontal más común ocurre con el uso del arado de vertedera descrito en el numeral 4.9. Básicamente se recomienda un ángulo de ataque de unos 15° (Fig. 95) y un ángulo de acercamiento de acuerdo con la profundidad y velocidad de trabajo, aunque generalmente en el rango de 30° a 45° (Fig. 96). También los arados y rastras de discos efectúan un corte horizontal que se cumple por una curvatura en el disco y una inclinación hacia la dirección de avance y, en el caso del arado, una inclinación vertical.

4.8.3 Corte para permitir la siembra

La preparación convencional del suelo, en que la cama de semilla está limpia de vegetación y terrones, no presenta mayores problemas al abrir un surco para la introducción de la semilla, supuesto que se controla la profundidad del trabajo. Estos suelos sueltos permiten el uso de azadas, zapatines y discos simples o dobles¹, como se observa en la Fig. 86.

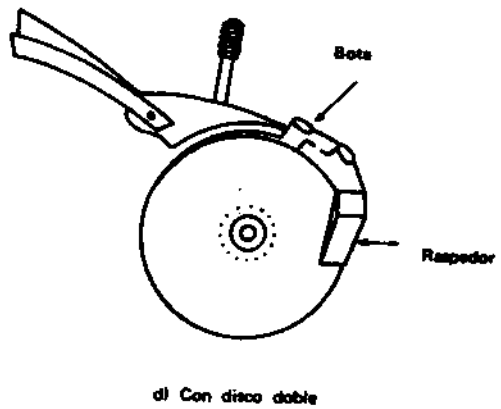
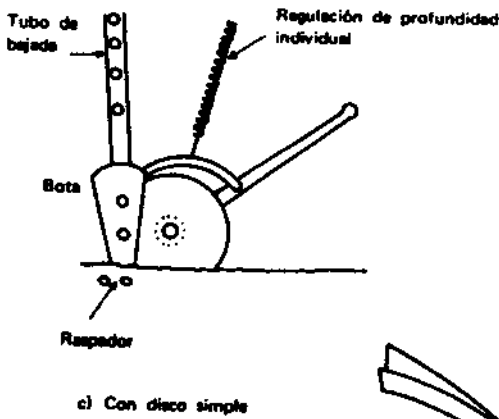
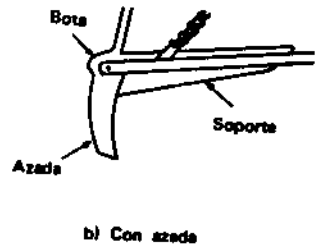
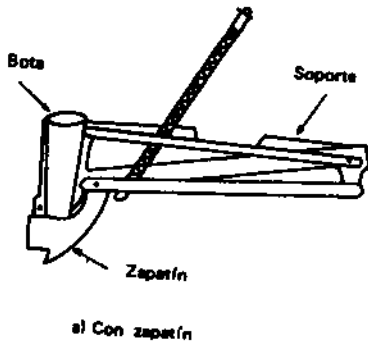


Fig. 86. Distintos diseños de abridores de surco para un sembrador de cereales¹.

Por otro lado, la introducción de los sistemas de cero labranza y labranza reducida con el manejo consiguiente del rastrojo traen problemas especiales. El uso de un abresurco triple disco puede penetrar la mayoría de coberturas (Figs. 87 y 133) pero tiene la desventaja de remodelar y así compactar las paredes del surco en condiciones húmedas que restringen la germinación de la semilla. Al considerar que un objetivo de cero labranza es permitir una siembra más temprana (véase el numeral 5.6), éste puede ser un factor limitante muy importante. La Fig. 88 representa una posibilidad para cortar los suelos casi plásticos, muy comunes en Escocia, donde el diseño fue desarrollado; asimismo se está estudiando las posibilidades de la vibración de dientes con pequeños ángulos de ataque^{2 9}.

La Fig. 89 muestra una herramienta desarrollada especialmente para la renovación de praderas, y que afecta el corte por medio de una serie de sierras girando a alta velocidad y equipadas con dientes de carburo de tungsteno^{2 3}.

El disco ondulado (Fig. 90) tiene ventajas para cortar coberturas y además labrar un poco el suelo antes de inyectar la semilla con un abresurco de doble disco. Normalmente se le utiliza en una labranza reducida después del paso de una rastra de disco, cultivadora de rastrojo (Fig. 137), entre otros.

Finalmente, se ha desarrollado una serie de sembradoras con ruedas dentadas que permiten inyectar la semilla por la cobertura; la Fig. 91 presenta una herramienta de tracción animal, manual o de tractor que fue desarrollada en el IITA, Nigeria^{3 0}.

4.9 HERRAMIENTAS PARA LA INVERSION DEL SUELO

La inversión completa del suelo sólo se puede realizar con efectividad al cortar un prisma y manipularlo cuidadosamente por la superficie curva de una vertedera hasta que ésta queda depositada a un lado en posición invertida (Fig. 92). La Fig. 93 ilustra esta inversión completa que puede ser alcanzada con el arado de vertedera, comparada con la inversión parcial que efectúa un arado de discos, clasificada para estos propósitos como una labor de mezcla (numeral 4.10).

El diseño del cuerpo de la vertedera es un asunto bastante complejo, por lo cual se orienta al lector hacia obras especializadas^{2, 11, 14, 16, 18, 22, 24}. En esta sección se limita la discusión a cubrir algunos aspectos generales que afectan la calidad de la inversión alcanzada.



Fig. 87. Un abresurco de triple disco que permite cortar la vegetación superficial durante la siembra con cero labranza (véase también las Figs. 133 y 141).

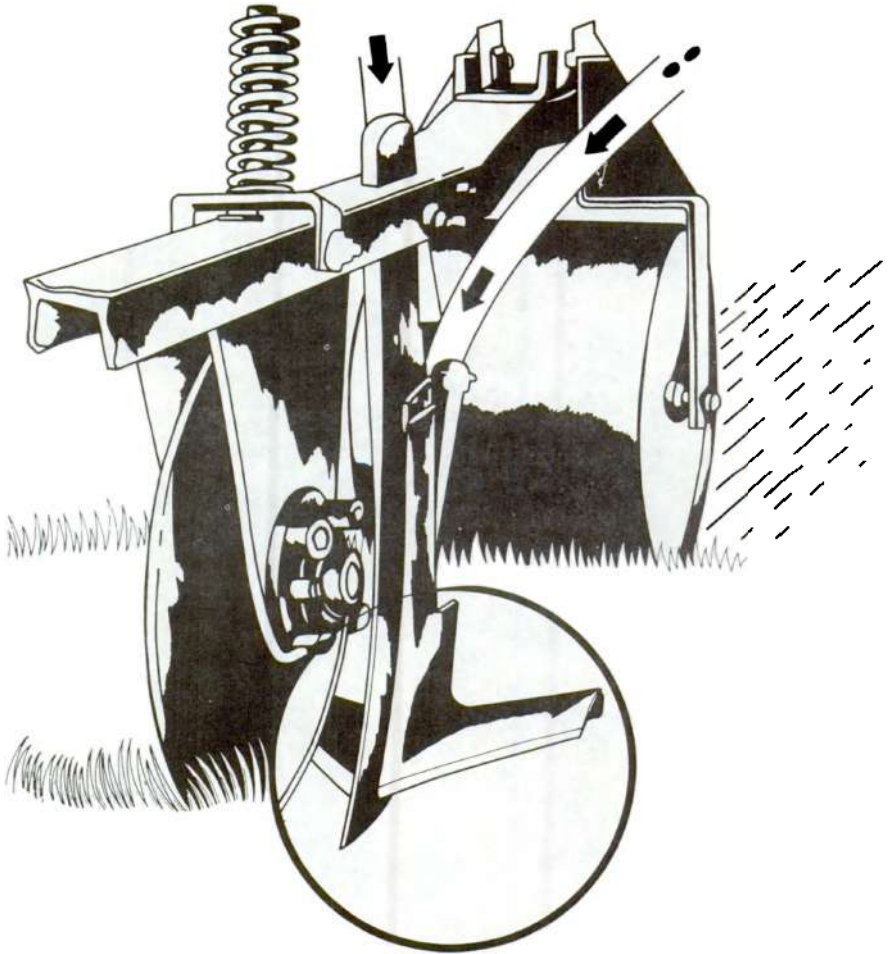
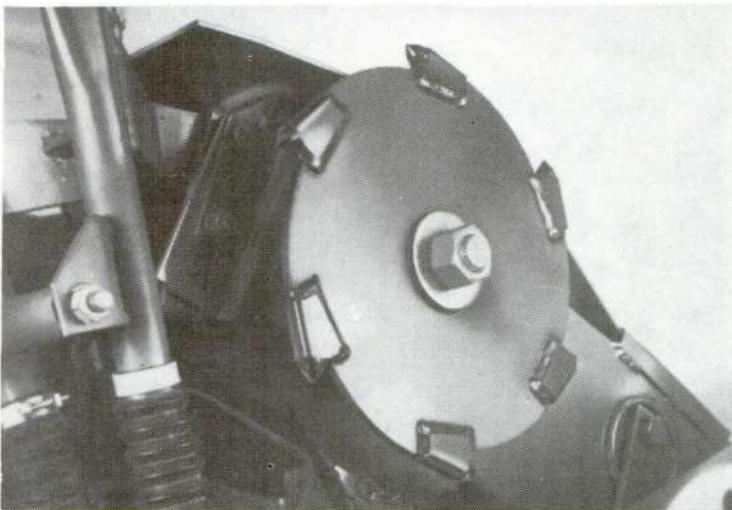


Fig. 88. Diseño de un disco y diente para permitir cortar los suelos pesados con una cobertura vegetativa e inyectar la semilla por las alas del diente en 'A'. Así se siembra dos filas de semillas a cada lado de la ranura, disminuyendo el riesgo posterior de predadores. La rueda controla la profundidad y cierre de la ranura (SIAE, Penicuik, Escocia).



(a) Vista general del renovador de pastizales.



(b) Detalle de las sierras giratorias con puntas de carburo de tungsteno (*John Deere* – Ponce Yépes, Quito).

Fig. 89. La utilización de sierras giratorias permite un corte vertical para la siembra, durante la renovación de pastizales.

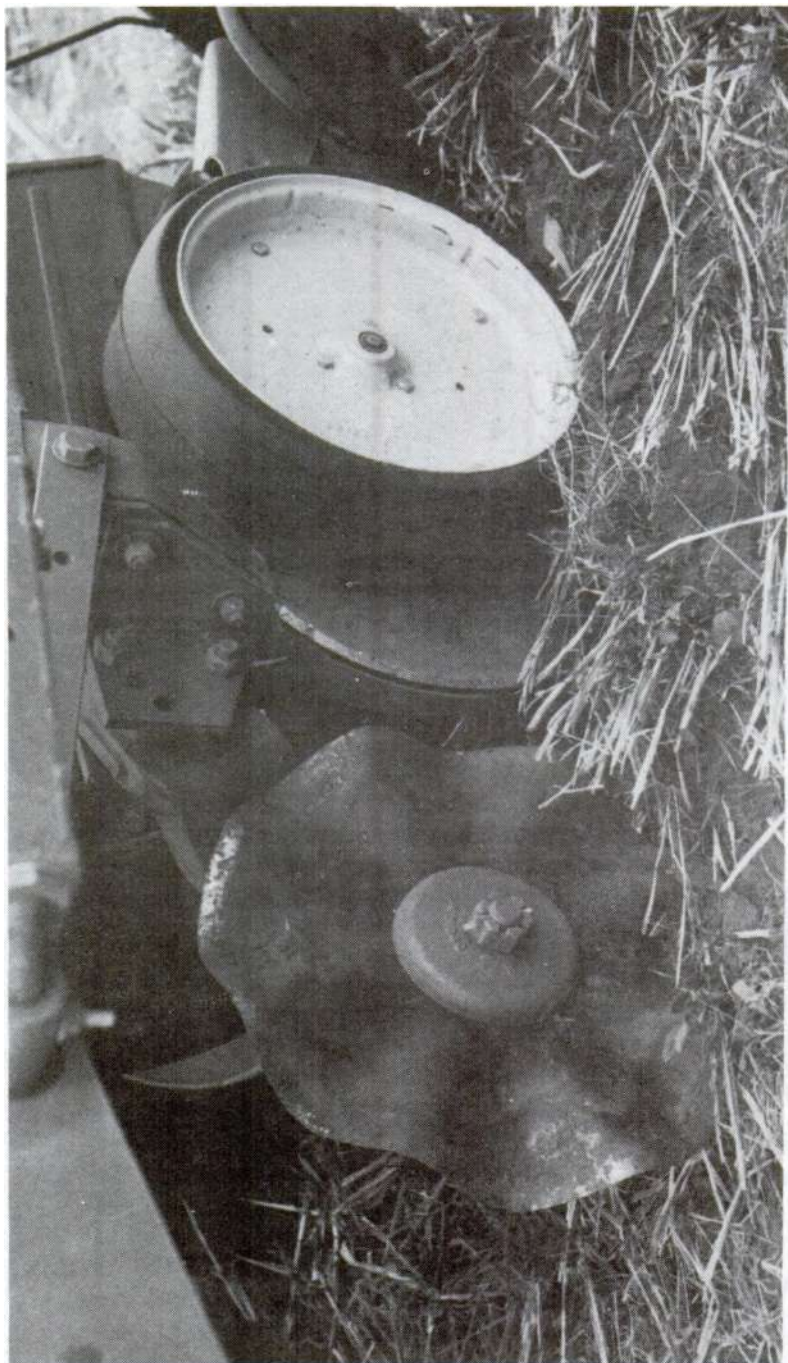
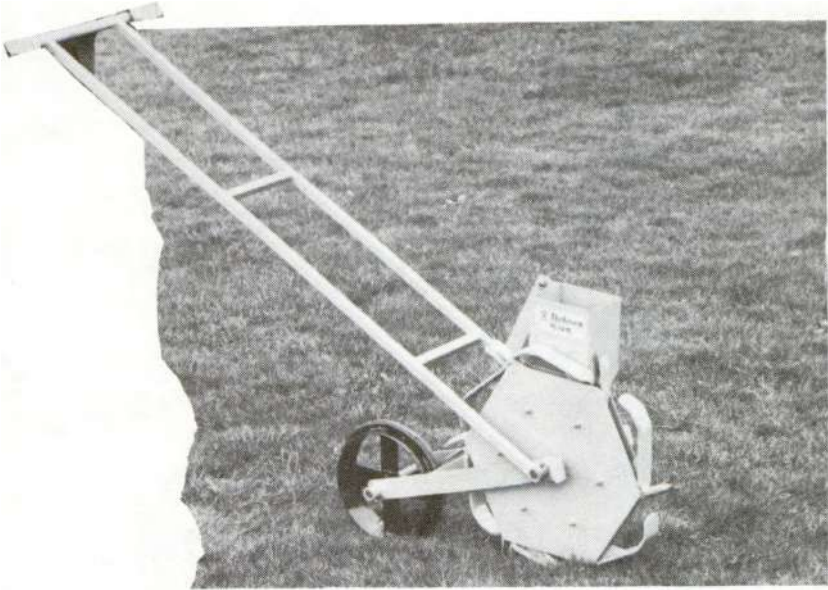


Fig. 90. Un abresurco de disco ondulado seguido de un doble disco, para una siembra con labranza reducida o cero labranza.



(a)



(b)

Fig. 91. Sembradora de inyección para penetrar el suelo y depositar la semilla (*Geest Overseas Mechanisation Ltd, Spalding, RU*). (a) Una sembradora de inyección que permite penetrar una cobertura vegetativa. (b) Un sistema completo de mecanización para el pequeño agricultor que consiste de una unidad motriz, dos sembradoras de inyección, un cajón de transporte y dos aspersoras de ultra-bajo volumen.

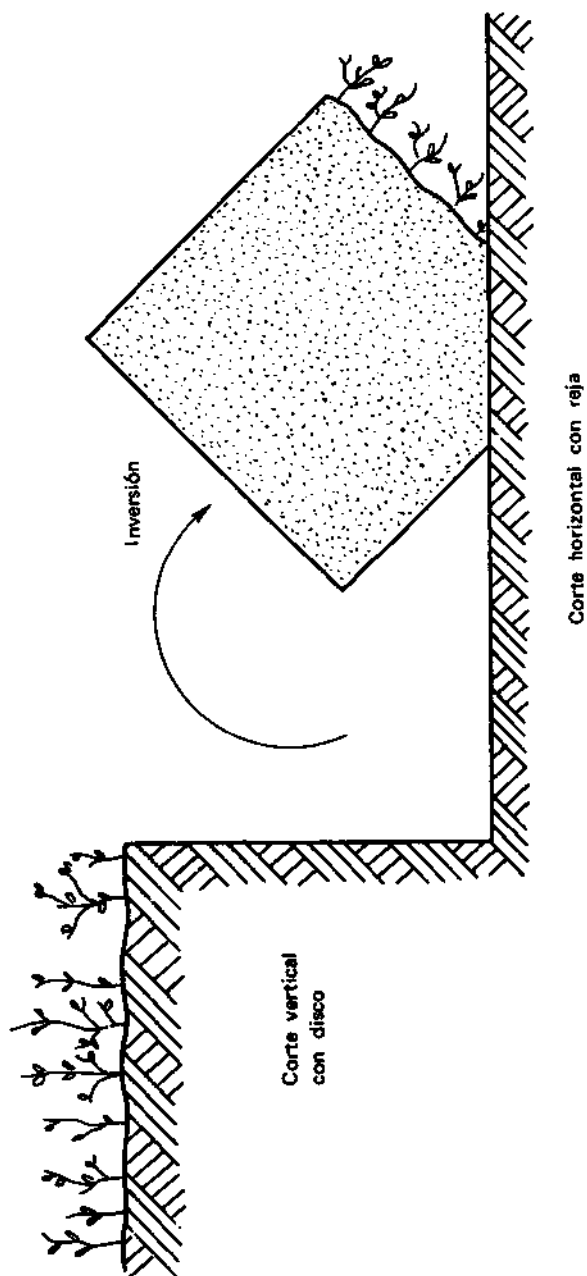


Fig. 92. Los dos cortes y la inversión efectuados por el arado de vertedera.

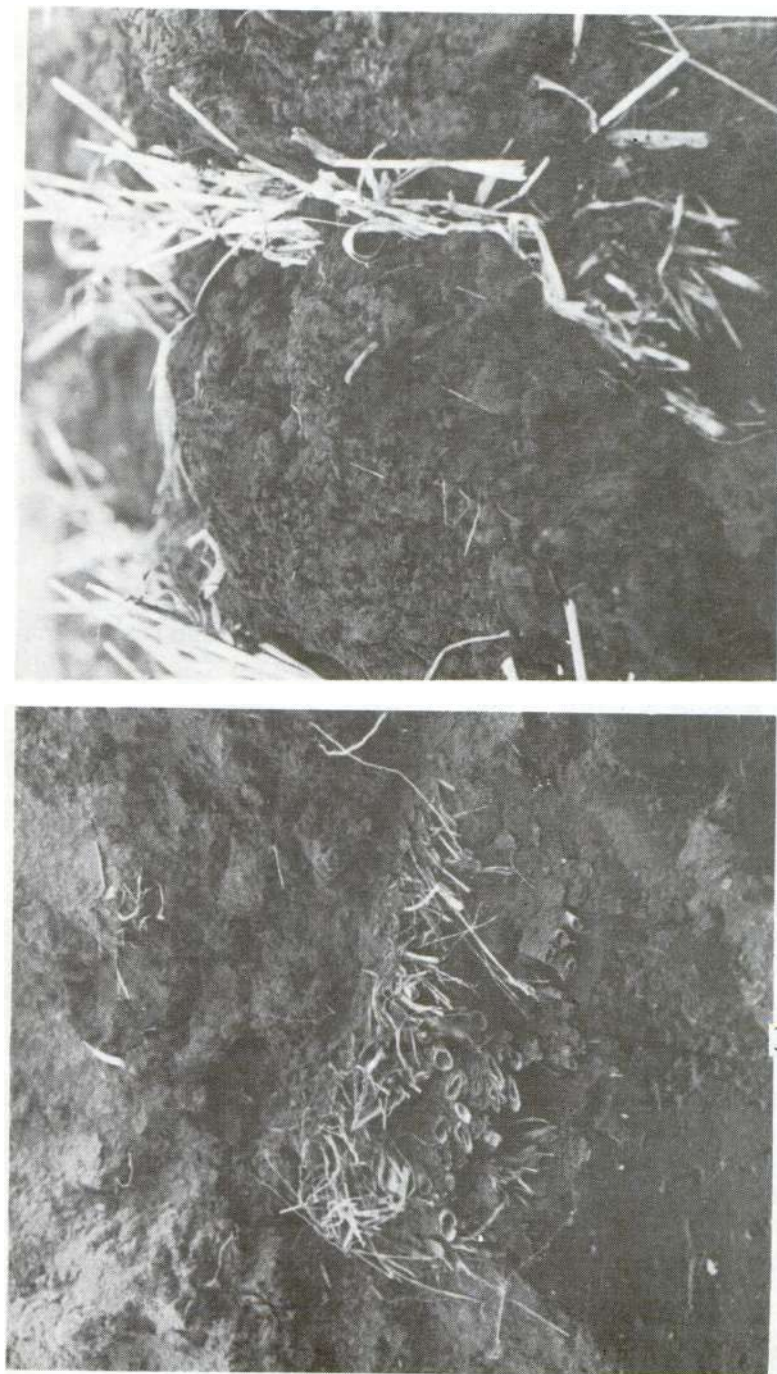


Fig. 93. El perfil del suelo invertido con arados de vertedera y de disco. (a) inversión completa del suelo debido a un arado de vertedera. (b) Inversión parcial del suelo alcanzada con un arado de discos.

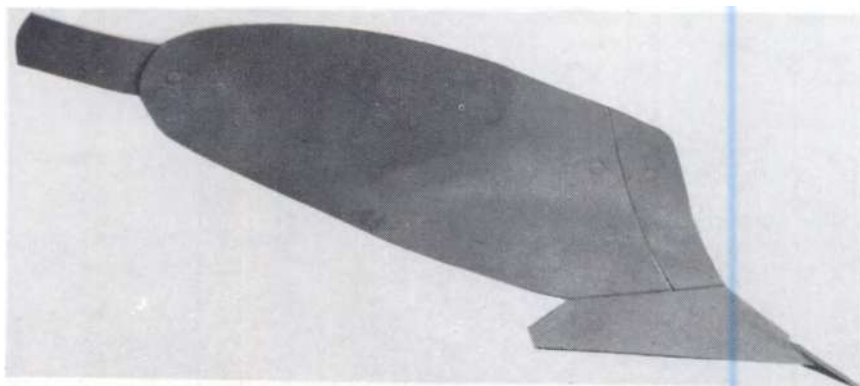
La Fig. 94 muestra cuatro clases generales de vertedera para trabajo a una profundidad normal²¹:

- a. Vertedera corriente (*general purpose*) que tiene un cuerpo largo con una curvatura ligera y un poco convexa; se usa especialmente para potreros puesto que realiza una inversión bastante completa.
- b. Vertedera semi-cavadora (*semi-digger*) que es más corta y un poco cóncava y que también desintegra el prisma del suelo durante la inversión.
- c. Vertedera cavadora (*digger*) que tiene un cuerpo corto y más concavidad, y que da una inversión agresiva ocasionando la desintegración del prisma.
- d. Vertedera de alta velocidad con un cuerpo bien largo y una curvatura más ligera para permitir una inversión suave aún al trabajar hasta 12 km/h.

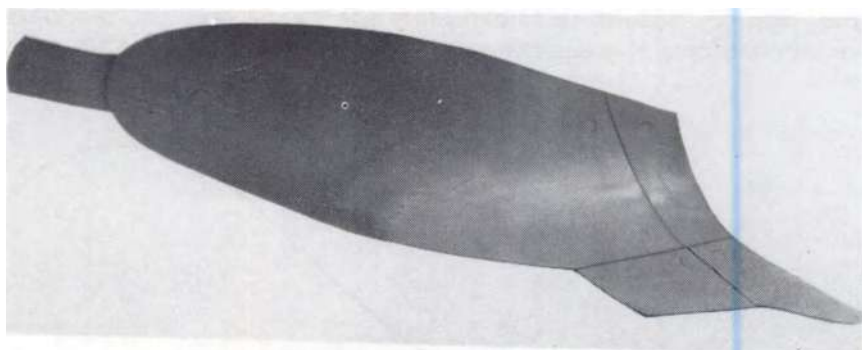
La calidad de la inversión depende así de la forma de la vertedera; sobre ello las Figs. 95 y 96 presentan los ángulos de inclinación (α) y de acercamiento (β) que influyen en el corte horizontal del prisma del suelo. El movimiento por la vertedera depende del buen restregamiento mencionado en el numeral 2.9.4, que es logrado por la limpieza de la oxidación de la superficie (Fig. 32) y, en las condiciones difíciles de los suelos arcillosos húmedos por el uso de materiales no mojables (Fig. 36), la lubricación de la superficie (Fig. 37) o el uso de una vertedera listoneada (Fig. 38).

Además de fabricarse arados especiales para trabajos profundos, la Fig. 135 muestra el caso contrario, un arado de poca profundidad. Algunos fabricantes ofrecen arados de vertedera combinados con otras herramientas como cinceles, subsoladores y elementos giratorios para apoyar la desintegración de los terrones^{8,14}.

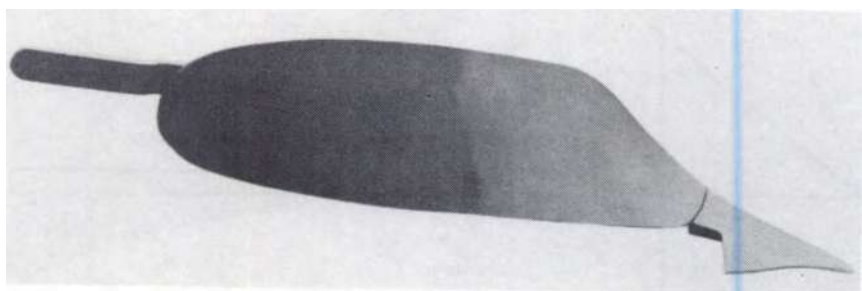
En el numeral 7.2.1 (Capítulo 7) se presenta una discusión de las fuerzas principales que actúan sobre la vertedera y cómo éstas dependen de la velocidad de trabajo (Figs. 166 y 167).



- (a) Un cuerpo tipo cavadora profunda con la punta ajustable para desgaste y un resorte para protección contra daños por obstáculos.



- (b) Un cuerpo tipo semicavadora para trabajo normal.



- (c) Un cuerpo diseñado para trabajo a poca profundidad.

Fig. 94. Tres tipos de cuerpos producidos por uno de los fabricantes más antiguos de equipo de labranza (*Ransomes, Sims and Jefferies Ltd*, Nacton Works, Ipswich, Inglaterra).

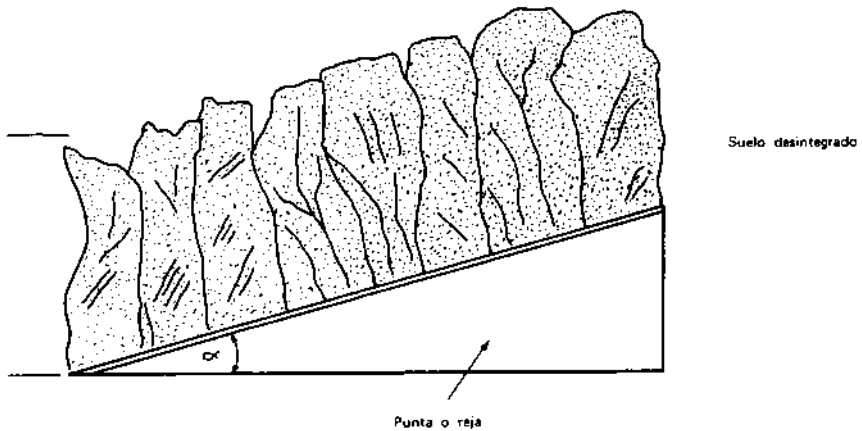


Fig. 95. El ángulo de inclinación (α) de la reja del arado de vertedera afecta el grado de desintegración del suelo.

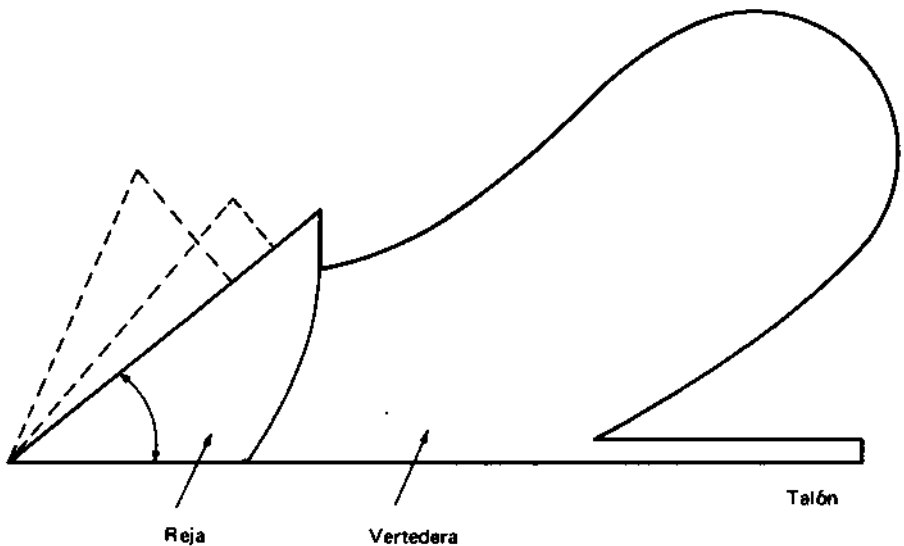


Fig. 96. El ángulo de acercamiento de la reja o punta del arado de vertedera afecta el comportamiento, de acuerdo con la profundidad y velocidad de trabajo y la dureza del suelo.

4.10 HERRAMIENTAS PARA LA MEZCLA E INCORPORACION DEL SUELO

En el numeral 3.3 se observó que los dientes angostos menores de unos 45° tienden a levantar los estratos inferiores y los aglomerados grandes hacia la superficie, con una fuerza de arrastre mínima; los dientes inclinados hacia atrás tienen un efecto contrario. Aunque estos principios permiten un grado de mezcla por medio del diseño de una herramienta apropiada, una mezcla mejor se alcanza por cultivadores giratorios o con ejes verticales (Fig. 55) u horizontales (Fig. 56). Se debe notar que estas herramientas también efectúan una desintegración del suelo (numeral 4.7). El equipo de labranza reducida, ilustrado en la Fig. 139, permite introducir semilla en la superficie antes que pase el rotor, el que permite su incorporación.

Las herramientas de discos inclinados hacia la dirección de avance también efectúan una mezcla y pueden ser utilizadas para incorporar semilla o fertilizantes asperjados al voleo en la superficie. Por ejemplo, se puede realizar la siembra de granos pequeños como trigo y cebada, sembrando con un distribuidor simple de fertilizante y tapando con una rastra de disco liviano¹, lo cual evita la inversión en una sembradora especial. Se debe evitar el uso de las rastras medianas o pesadas para esta operación dado que mucha semilla queda demasiado enterrada, provocando así un desarrollo irregular del cultivo.

Las rastras más pesadas pueden efectuar una mezcla a mayor profundidad mientras que el arado de disco da una mezcla de otra clase por la inversión parcial del prisma del suelo (Fig. 93).

4.11 METODOS PARA EFECTUAR UN MOVIMIENTO DEL SUELO

La operación de un movimiento específico del suelo se realiza en tres situaciones generales que son:

- a. Construcción de estructuras en la cama de semilla, como surcos, camellones y mesas.
- b. Traslado a corta distancia.
- c. Traslado a larga distancia.

4.11.1 Herramientas para la construcción de estructuras en la cama de semilla

Las herramientas más simples para formar surcos o camellones se muestran en la Fig. 97. De éstas el cuerpo con caras verticales es de fácil construcción pero exhibe malas características de penetración, por lo que solamente sirve para los suelos sueltos. Un cuerpo con caras convexas puede mover el suelo en los surcos angostos y ayudar al moldeo de las paredes para que sean estables, mientras que las caras cóncavas construyen surcos más anchos y pueden levantar el suelo para la construcción de camellones altos.

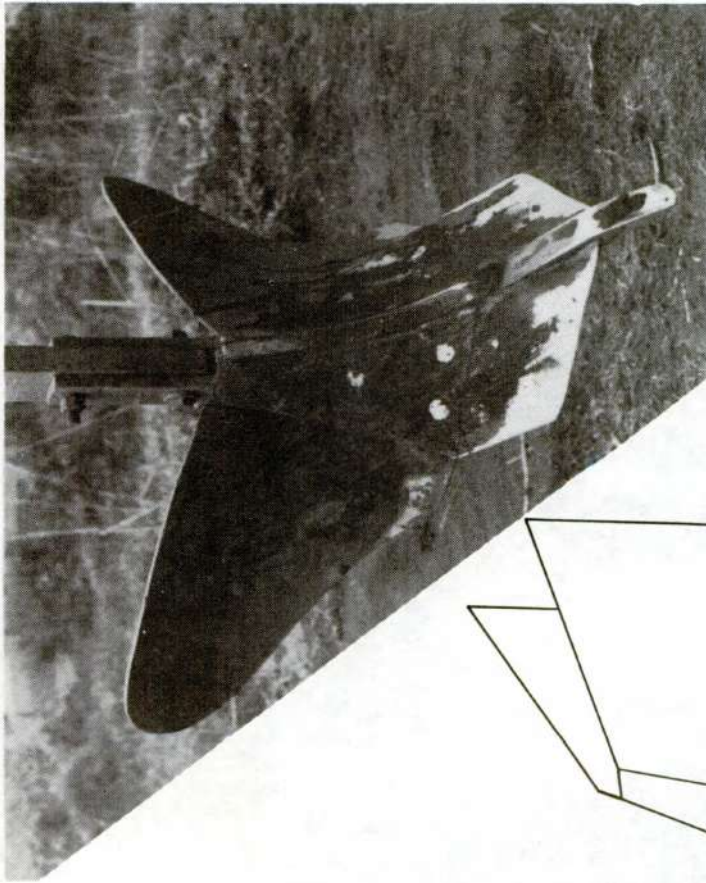
La Fig. 98 presenta una herramienta para la formación de surcos y mesas por el moldeo del suelo, aunque éste debe ser suelto y libre de terrones. También se fabrican estos "acamadores" en forma ajustable para permitir su uso en distintos cultivos.

Las herramientas rígidas y deslizantes, como las anteriores, son simples pero tienen mayor resistencia que la alternativa de utilizar discos (Fig. 99), ruedas estrelladas (Fig. 82) o un cultivador giratorio modificado (Fig. 59); en cambio, no permiten el mismo grado de moldeo de las estructuras, las que resultan flojas y menos estables en ciertos tipos de suelos.

También se ha diseñado herramientas más complejas para los suelos difíciles, como arcillas, que consisten de rotores de tipo espiral mandados por el eje toma de fuerza (Fig. 100).

4.11.2 Sistemas para el movimiento de suelo en corta distancia

La herramienta más común para esta labor es un diente ancho y curvo (descrito en el numeral 3.2.3), por lo cual se recomienda consultar la bibliografía especializada para un estudio en detalle de los aspectos complejos de diseño^{7,11,25}. Pero hay algunas observaciones simples que pueden indicarse para los principios generales de su acción sin recurrir a la teoría. El movimiento que presenta la menor resistencia consiste en rodillar el suelo frente a la hoja, como se indica en la Fig. 101, factible de realizar en los suelos plásticos siempre que la forma de la curva en la hoja sea apropiada (véase también Fig. 42). Los suelos friables tienden a amontonarse al frente de la hoja (Fig. 102) sobrecargando la superficie de falla, lo que como resultado presenta una resistencia mayor (Fig. 103).



a) Caras verticales

b) Caras cóncavas

c) Caras convexas

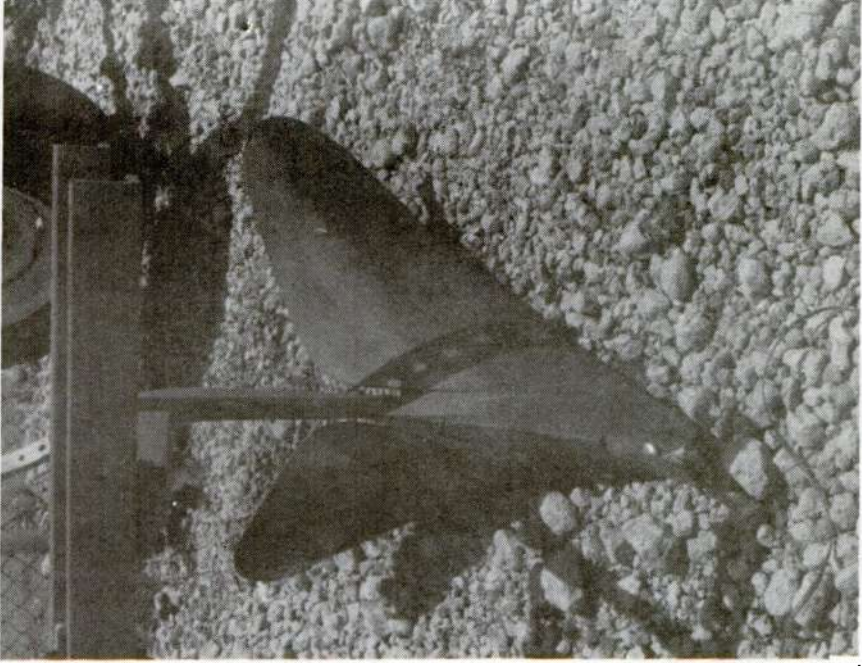
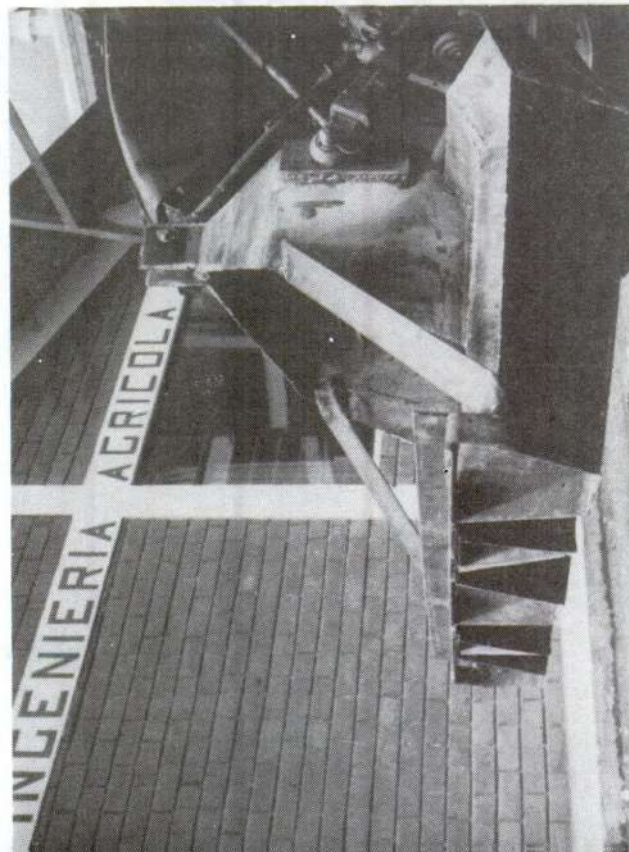
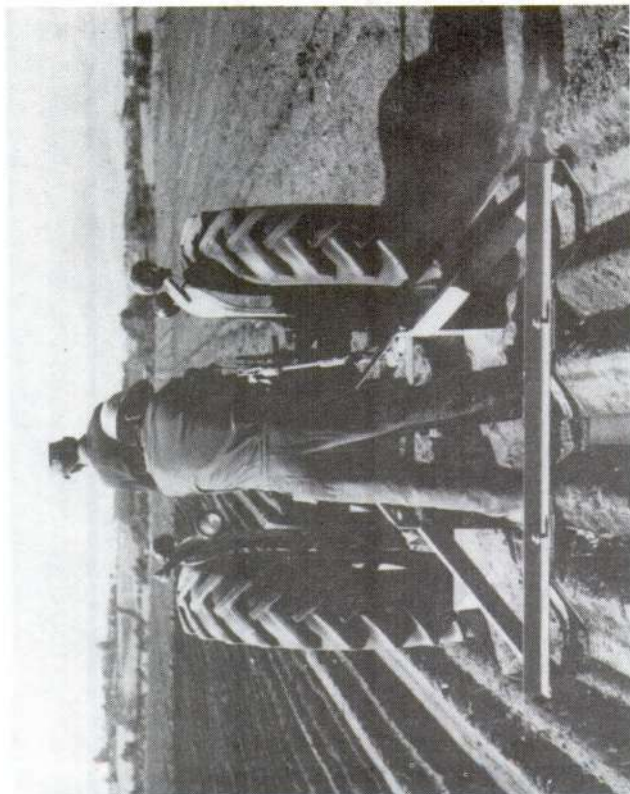


Fig. 97. Tres distintos diseños para el cuerpo de un surcador.



(a)



(b)

Fig. 98. Herramienta diseñada en el CIMMYT (México) para apoyar la siembra de maíz. Es capaz de moldear el suelo suelto en surcos y mesas, con una ranura donde luego se siembra a mano. Fue fabricada para facilitar la siembra en ensayos experimentales.



Fig. 99. Uso de discos para la formación de camellones entre arrozales.

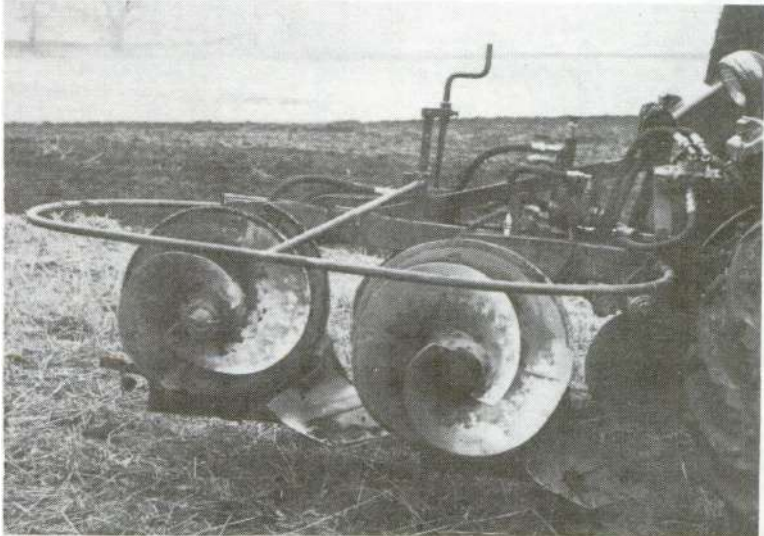


Fig. 100. Arado rotativo en el cual la vertedera ha sido reemplazada por un rotor con mando a motores hidráulicos. Este permite reducir la fuerza de arrastre y mejorar la inversión y pulverización del suelo como la incorporación de materia vegetal superficial (SIAE, Penicuik, Escocia).

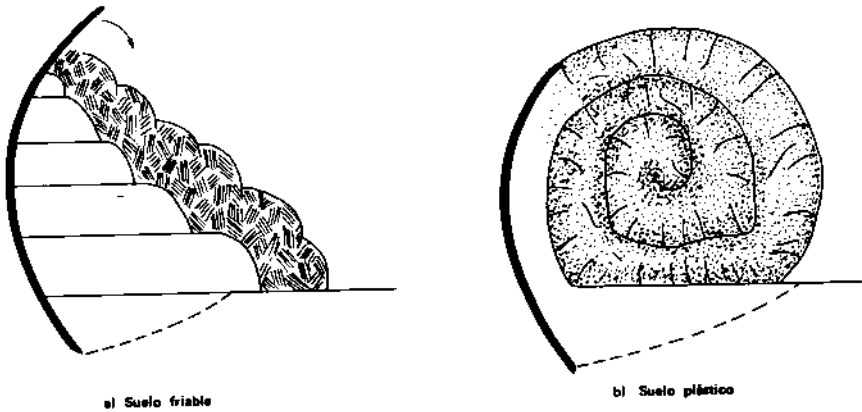


Fig. 101. Movimiento del suelo frente a la cuchilla de tipo *bulldozer* de acuerdo con la consistencia del mismo (véase también Figs. 42 y 102).

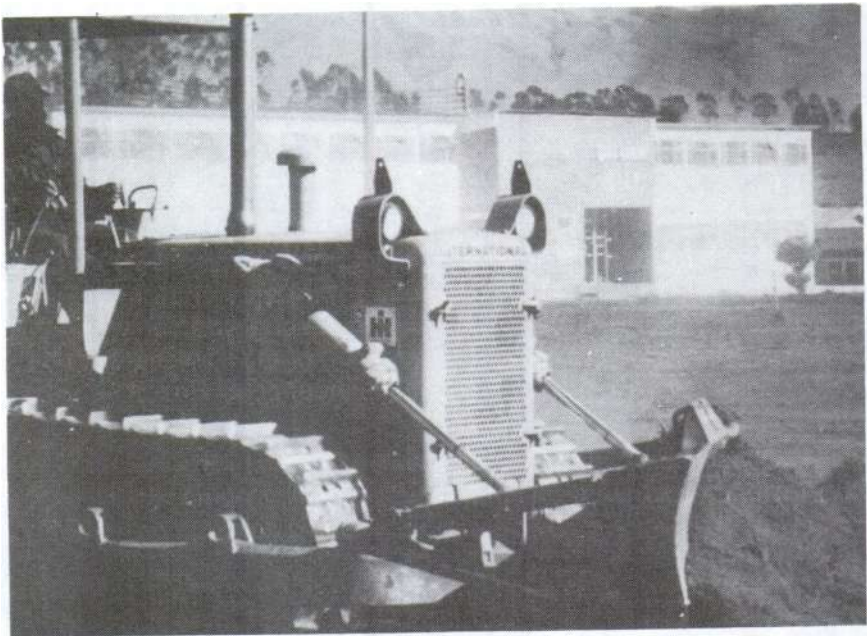


Fig. 102. El modelo de falla de un suelo friable frente a un diente ancho y curvo.

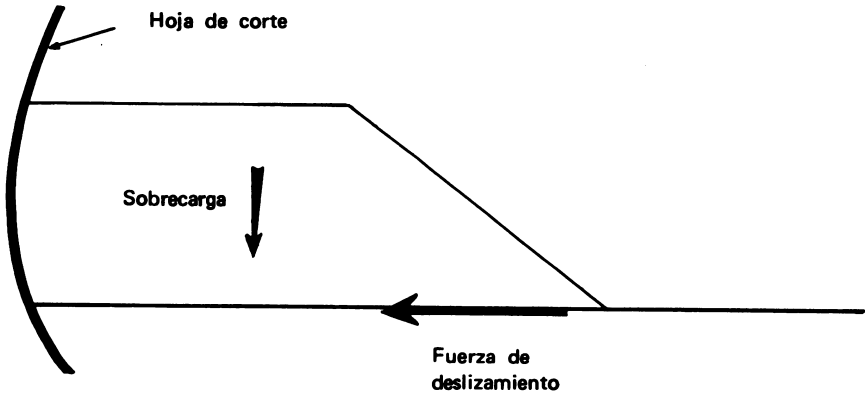


Fig. 103. Sobrecarga que puede ocurrir al utilizar la cuchilla de tipo *bulldozer*.

Obviamente este efecto es peor en el caso de los suelos friccionales, por lo cual se debe considerar el uso de una cargadora (Fig. 104) para levantar el suelo y así eliminar toda resistencia durante su transporte.

Finalmente se debe mencionar el uso de equipo apropiado para la finca al considerar que las anteriormente descritas son máquinas especializadas que normalmente se alquilan por contrato. La Fig. 105 muestra una hoja ajustable que sirve para construcciones menores, en este caso la construcción de canales de diversión en una obra de conservación de suelo. El montaje trasero permite desarrollar la tracción necesaria por la transferencia de peso en el tractor (véase numeral 6.1).

Existen también palas/transportadoras de montaje trasero que desarrollan una buena tracción pero cuya carga está limitada por la estabilidad del tractor. Las cargadoras frontales (Fig. 106) son muy comunes pero en cambio resultan en una transferencia negativa de peso, lo que limita seriamente su tracción.

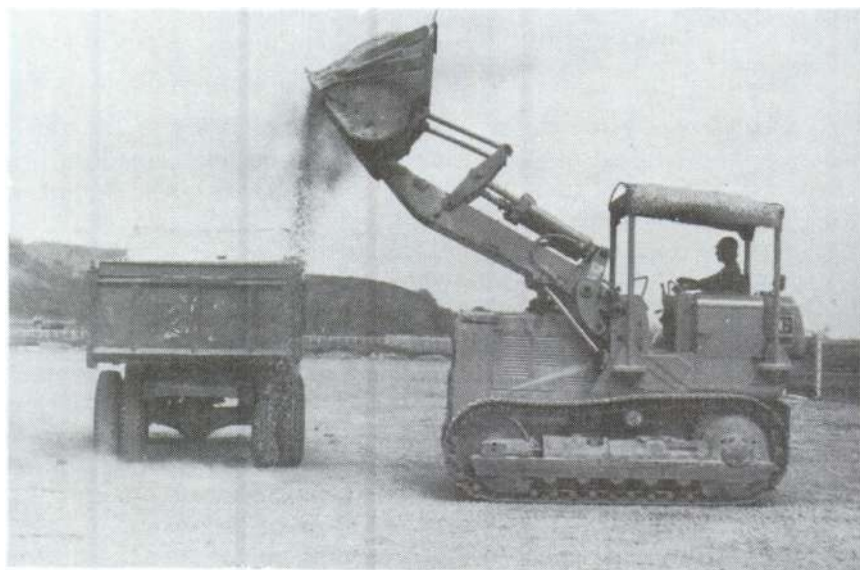


Fig. 104. Dos tipos de cargador frontal, uno diseñado para la limpieza de bosques y otro para entrar en terrenos difíciles.

4.11.3 Sistemas para movimiento de suelo en larga distancia

El sistema más simple dentro de la finca consiste en la combinación del uso de una cargadora frontal (Fig. 104, o aún más simple, Fig. 106) y una serie de remolques agrícolas (numeral 8.2) o volquetas (camiones con cajón volcable). En otras ocasiones, para un movimiento considerable de tierra, por ejemplo en la nivelación de terreno para aplicación de riego por gravedad, se justifica el empleo de equipo especializado por medio de contratos. Propiamente estas máquinas pertenecen a la rama de ingeniería civil pero cabe mencionar algunos aspectos de interés en su diseño^{6,11,26}.

La Fig. 107 ofrece un sistema por el cual el nivelador/transportador (mototraílla) corta el suelo con una cuchilla de pequeño ángulo de ataque y progresivamente amontona el suelo adentro del contenedor. La descarga normalmente se efectúa mediante levantamiento hidráulico y/o contracción de los lados del cajón (Fig. 108).

En las Figs. 109 y 111 la carga y descarga se ayudan con una cadena sinfín que evita la mucha resistencia del suelo y que permite construir máquinas más grandes. Vistos del frente, los lados del contenedor están inclinados para reducir, también, la resistencia al cargar



Fig. 105. El uso de una hoja niveladora trasera facilita los movimientos menores de tierra.



Fig. 106. Un cargador frontal convencional utilizado como accesorio de un tractor agrícola (John Deere - Ponce Yepes, Quito).

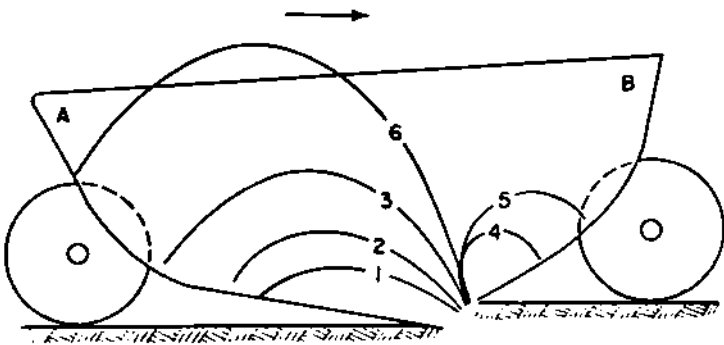


Fig. 107. Método de carga sucesiva del suelo en el cajón del nivelador/transportador. Las zonas A y B se llenan al final¹¹.

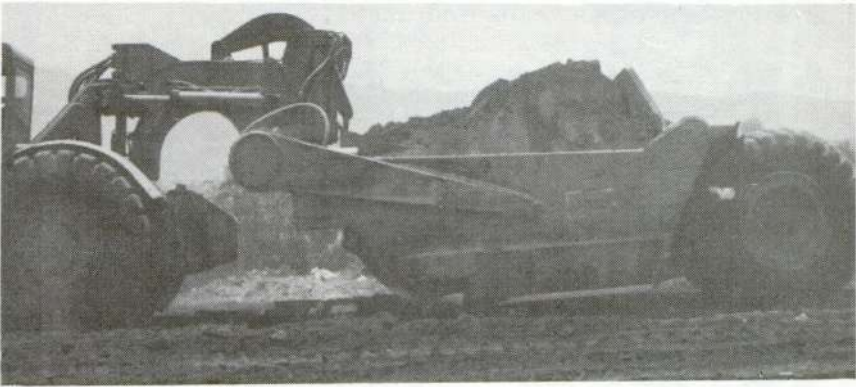
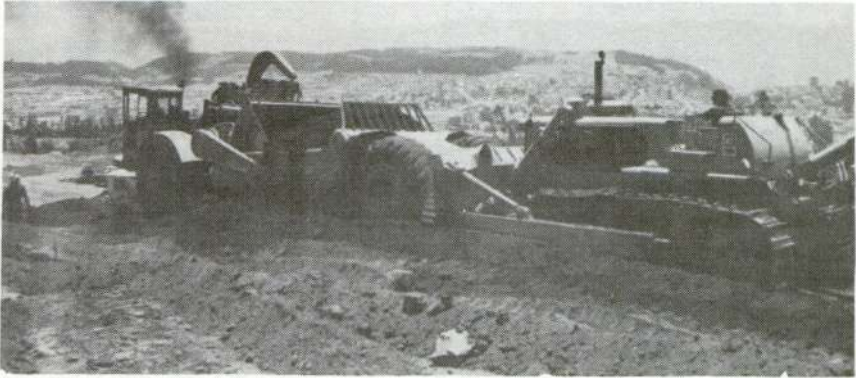


Fig. 108. Carga, transporte y descarga por la contracción y levantamiento de las paredes, en un nivelador/transportador de suelo (mototraílla).

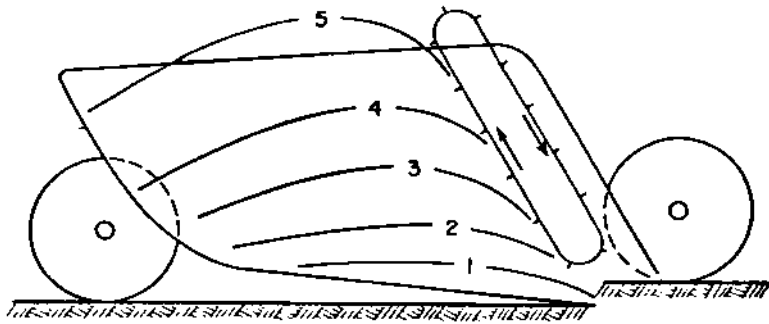


Fig. 109. El elevador sinfín puede ayudar en la carga y descarga en el diseño de este nivelador/transportador¹¹.

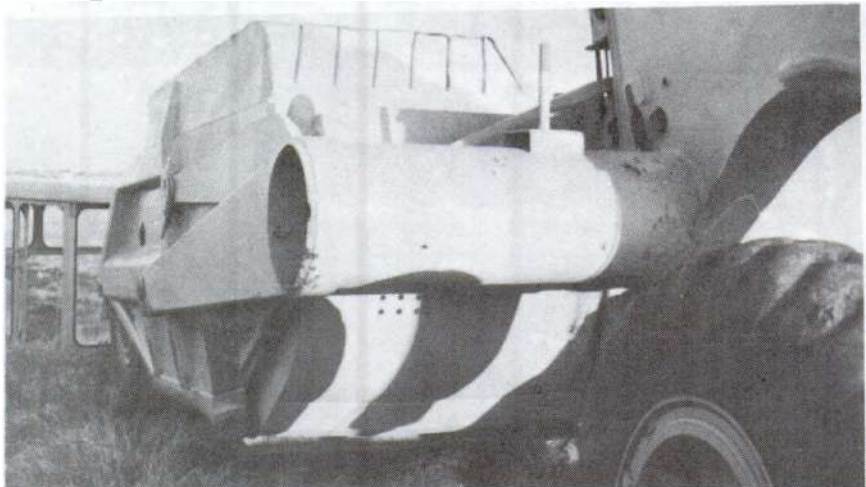


Fig. 110. (a) Vista de la inclinación óptima de las paredes de un nivelador/transportador (moto-traílla) para facilitar el ingreso y descarga del suelo²⁶, (b) nivelador/transportador sin inclinación de las paredes laterales.

de suelo el tanque (Fig. 110). La razón de esto se explica al observar que la hoja cortadora cumple la labor de un platillo horizontal, forzando el suelo hacia arriba. En el numeral 3.4.3 y la Fig. 48 se explica la mayor resistencia que esta hoja experimenta al moverse hacia arriba en un espacio limitado (paredes verticales) en vez de un espacio libre (paredes inclinadas en más de $45^\circ - \phi/2$).

Finalmente debe indicarse que el nivelador/transportador pequeño puede ser operado por un tractor agrícola convencional (Fig. 112).



Fig. 111. Un nivelador/transportador (mototraílla) provisto con una cadena sinfín para ayudar en la carga (John Deere – Ponce Yepes, Quito).

4.12 HERRAMIENTAS PARA EL EMPAREJAMIENTO DEL SUELO

El emparejamiento del suelo facilita el drenaje y el riego por surco y permite la operación más rápida de las demás herramientas, mejorando la eficiencia del trabajo. La herramienta apropiada tiene una cuchilla montada centralmente entre dos ejes bien distanciados (Fig. 113) que permite cortar las ondulaciones altas descargando el suelo, arrastrado por la cuchilla, en las partes hondas. La precisión de este trabajo depende del largo de la herramienta y en casos extremos se le puede proveer una rueda de soporte central y ajuste hidráulico y automático para la hoja topadora, a fin de permitir la fabricación de una máquina extra grande y precisa (Fig. 114).

Obviamente, un nivelador de esta naturaleza sufre la falta de maniobrabilidad; la Fig. 115 muestra la posibilidad de acortar su largo, al acoplarlo por los tres puntos del tractor, para utilizar el punto de acople virtual (véase numeral 7.13) como apoyo delantero del nivelador. Se encuentra una geometría de operación óptima al seleccionar un punto de acople virtual entre los ejes del tractor, aunque bien por delante para minimizar los efectos de las ondulaciones en la calidad del trabajo (Fig. 116).

4.13 UNA HERRAMIENTA PARA EL ANCLAJE

La operación de anclaje forma la base de los estudios sobre tracción tratados en el Capítulo 9. En adición a esta aplicación, con frecuencia existe la necesidad de desarrollar un anclaje firme para permitir operar una 'Wincha', por ejemplo, para remolcar equipo de drenaje o quizás para tumbar árboles (Fig. 117).

Un diseño tradicional consiste en una plancha con ángulo de ataque de unos 50° a 60° , que se profundiza de acuerdo con la fuerza de tiro aumentando así su superficie de contacto y, por consiguiente, su resistencia en los suelos cohesivos. En cambio, Payne¹⁹ sugirió la modificación indicada en la Fig. 118, que consiste en una plancha horizontal para provocar una sobrecarga a la superficie de falla, lo que aumenta la resistencia en el caso de los suelos con propiedades friccionales. Un diseño para cubrir ambas posibilidades debe incorporar la plancha pero bisagrada, a fin de permitir desengancharla en los suelos cohesivos.

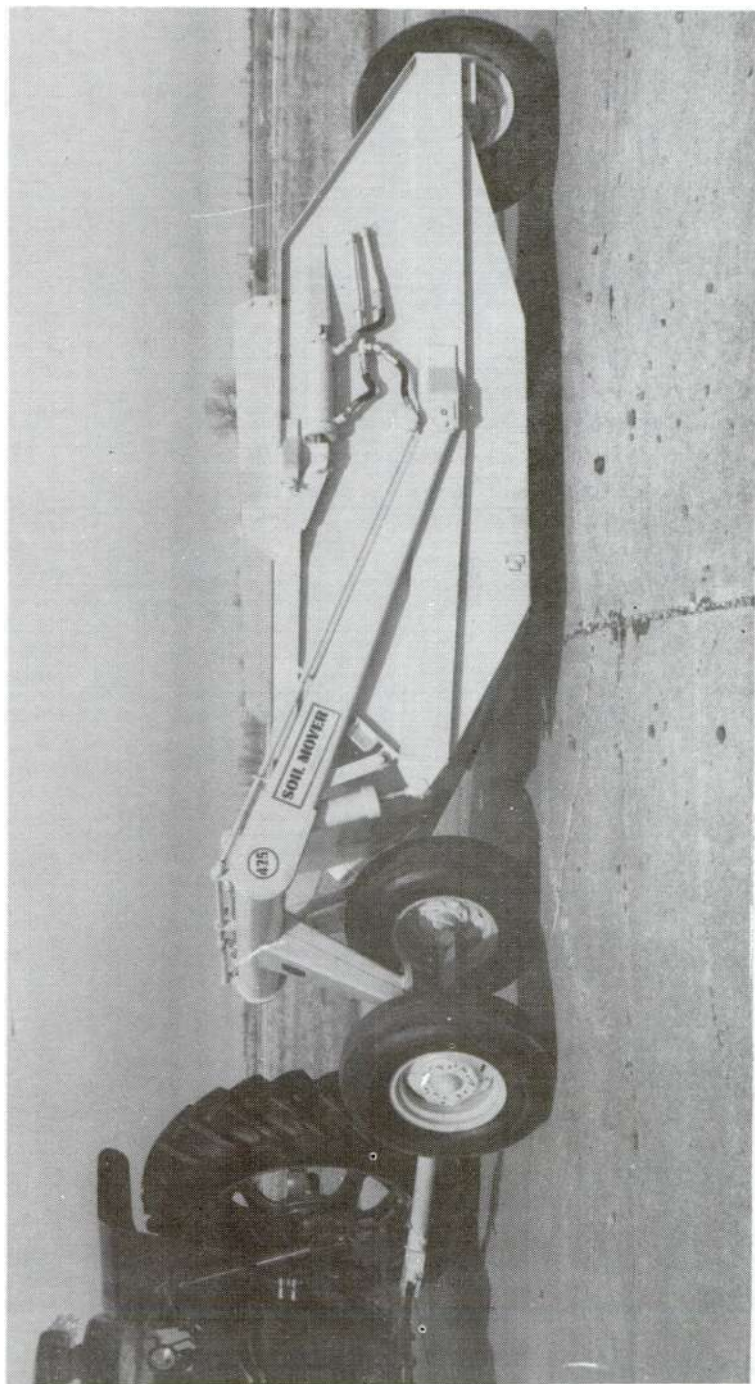


Fig. 112. Un nivelador/transportador con capacidad de 4 metros cúbicos, para usar con un tractor agrícola de entre 60 y 100 hp en la barra de tiro. El accionamiento se efectúa por el sistema hidráulico del tractor (Soilmover Manufacturing Division, Columbus, Nebraska, EUA).



Fig. 113. Una niveladora que opera sin la rueda de soporte central en el puente (Towner, Santa Ana, CA, EUA).

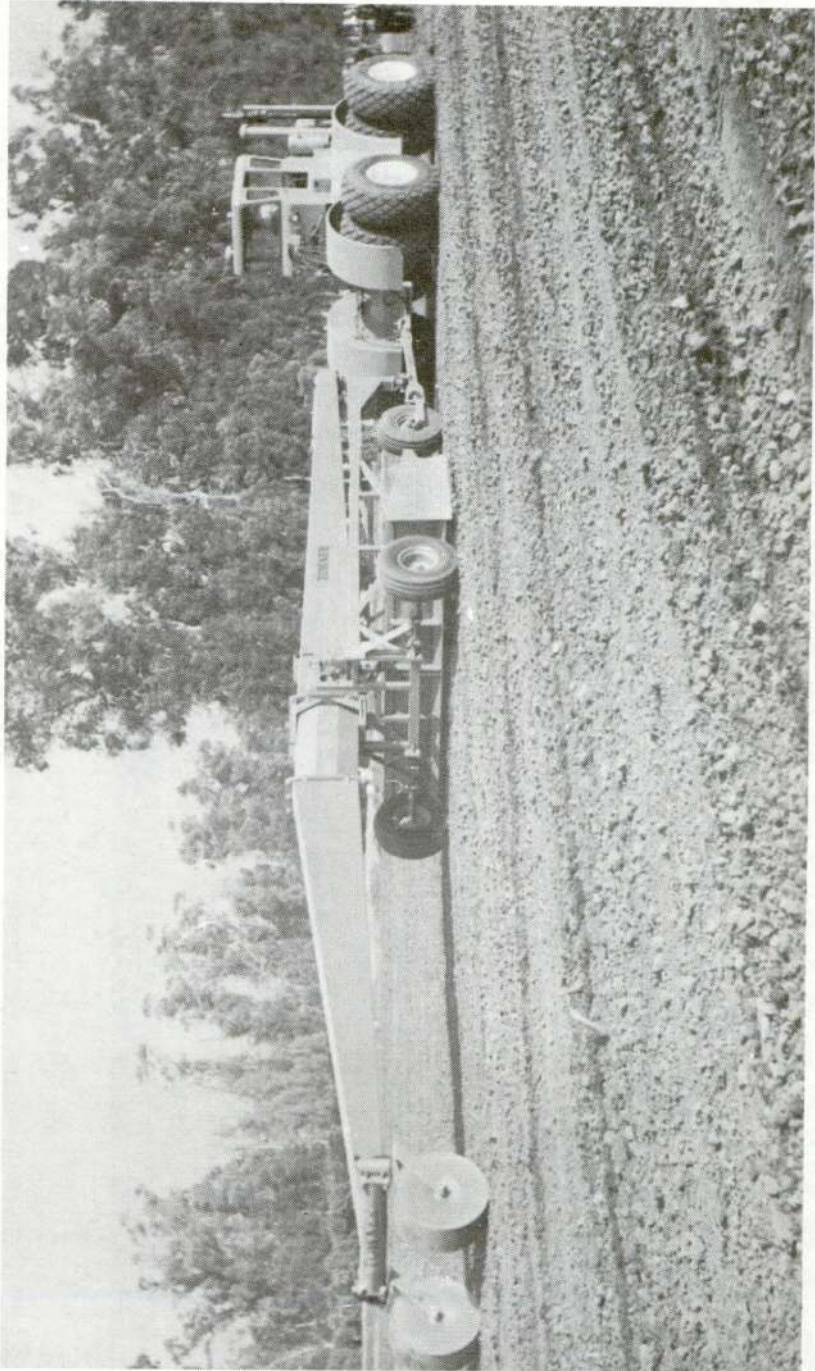


Fig. 114. Una niveladora extralarga con una rueda de soporte central (*Towner*, Santa Ana, CA, EUA).

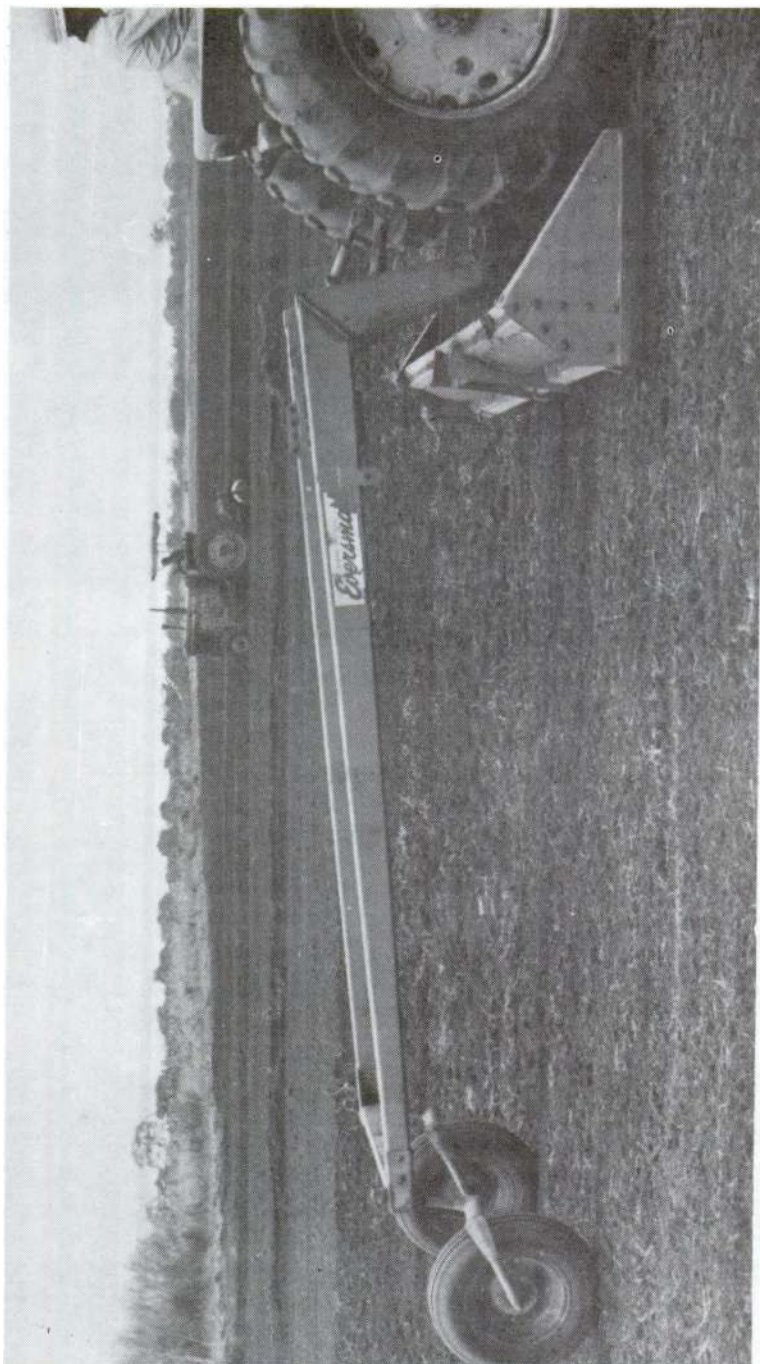
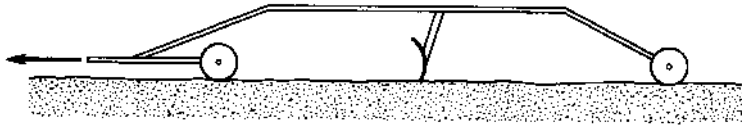
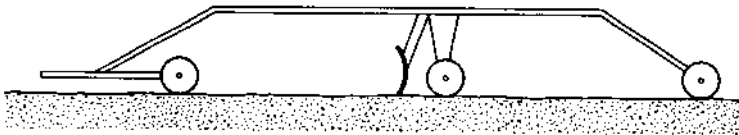


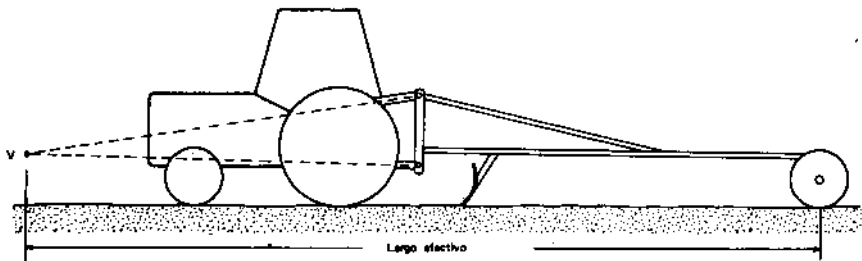
Fig. 115. Niveladora de acople integral trabajando en la preparación de un arrozal.



a) Nivelador de tiro



b) Nivelador de tiro con rueda de soporte central



c) Nivelador acoplado por los tres puntos del tractor

Fig. 116. Distintos diseños del nivelador para efectuar la labor de emparejamiento²⁶.



Fig. 117. Anclaje que permite la operación de una 'wincha' de doble cable, atrás de un tractor agrícola (*James Jones and Sons Ltd, Larbert, Escocia*).

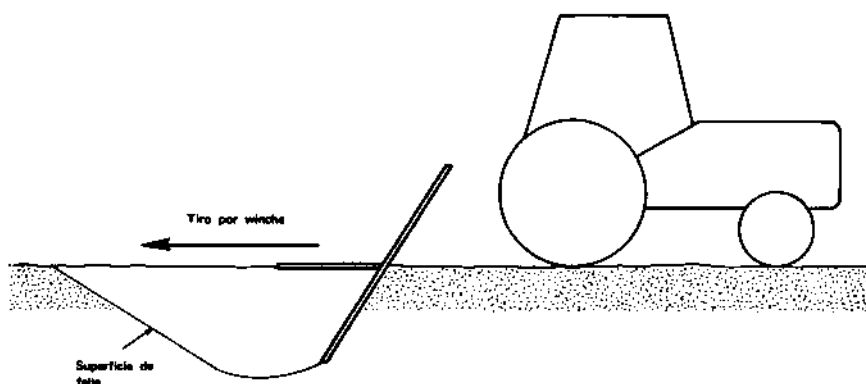


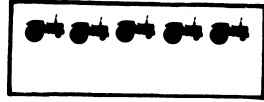
Fig. 118. Diseño de anclaje con una plancha horizontal que sobrecarga la superficie de falla, aumentando la resistencia en los suelos friccionales¹⁹. Este permite operar una 'wincha' poderosa del tractor.

BIBLIOGRAFIA

1. ASHBURNER, J.E. La selección y uso de las sembradoras de cereales. Serie Didáctica No. 1, Quito, Ecuador, Depto. de Ingeniería Agrícola, INIAP, 1976. 13 p.
2. BERNACKI, H., HAMAN, J., KANAFOJSKI, Cz. Agricultural machines, theory and construction. Vol. 1 (1967); English translation, Washington, USA, USDA, 1972. 883 p.
3. CHAMEN, W.C.T., COPE, R.E., PATTERSON, D.E. Development and performance of a high output rotary digger. J. Ag. Engg. Res. 24(3):301-318. 1979.
4. CHASE, L.W. A study of subsurface tiller blades. Ag. Engg. 23:43-45, 50. 1942.
5. CHILDS, E.C. Mechanics of a mole plough. Emp. J. Exp. Agric. 10:39. 1942.
6. COHRON, G.T. The inception and evolution of earthmoving soil mechanics. Trans. ASAE, 11(2):230. 1968.
7. COOK, P.E.R., REECE, A.R. Theory of bulldozer action in friable soil. 2nd Int. Conf., Terrain Vehicle Systems, 1966. pp.,500-515.
8. CULPIN, C. Farm machinery. 10th Edition, London, Granada, 1981. 450 p.
9. DIAZ, A. A cassava harvesting aid. Cali, Colombia, CIAT, 1979. 14 p.
10. EDE, A.N. The operation of trenchless machinery based on the floating beam. Paper No. 5/E/44, Ag. Engg. Symposium, Silsoe, Bedford, UK, NCAE, 1967. 4 p.
11. GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook No. 316, Washington, USA, USDA, 1967. 511 p.

12. GODWIN, R.J., SPOOR, G., LEEDS-HARRISON, P. An experimental investigation into the force mechanics and resulting soil disturbance of mole ploughs. *J. Ag. Engg. Res.* 26(6):477-497. 1981.
13. HENDRICK, J.G., GILL, W.R. Rotary tiller design parameters. Part IV Blade clearance angle. *Trans. ASAE*, 17(1):4-7. 1974.
14. HOWE, S. Plough points. *London, Power Farming*, 58(3):10-20. 1979; 58(4):10-13. 1979.
15. JOHNSON, L. Land preparation. Seminar (unpublished) in IRRI, Phillipines, Sept. 1967.
16. KEPNER, R.A., BAINER, R., BARGER, E.L. Principles of farm machinery. 3rd Edition, Westport, USA, AVI, 1978. 486 p.
17. LEEDS-HARRISON, P., SPOOR, G., GODWIN, R.J. Water flow to mole drains. *J. Ag. Engg. Res.* 27(2):81-91. 1982.
18. O'CALLAGHAN, J.R., McCOY, J.K. The handling of soil by mouldboard ploughs. *J. Ag. Engg. Res.* 10(1):23. 1965.
19. PAYNE, P.C.J. Winch sprag designed to utilize soil friction. *J. Ag. Engg. Res.* 1(1):51-56. 1956.
20. SIAL, J.K., HARRISON, H.P. Soil reacting forces from field measurements with sweeps. *Trans. ASAE*, 21(5):825-829. 1978.
21. SIMS, B.G., ORBE, G. ¿Cómo arar con tractores? Serie Didáctica No. 3, Quito, Ecuador, Depto. Ing. Agric., INIAP, 1979. 30 p.
22. SINEOKOV, G.N. Design of soil tilling machines, (1965). English translation, Washington, USA, USDA, 1977. 407 p.
23. SMITH, E.M., BENOCK, G. Power tillage compared with conventional tillage tools for grassland renovation. *Trans. ASAE*, 22(4):710-714. 1979.

24. SOEHNE, W. Varios artículos sobre el diseño de arados de veredera de alta velocidad. *Grudl. der Landtech.* 11:22-30. 1959; 12:51-82. 1960; 15:15-27. 1963. (English translations: Silsoe, Bedford, UK, NIAE, Nos. 87, 101 y 145).
25. SOMMER, M.S., WEBER, J.A. Model study of vibrating tines bulldozer blade system. *Trans. ASAE*, 20(1):18-20. 1977.
26. SPOOR, G. Design of soil engaging implements. Parts I and II, London, *Farm Machine Design Engg.*, 3:22-25, 28. 1969.
27. _____. Fundamental aspects of cultivation. In *Technical Bulletin No. 29, Soil physical conditions and crop production*, London, MAFF, HMSO, 1975. pp. 128-144.
28. _____. Series of articles on subsoilers. London, *Power Farming*, 54(9):14-15. 1975; 55(1):34-35. 1976; 57(9):18-20. 1978.
29. TOMPKINS, F.D., BLEDSOE, B.L. Vibratory furrow opening tool for minimum tillage planters. *Trans. ASAE*, 22(3):498-503. 1979.
30. WIJEWARDENE, R. Planters (seeders) for zero-tillage farming systems in the humid tropics. In. LAL, R. (Ed.) *Soil tillage and crop production. Proceedings Series No. 2*, Ibadan, Nigeria, IITA, 1979. p. 161-169.
31. WOLF, D., LUTH, H.J. Tillage equipment for clod-forming soils. *Trans. ASAE*, 22(5):1029-1032. 1979.



PRINCIPIOS Y MÉTODOS DE PREPARACIÓN DEL SUELO: SU IMPORTANCIA EN EL DESARROLLO DEL CULTIVO

5.1 INTRODUCCION

Este capítulo examina algunas de las más importantes características físicas del suelo, desde el punto de vista agronómico, para el buen desarrollo del cultivo. Después de haber identificado las condiciones óptimas para el cultivo se analiza la eficiencia de varios sistemas de preparación del suelo.

5.2 CARACTERISTICAS FISICAS DEL SUELO QUE INFLUYEN EN EL BUEN DESARROLLO DEL CULTIVO

La germinación de la semilla y el desarrollo de las plantas están influidos por varias condiciones del suelo. Los factores más importantes se discuten a continuación.

5.2.1 Temperatura del suelo^{2,4,8,31,32,43}

En general la germinación de semilla es mejor en suelos calientes donde la temperatura óptima varía entre 18° y

24° C. Las temperaturas mínimas para la germinación son más variables y, por ejemplo, en el caso de trigo y cebada es de 3.5° C y para maíz es 9° C.

En el crecimiento de la planta la temperatura óptima del suelo para la mayoría de cultivos agrícolas es alrededor de 25° C. La Fig. 119 muestra el incremento de producción de materia seca con aumento de temperatura del suelo hasta 25° C en el cultivo de maíz; pasada esta temperatura se notó una reducción en la eficiencia de producción.

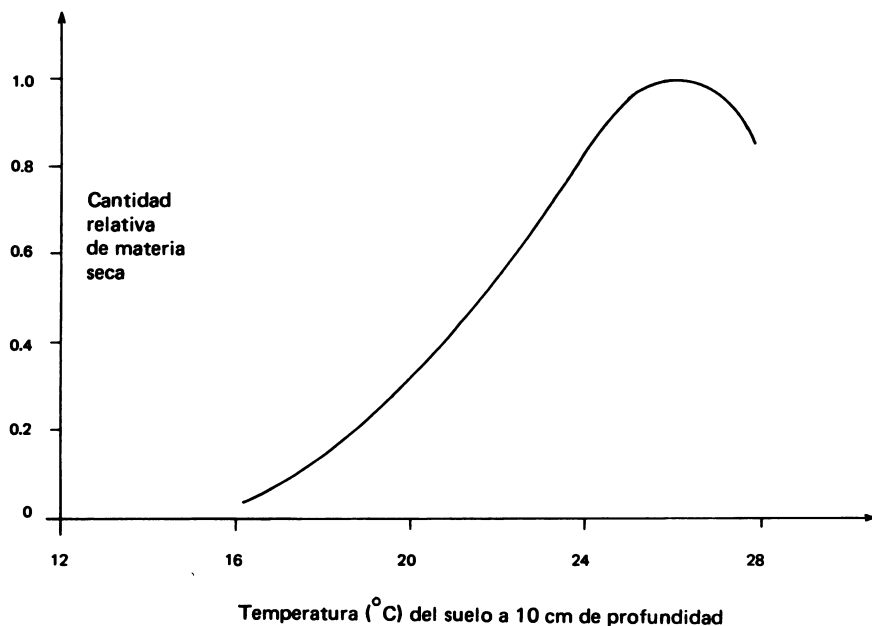


Fig. 119. Efecto de la temperatura del suelo sobre el crecimiento de plántulas de maíz.

La temperatura de un suelo depende de la insolación que recibe y absorbe. En la Fig. 120 se puede observar los cambios típicos de temperatura de la superficie de un suelo durante dos días en una región de clima templado. Además de este efecto básico, la temperatura de suelo depende del color, humedad, cobertura y el ángulo que presenta a los rayos del sol.

Los suelos con colores claros reflejan mayor cantidad de radiación solar que los oscuros. La humedad de un suelo también influye en su temperatura ya que la radiación solar tiene que evaporar el agua

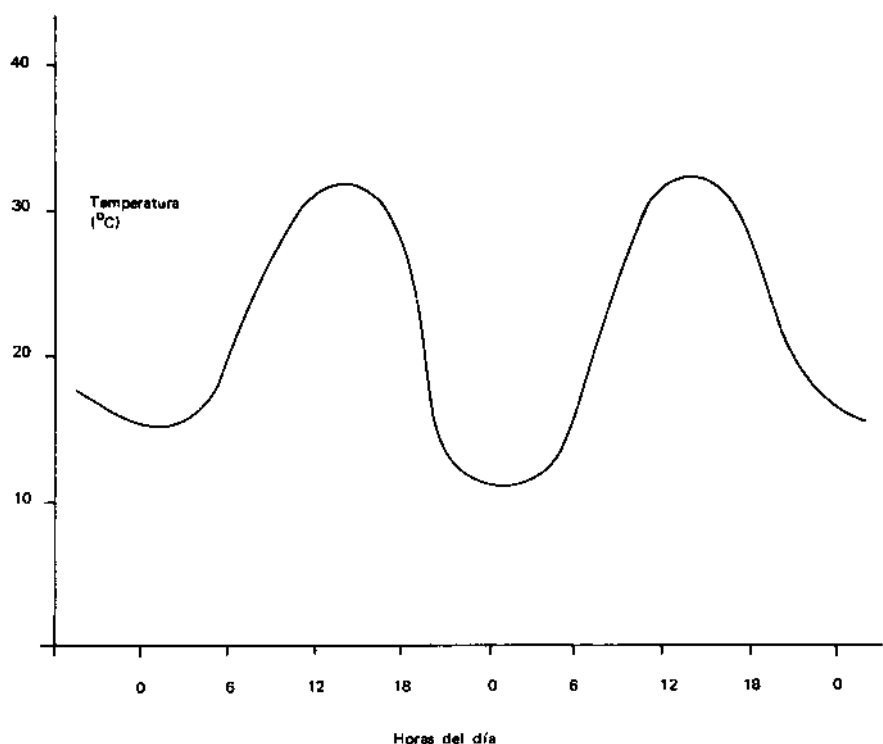


Fig. 120. Fluctuación típica de la temperatura de la superficie de un suelo durante dos días en un clima templado.

antes que entre el aire caliente en los poros, por lo que mejorando el drenaje de un suelo saturado se puede permitir que caliente más rápido.

La temperatura de un suelo es afectada por su cobertura, la que en la práctica puede ser sintética (por ejemplo polietileno), plantas vivas o vegetación muerta dejada en la superficie (*mulch*). El efecto principal (Fig. 121) es nivelar el rango de temperatura durante las veinticuatro horas, disminuyendo la temperatura máxima del suelo en el día y elevando un poco la mínima de la noche.

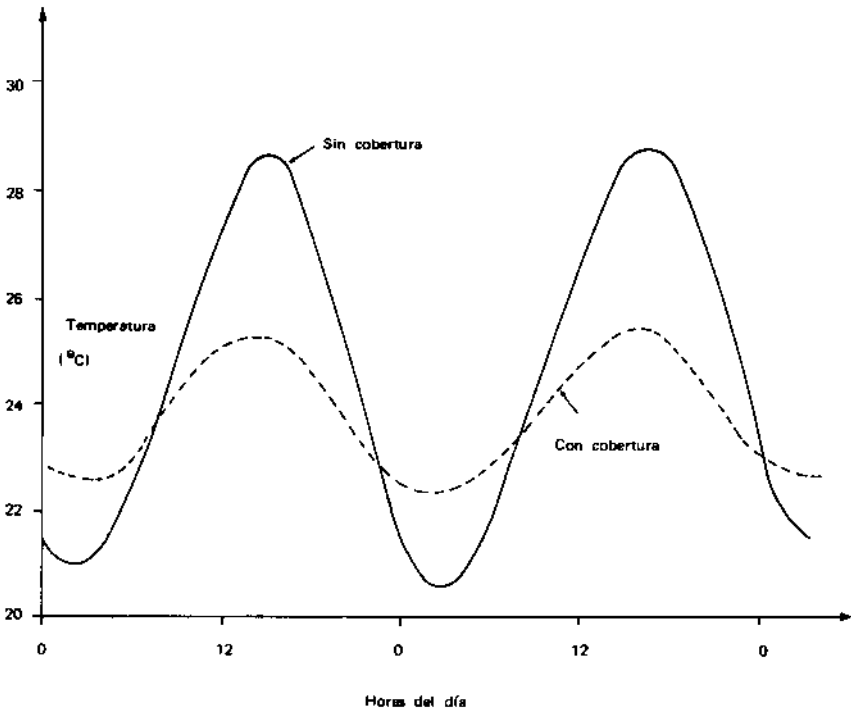


Fig. 121. Fluctuación típica de la temperatura del suelo a una profundidad de 10 cm de acuerdo con la naturaleza de la cobertura superficial (*mulch*).

El ángulo que presenta el suelo a los rayos solares tiene un efecto marcado sobre la energía recibida. Una superficie inclinada para que los rayos de luz tengan un ángulo de incidencia de 90° recibe su energía sobre un área lo más reducida posible, lo que ocasiona un mejor calentamiento. Significa que las pendientes hacia el norte, en el hemisferio sur, reciben más calor que las del sur, produciéndose el caso contrario en el hemisferio norte.

5.2.2 Aireación del suelo^{4,23}

Los poros del suelo contienen una mezcla de agua y de gases, que constituyen la atmósfera del suelo (véase Fig. 20). Las raíces y micro-organismos necesitan oxígeno para su desarrollo, el que aprovechan en la atmósfera del suelo para producir bióxido de carbono; así, la concentración de éste se vuelve mayor en la atmósfera del suelo que en el aire libre y es necesario dejarlo salir para que pueda ingresar más oxígeno.

En el desarrollo normal de las raíces se observa efectos negativos al bajar la concentración de oxígeno hasta 9 a 12 %, y su crecimiento se detiene en concentraciones menores al 5 %. La demanda por oxígeno en una raíz y su sensibilidad al bióxido de carbono aumentan con el incremento de la temperatura del suelo. Estos rangos dependen del cultivo; arroz y algunas especies de *Salix*, por ejemplo, pueden sobrevivir con muy poco oxígeno alrededor de sus raíces.

Los factores con algún efecto sobre el ingreso de oxígeno y el egreso de bióxido de carbono son los siguientes:

- a. el número de poros en el suelo y su tamaño
- b. la cantidad de poros llenos de agua
- c. la existencia de capas de suelo en la superficie
- d. la existencia de estratos impermeables dentro de la estructura del suelo.

Como regla general, la mayoría de cultivos debe tener por lo menos 10 % de los poros llenos de aire. Capas impermeables producidas por la acción de gotas de lluvia o el paso de las ruedas, generalmente deben ser rotas o desmenuzadas para permitir un intercambio de gases (Fig. 122). Normalmente las raíces pueden sobrevivir solamente hasta cuatro días con una capa completa y 10 % de los poros llenos de aire.



Fig. 122. Capas impermeables en un suelo arcilloso debido a riego por aspersión y el paso de tránsito. También se observa la formación de grietas de tensión durante la contracción y el secamiento del suelo.

Los estratos impermeables producidos naturalmente o por mal uso de maquinaria tienen gran efecto sobre el paso de gases, especialmente en las condiciones húmedas, y pueden restringir significativamente el desarrollo de las plantas (Fig. 123).



Fig. 123. Los sistemas de las raíces de plántulas jóvenes de cebada, cultivadas en un ambiente artificial para simular distintos grados de compactación. Izquierda: sistema de raíces sin impedimentos. Centro: tamaño de los poros suficientemente pequeños para restringir el desarrollo longitudinal, pero no lateral de las raíces. Derecha: tamaño de los poros demasiado pequeños para permitir la elongación axial y lateral de las raíces. El desarrollo de los sistemas de raíces con impedimentos alcanza poca profundidad, entonces este es susceptible a las condiciones de sequía o a una fuente deficiente de nutrimentos. (Bibliografía complementaria: SCOTT RUSSELL R. y GOSS M.J. *Physical aspects of soil fertility, the response of roots to mechanical impedance*. Neth. J. Agric. Sci. 22:305-318. 1974).

5.2.3 La capacidad retentiva de agua en el suelo^{4,17,45}

La capacidad retentiva, como se mostró en el Capítulo 2, es afectada por varios factores entre los que se puede mencionar porosidad, porcentaje y tipo de arcilla, contenido de materia orgánica y otros. Los distintos suelos pueden retener un porcentaje de humedad muy variable; lo que interesa es la disponibilidad de agua, la que es conveniente medir en términos de la presión de succión necesaria para extraerla y aprovecharla. Generalmente una planta puede ejercer una succión máxima de unos 15 bares para extraer el agua; esta presión forma la base para definir un **punto de marchitamiento**, que es el contenido mínimo de humedad, en un suelo, bajo el cual empieza a morir la planta.

La **capacidad de campo** constituye el otro extremo del rango de contenido de agua disponible en el suelo. Este no será un suelo saturado pero indica el contenido de humedad al dejarlo drenarse libremente en ausencia de evaporación.

El agua es el vehículo con que la planta se apropia de los nutrientes del suelo, y de allí que su necesidad sea inmensa. El Cuadro No. 6 presenta los rangos típicos del contenido de agua disponible

CUADRO No. 6. Valores típicos de capacidad de campo, punto de marchitamiento y rango de agua disponible para distintos suelos⁴⁵.

Tipo de suelo	Capacidad de campo	Punto de marchitamiento	Agua disponible en el suelo	
	% de humedad por peso			mm/m de suelo
Arcilla	45	30	15	135
Franco-arcilloso	40	25	15	150
Franco-arenoso	28	18	10	120
Arena fina	15	8	7	80
Arena	8	4	4	55

para distintos suelos y la Fig. 124 muestra la presión de succión que la planta debe desarrollar para aprovecharlo. En términos generales un suelo franco es lo más conveniente por tener buen rango de agua disponible y porque la planta requiere poca succión para aprovecharlo.

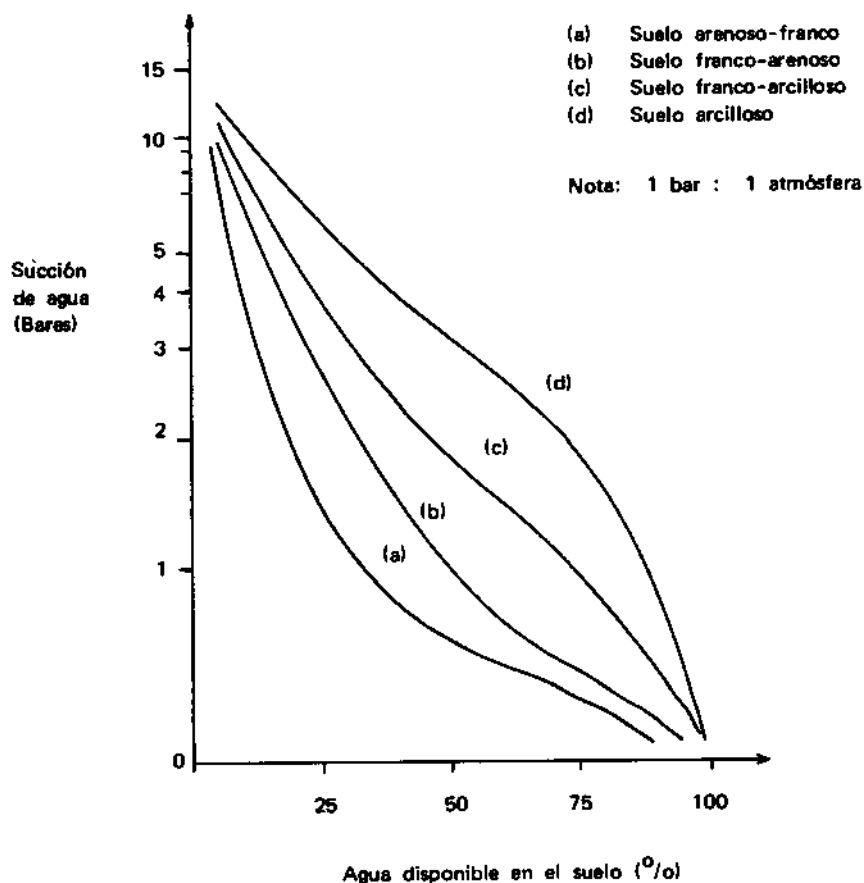


Fig. 124. Características de la presión de succión del agua en varios suelos. Una mayor succión significa mayor dificultad para una planta en aprovechar el agua^{4 5}.

5.2.4 La infiltración del agua^{4,17,45}

La capacidad de un suelo para permitir la filtración del agua es importante por cuanto determina la posibilidad de que el agua de lluvia o de riego llegue a las raíces en vez de escurrirse por la superficie, y porque contribuye a evitar un exceso de agua en la estructura, lo que podría restringir la aireación. La infiltración depende de la estructura y textura del suelo, especialmente en cuanto al número y tamaño de los poros. Asimismo depende del contenido de humedad del suelo; cuanto más seco es éste, más rápida es la infiltración que dicta, lo que varía con el tiempo, como se demuestra típicamente en la Fig. 125.

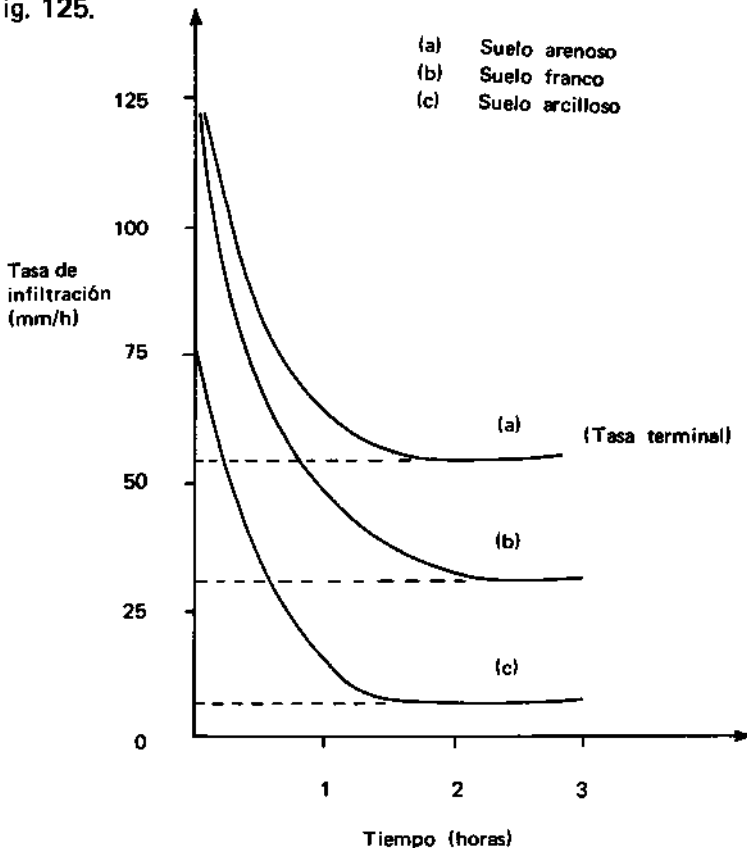


Fig. 125. Tasas de infiltración para varios suelos como función del tiempo de infiltración⁴⁵.

La infiltración se reduce al existir capas sólidas de suelo en la superficie o estratos impermeables en el perfil, los que pueden haberse ocasionado por compactación debida al tránsito en la superficie o a la acción de herramientas inapropiadas de labranza (Figs. 122 y 126).

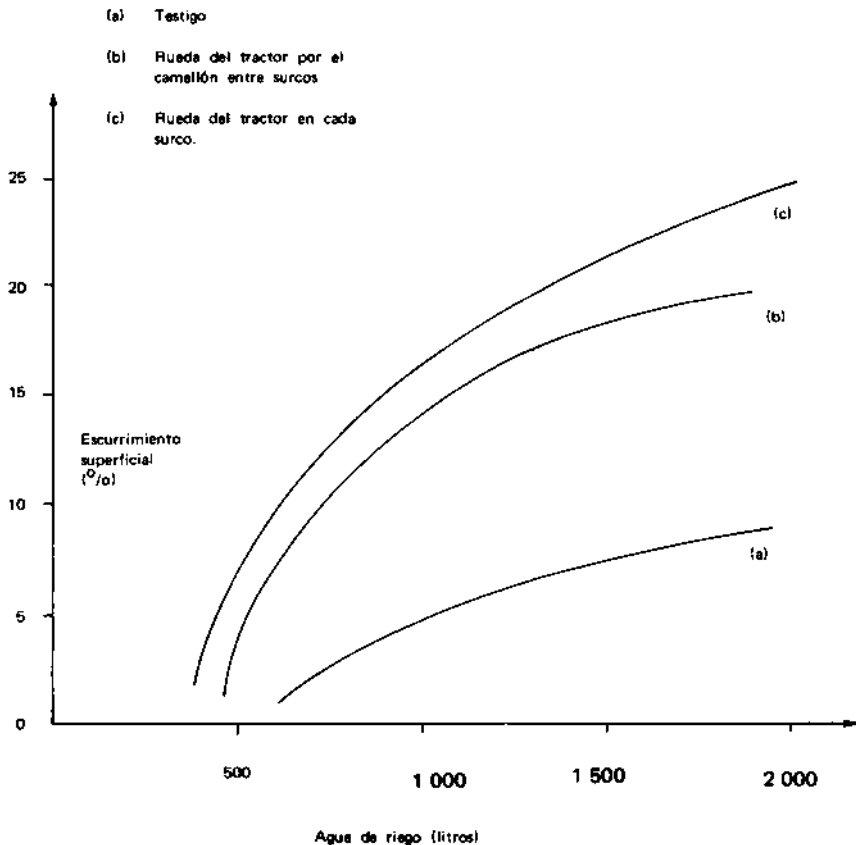


Fig. 126. Efecto del paso de las ruedas del tractor sobre la permeabilidad del suelo.

Las grietas debidas a la acción de raíces o a la contracción de un suelo seco ayudan la infiltración (Fig. 127). El efecto de la materia orgánica depende de la textura del suelo: los suelos arenosos sufren una infiltración reducida mientras que aumenta en los suelos arcillosos; ambas situaciones son beneficiosas.



Fig. 127. Grietas de tensión profundas debido al secamiento y contracción de un suelo arcilloso (véase también la Fig. 122).

5.2.5 Nutrimientos en el suelo

Sobre los requerimientos de la planta en términos de nutrimentos, el lector puede consultar los varios libros especializados en este aspecto. Por ahora será suficiente recordar que la planta puede aprovechar dichos nutrimentos solamente cuando están disueltos en agua, por lo que el contenido de humedad del suelo tiene mucha importancia, como se mencionó en el numeral 5.2.3.

Las fuentes de nutrimentos son artificiales y naturales. Si sólo se cuenta con fuentes naturales, los factores que afectan la actividad de los micro-organismos tendrán efecto sobre la cantidad de nutrimentos disponibles, es decir la aireación del suelo y su temperatura. El desarrollo de las raíces es importante para que las plantas aprovechen un mayor volumen de suelo, y de allí que cualquier restricción a su crecimiento repercuta sobre la cantidad de nutrimentos de que disponga.

5.2.6 Impedimentos mecánicos. Compactación^{4,14,17,28,32,37}

Se denomina impedimentos mecánicos a aquellos factores físicos del suelo que evitan o afectan el crecimiento de las plantas y que normalmente provienen del proceso de compactación de la estructura del suelo; esta compactación disminuye la porosidad y aumenta la densidad en masa.

Varios procesos pueden ocasionar la compactación, entre otros el hinchamiento por un cambio en la humedad del suelo (véase Fig. 129) y el paso de tránsito o el uso de ciertas herramientas en la labranza (Fig. 123). La Fig. 128 representa las huellas de un tractor utilizado para preparar una cama de semilla en forma convencional; se puede apreciar la significación de tanto paso de tránsito al observar en la Fig. 129 que un solo impacto de la llanta sobre el suelo ocasiona entre 70 y 90 % de la compactación que resulta después de impactos múltiples⁴. Esto significa que en los suelos pesados que sufran mayores efectos de la compactación es importante disminuir y controlar el número de pasos de la maquinaria agrícola.



Fig. 128. Simulación del tráfico en el campo para arar, rastrar dos veces y sembrar una cama de semilla con un tractor de unos 40 kW; se indica el grado de compactación resultante.

Un cierto grado de compactación es necesario alrededor de la semilla cuando germina, para facilitar el aprovechamiento de la humedad del suelo. Pero esta compactación solamente es necesaria a la profundidad de la semilla ya que si se compacta desde la superficie tal vez no se ayude a la planta y se esté contribuyendo a la formación de una capa impermeable superficial que afectará el nacimiento de las plántulas; cuando se corra el riesgo de formar una es recomendable aumentar el número de semillas con el objeto de quebrar esa capa por mayor fuerza de emergencia. El continuo humedecimiento y posterior secado de la capa del suelo puede aumentar su resistencia en dos o tres veces. La resistencia disminuye debido principalmente a la cohesión que provoca un aumento de la humedad del suelo, mientras que el problema casi no existe cuando el suelo está a su capacidad de campo (Fig. 34).

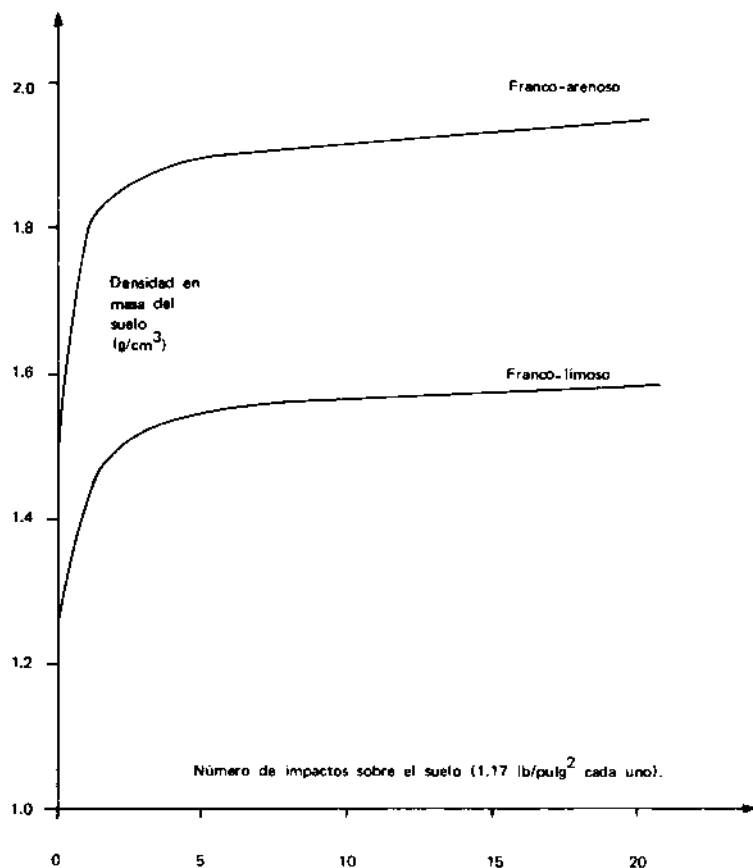


Fig. 129. Efecto del número de impactos sobre la densidad en masa de dos distintos suelos durante una prueba de laboratorio. (Bibliografía complementaria: Hovanesian J.D. y Buchele W.F. *Development of a recording volumetric transducer for studying the effects of soil parameters on compaction*. Trans ASAE 2(1):78-81. 1959).

Al formar estratos compactados por debajo de la semilla se presenta problemas en el crecimiento radicular, distorsionando las raíces (Fig. 123), lo que afecta especialmente a los cultivos cuyos productos finales son raíces, tubérculos u otros similares. La capacidad de las raíces para romper las capas compactadas depende de la disponibilidad de aire, la temperatura y la humedad; si hay una defi-

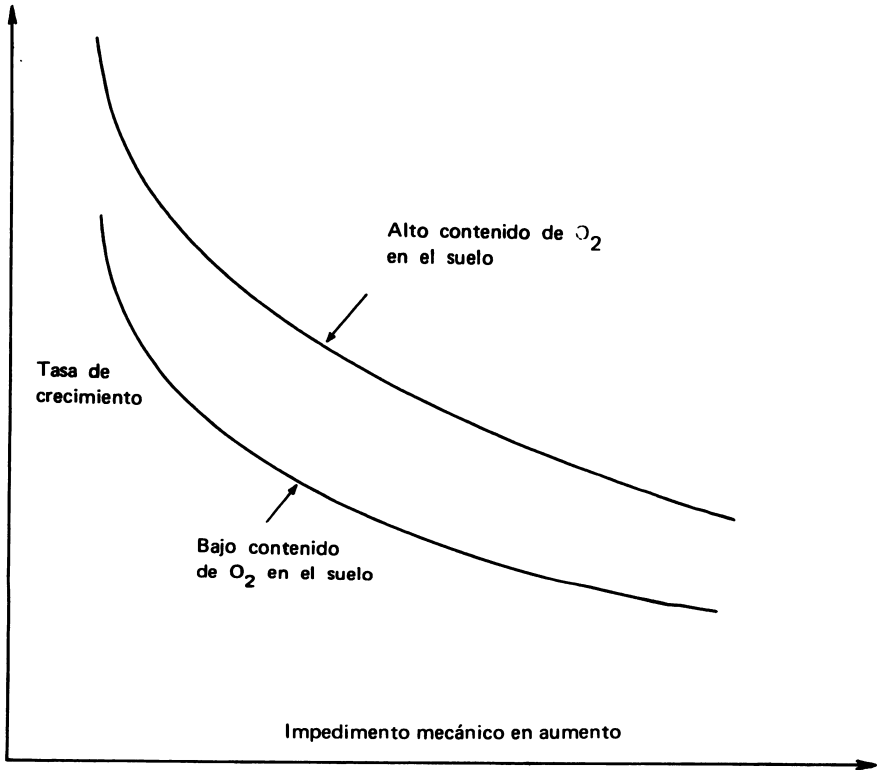


Fig. 130. Efecto de los impedimentos mecánicos (compactación) en el suelo sobre la tasa de crecimiento de la planta.

ciencia de alguno de estos factores existirán dificultades para romper las capas. La Fig. 130 muestra el efecto del contenido de oxígeno en la tasa de crecimiento de las raíces cuando enfrentan impedimentos mecánicos.

En suelos compactados las raíces encuentran dificultades para penetrar; para avanzar aumentan el grosor del extremo de las raíces, lo que deforma el suelo y permite el crecimiento y avance del sistema radicular. Se ha comprobado que en los suelos compactados la dificultad de penetración tiene relación con el desarrollo de la planta. En la Fig. 131 se presenta una relación de producción de materia seca en cebada a distintas presiones sobre la raíz; una notable disminución de la producción de materia seca se produce cuando la raíz ejerce presiones sobre unos 20 kN/m^2 (véase Anexo 7).

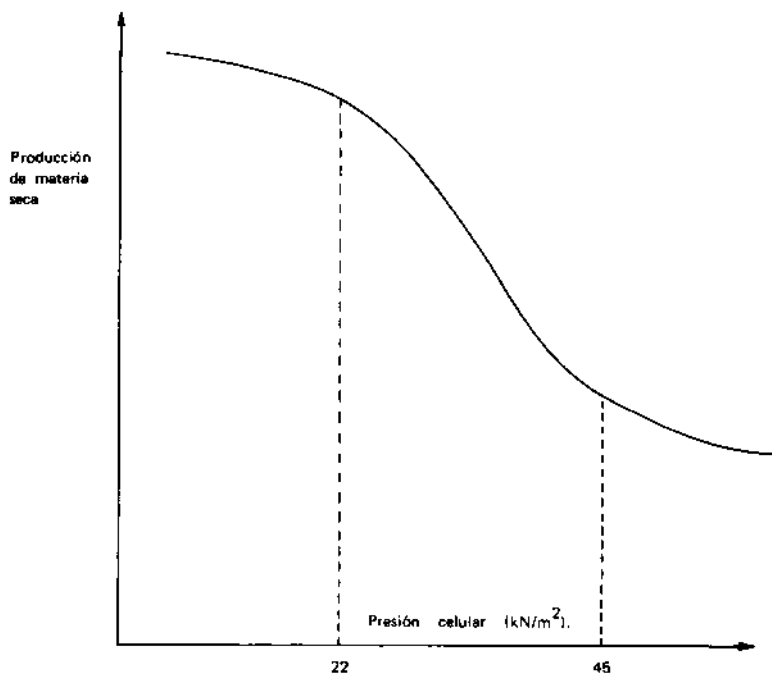


Fig. 131. Efecto de la presión celular en cebada sobre la producción de materia seca.

5.3 FUNCION DE LABRANZA DEL SUELO EN LA PROVISION DE LOS REQUERIMIENTOS FISICOS DEL CULTIVO

Con base en las características físicas que influyen en el desarrollo del cultivo, discutido en el numeral 5.2, se indica a continuación el influjo de la labranza necesaria para alcanzar estos objetivos.

5.3.1 Temperatura del suelo

5.3.1.1 Factores principales

La temperatura depende de los siguientes factores:

- conductividad térmica del suelo;
- calor específico del suelo;
- radiación solar recibida.

a. La conductividad térmica se da en función de la densidad y el contenido de humedad del suelo, por lo que reduciendo la densidad o la humedad ocurre una disminución de la conductividad térmica. La Fig. 132 enseña que la conductividad térmica aumenta rápidamente con pequeñas elevaciones del contenido de agua para los rangos de humedad bajos, tendiendo a estabilizarse para altos contenidos de humedad⁴.

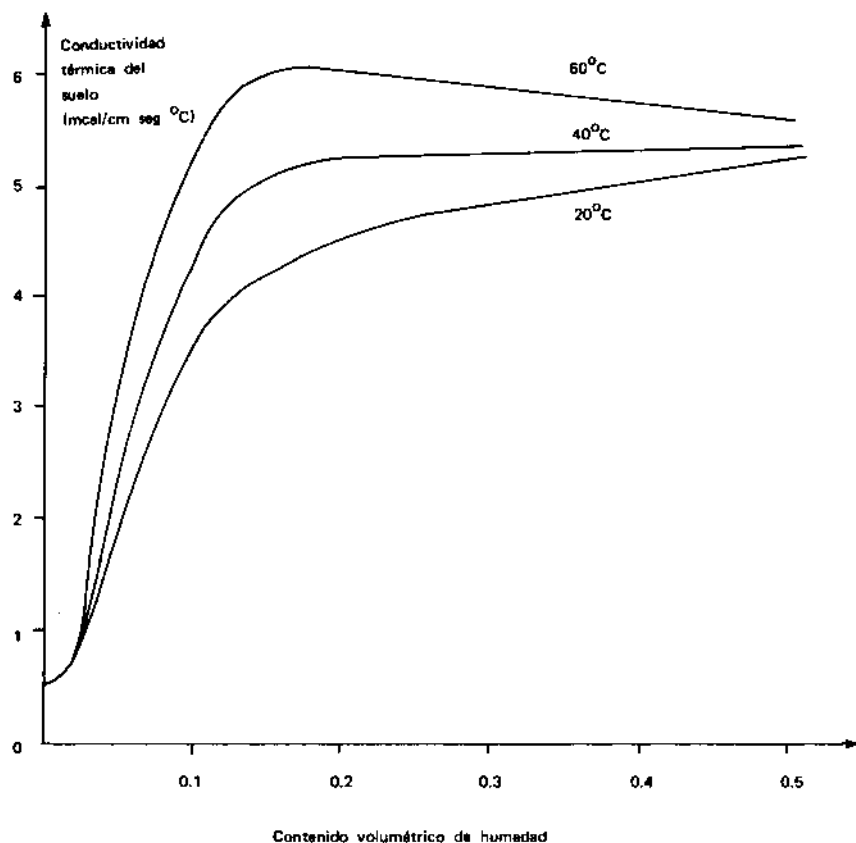


Fig. 132. Relación entre el contenido de humedad y la conductividad térmica de una arena de cuarzo a distintas temperaturas. (Bibliografía complementaria: Van Wijk W.R. *Physics of plant environment*, 2nd ed. North Holland Publishing Co, Amsterdam. 1966. p. 228).

b. El calor específico se da en función del contenido de humedad y de la composición del suelo. Un aumento en la humedad tiene el efecto de incrementar el calor específico. En cuanto a la composición del suelo, el valor depende también de la materia orgánica, debido al contenido relativo de los componentes según el siguiente detalle:

Componente	Calor específico
Agua	1
Mayoría de los componentes sólidos	0.2
Humus	0.4 a 0.5

c. La radiación solar recibida es producto de:

- 1) ángulo de incidencia de los rayos solares;
- 2) naturaleza de la cobertura superficial;
- 3) elevación o altura.

5.3.1.2 Efecto de la labranza

Normalmente la labranza rompe y suelta el suelo, modificando algunos de estos factores condicionantes de la temperatura. El primer efecto reduce la densidad en masa y aumenta la evaporación de la superficie; la consecuente reducción de humedad disminuye el calor específico y, por lo tanto, el suelo puede calentarse más rápidamente. Este sería el efecto superficial ya que la reducción en conductividad térmica (resultado de la reducción de humedad) significaría un aumento más lento de la temperatura del suelo a profundidad; el efecto depende de la cantidad de agua extraída. Una reducción de la humedad baja el calor específico, haciendo que el suelo caliente más rápido, pero al descender la humedad menos que el punto 'X' (Fig. 132) se reduce también la conductividad térmica, tanto que el suelo profundo no se calienta. En la labranza esto se denomina un *mulch* de polvo.

Una cobertura (*mulch*), sea de polvo o de materia orgánica, tiene el efecto de disminuir la temperatura máxima que el suelo alcanza durante el día, dado que la radiación solar es detenida antes que llegue a la superficie; lo contrario ocurre durante la noche, como se ilustró en la Fig. 121.

En resumen, puede decirse que en las zonas donde se haga necesario es posible prolongar la época disponible para los cultivos al mantener la temperatura de la cama de semilla a un nivel más elevado, por medio de insulación provista por un *mulch*, que el nivel de temperatura obtenido en la cama sin insulación. Un *mulch* de polvo requiere secar el suelo, mientras que un *mulch* de cobertura orgánica permite mantenerle y conservar la humedad. En los dos casos, las fluctuaciones en la temperatura del suelo durante el día se reducen.

5.3.2 Aireación

Tal como se indicó previamente, el intercambio de gases entre suelo y atmósfera depende de:

- a. la porosidad;
- b. tamaño de los poros;
- c. contenido de humedad.

Las labores del suelo permiten alterar el tamaño de los agregados y disgregar los aglomerados modificando, por lo tanto, la aireación del suelo. En los suelos sueltos se ha observado que la disponibilidad de oxígeno aumenta incluso sobrepasando, probablemente, las necesidades de las plantas.

Al existir problemas de aireación debido a que los poros están llenos de agua, el drenaje del suelo sería un buen sistema para mejorar la situación.

5.3.3 Contenido de humedad

La capacidad para retener el agua se ve afectada por la porosidad y el tamaño de los poros. En suelos compactos las labores de suelo pueden favorecer esa porosidad y por lo tanto la infiltración del agua. El drenaje interno puede ser mejorado mediante labores que destruyan los estratos impermeables; dichos estratos surgen frecuentemente por el uso inapropiado de la maquinaria.

Las labores que eliminan las malezas son valiosas si se evita la competencia por el agua entre ellas y el cultivo. Durante el proceso de corte y alzamiento de las malezas las raíces del cultivo pueden ser podadas y la capacidad de ellas para absorber el agua quedar reducida; además, el suelo estaría suelto y su contenido de humedad disminuido por la evaporación resultante.

Cuando germinan las semillas es importante tener el suelo compactado alrededor de ellas para que puedan absorber el agua. La producción de una cama entre las hileras sembradas sirve solamente para apoyar la propagación de las malezas, las que pueden luego transformarse en capas que impidan la infiltración.

Considerando estos aspectos, parece que la mejor solución sería producir una cama alrededor de las semillas sembradas y dejar sin labrar el suelo donde éstas no existan (*strip-till*¹⁰).

5.3.4 Elementos nutritivos y materia orgánica

La liberación y disponibilidad de los elementos nutritivos en el suelo están ligadas en gran medida a la actividad de los micro-organismos, lo que a su vez está relacionado con la humedad, aireación y temperatura. La materia orgánica es reducida por los micro-organismos y la velocidad de esta reacción depende de las condiciones del medio en que ellos se encuentran.

El laboreo del suelo puede mejorar esas condiciones de humedad, temperatura y aireación y promover la actividad biológica, favoreciendo el crecimiento de las plantas. En cambio la práctica de labranza en condiciones inapropiadas de humedad, o con mala selección de herramientas, puede dañar la estructura del suelo e impedir el desarrollo del cultivo.

La presencia de malezas ofrece competencia a la absorción de los nutrientes y se las debe eliminar con una labranza apropiada o por métodos químicos.

5.3.5 Impedimentos mecánicos

Como ya se indicó, la mayoría de las capas superficiales y estratos impermeables es ocasionada por la sobremecanización del suelo. Sin embargo, una vez formadas el uso debido de la mecanización puede destruirlas para proveer un ambiente más favorable al desarrollo del cultivo.

5.4 SISTEMAS PARA PREPARAR EL SUELO

5.4.1 Introducción. Laboreo tradicional del suelo

Tradicionalmente las herramientas empleadas para la preparación del suelo son el arado de discos o de vertedera y la rastra de disco o de rejas.

Existe un rango muy amplio de herramientas para la preparación final de la cama de semilla¹ pero la mayoría tiene por objeto eliminar los terrones restantes de la aradura y rastrada y de compactar el suelo desmenuzado para que la semilla tenga un ambiente óptimo de germinación.

Indudablemente, con estas herramientas se puede satisfacer los requerimientos del cultivo, pero es muy probable que en muchos años y para muchos de ellos se esté sobrecultivando el suelo. La labranza excesiva es una de las principales causas de erosión, problema que se agrava sobre todo en donde la mayor parte de la tierra cultivable se encuentra en pendientes, por ejemplo en la sierra andina. Al realizar las labores tradicionales de preparación estos suelos quedan sueltos y desprovistos de vegetación, por lo que al llegar las lluvias son arrastrados en grandes cantidades².

5.4.2 Objetivos de la preparación del suelo y algunas alternativas

En el Capítulo 4 se analizó las labores que pueden cumplir las distintas herramientas de labranza, y en los numerales 5.2 y 5.3 se realizó un resumen de algunos de los aspectos referentes al ambiente óptimo para el desarrollo del cultivo y cómo alcanzarlo por medio de la labranza. A continuación se ofrece un comentario con base en los objetivos tradicionalmente citados para el laboreo del suelo y aunque no se trata de negar la eficiencia del debido uso de las herramientas tradicionales como el arado, la rastra y otros, se ofrece alternativas para considerar también, debido al desarrollo de productos químicos y herramientas modernas, las variedades fitomejoradas y los dramáticos y recientes ascensos del costo de combustible y mano de obra.

5.4.2.1 Control de malezas

El arado de vertedera es capaz de efectuar, por medio de la inversión del suelo, un buen control de malezas durante la preparación de la cama de semillas, pero alternativamente hoy existe un

rango de herbicidas suficiente amplio para controlar casi todas las malezas existentes. Además, la inversión que realiza el arado puede tener el efecto de levantar hasta la superficie las semillas de malezas de los estratos profundos, renovando el problema de su control.

Las labores para controlar mecánicamente las malezas durante el desarrollo del cultivo pueden ser igualmente eficaces pero corren el riesgo de originar la poda dañosa de las raíces y la pérdida innecesaria de la humedad del suelo. Un control químico evita estos problemas aunque se debe efectuar una selección cuidadosa del herbicida para evitar la quema o daño al cultivo.

5.4.2.2 Entierro de vegetación o residuos de la cosecha anterior

Existen distintas opiniones sobre la necesidad de realizar esta actividad. En los nuevos sistemas de cultivo generalmente es reconocida la importancia de dejar estos residuos, talvez previamente picados, como *mulch* protector contra la erosión y como conservador de humedad. Además puede ser beneficioso, en el caso de los cereales de grano pequeño, quemar el rastrojo para facilitar una siembra directa sin labranza previa, lo que también impide la liberación de sustancias tóxicas a la semilla del cultivo y mata las semillas de malezas^{1,6,19,30}.

5.4.2.3 Aireación del suelo

La importancia de la aireación fue ya analizada en el numeral 5.2.2, si bien la necesidad de promoverla por métodos mecánicos es discutible al considerar que actúan procesos naturales que producen canales internos en la estructura del suelo; estos incluyen la acción de animales, microorganismos, raíces de los cultivos anteriores y a veces el hinchamiento y contracción debidos a cambios en la humedad. Existe evidencia de que en la gran mayoría de las regiones en donde se cultiva cereales la necesidad de aumentar la aireación natural es dudosa. Además, se ha encontrado poblaciones cinco a diez veces mayores de lombrices, en aumento anual en los terrenos sin labranza, comparado con los labrados convencionalmente^{6,14}.

Un arado destruye estos canales naturales y no necesariamente los reemplaza con una estructura mejor²⁰; una labranza tradicional sólo afecta el suelo hasta una profundidad de 25 a 30 centímetros, máximo, aunque las raíces, al permitirseles desarrollarse libremente, penetran a profundidades mucho mayores.

5.4.2.4 Preparación de una cama de semilla

Los resultados de ensayos y observaciones recientes han afirmado el conocimiento de que muchos cultivos no necesitan una cama de semilla tradicional sino que pueden beneficiarse de una labranza reducida, e incluso cero labranza, en la que los procesos naturales preparan la cama. Por otra parte, la preparación de una cama de semilla por lo menos entre las hileras sembradas es inútil y puede ayudar la futura propagación de malezas y la pérdida innecesaria de humedad del suelo.

5.4.2.5 Control de insectos y enfermedades

Antes de que ocurriera la introducción de productos químicos y avances en fitomejoramiento era una necesidad labrar el suelo para controlar ciertos insectos y enfermedades; ahora la situación ha cambiado dramáticamente y existen varias soluciones alternativas para dicho control por medio de insecticidas y fungicidas modernos, así como por siembra de variedades que ofrezcan resistencia. Incluso una labranza reducida puede ser beneficiosa y, por ejemplo, se ha encontrado en Europa que la incidencia de *Ophiobolus graminis* y de *Cercospora herpotrichoides* en trigo fue disminuida en suelos no preparados.

5.4.2.6 Incorporación de fertilizantes o cal

Aunque surgen muchos aspectos en esta discusión, ensayos realizados durante muchos años indican que el rendimiento de un cultivo puede ser perfectamente satisfactorio al aplicar fertilizantes o cal sobre la superficie después de plantar o, alternativamente, incorporándolos al suelo con la semilla en el momento de la siembra^{1,3,40}. La mayoría de las sembradoras directas modernas ofrece la facilidad de una aplicación simultánea de fertilizantes además de que puede incorporar aplicadores de insecticidas y fungicidas (Fig. 133).

5.4.2.7 Ayuda en el desarrollo de las raíces

Estudios actualmente realizados (Barnes⁶ y Cannell¹³, por ejemplo) proveen amplia evidencia de que los cultivos de cero labranza provocan progresivamente un mejor sistema de canales naturales para el desarrollo de las raíces, tanto en mayor número como en mayor profundidad. Esta situación ya había sido reconocida anteriormente³² pero sólo en época reciente la evidencia se ha vuelto indiscutible.

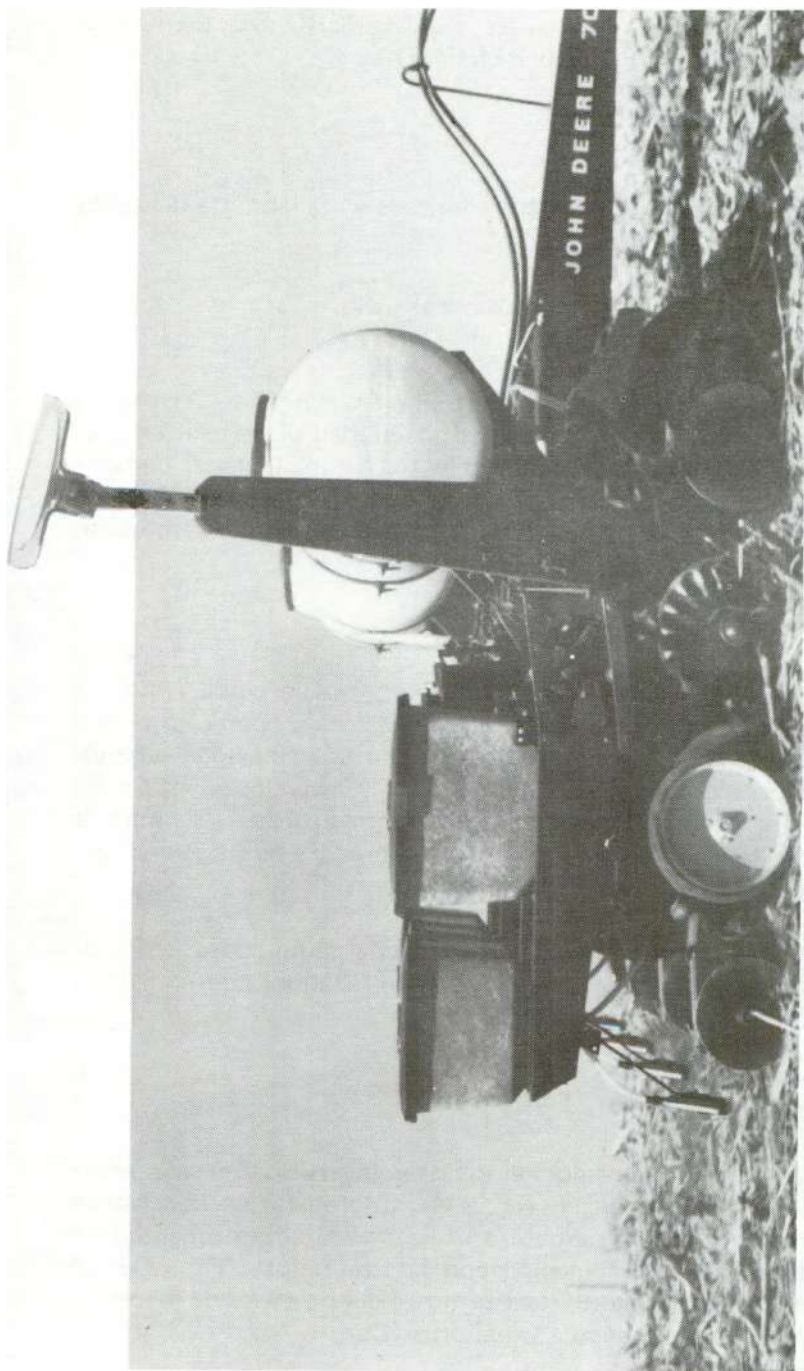


Fig. 133. Una sembradora directa cultivando soya sobre los desechos de la cosecha anterior de maíz. La máquina tiene facilidades para la aplicación de fertilizante e insecticida o fungicida. Se compara el disco cortador corrugado, apto para cero labranza, con el disco ondulado de la Fig. 90, que es el apropiado para una labranza reducida (*John Deere* -- Ponce Yepes, Quito).

5.5 METODOS PARA REDUCIR EL NUMERO DE LABORES DEL SUELO. LABRANZA REDUCIDA

5.5.1 Generalidades

Una regla básica que debe ser adoptada en la labranza del suelo es la siguiente:

'Sólo hacer el mínimo posible al suelo,
lo necesario para que crezca el cultivo'.

Los estudios realizados sobre consumo de energía en la labranza primaria del suelo han demostrado la posibilidad de reducir en más del 50 % (Cuadro No. 7) los requerimientos de una labranza convencional (definido aquí en términos de los tres pasos arado + rastra + sembradora) sin afectar los rendimientos del cultivo^{27,30}; a continuación se discute algunos de estos métodos.

5.5.2 Arar y sembrar en dos operaciones

En los suelos livianos o medianos se puede seleccionar un arado de vertedera tipo cavadora (de cuerpo corto) o bien operar los arados convencionales de vertedera o de discos con una velocidad relativamente alta para provocar en un solo paso la inversión y rotura del suelo. Al efectuar esta operación en el momento de la siembra se puede seguir inmediatamente con una sembradora convencional, reduciendo a dos el número de pasos.

Alternativamente se puede utilizar una sembradora acoplada atrás de un cultivador de dientes (Fig. 209), lo que permite mejorar el suelo arado en el primer paso aunque manteniendo los dos pasos totales.

5.5.3 El arado cincel

Este arado permite romper el suelo sin invertirlo y normalmente se realiza dos pasadas con él (Fig. 134); su preparación consiste en una rastrada antes de la siembra o utilizando alternativamente otra vez al cultivador en combinación con la sembradora (Fig. 209). A pesar de que este sistema representa tres o cuatro pasos de la maquinaria, normalmente se efectúa un ahorro (Cuadro No. 7) en la energía total de la operación.

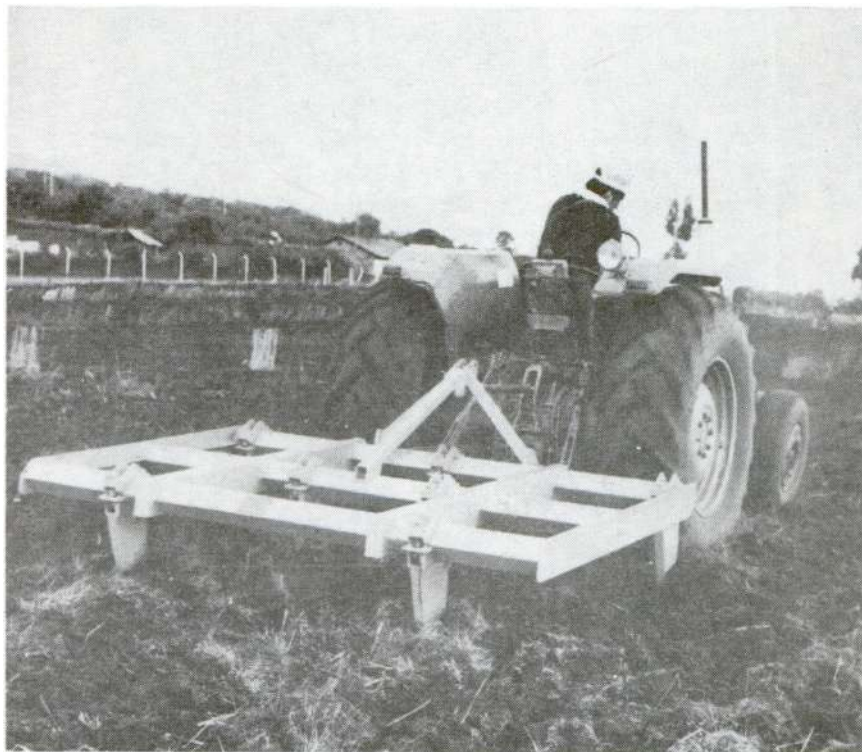


Fig. 134. Efecto de la segunda 'cruza' con un arado cincel en rastrojo de cereales, previamente quemado (véase también la Fig. 63).

Las ventajas del sistema incluyen una mejor protección de la superficie contra la erosión, dado que el rastrojo queda cerca o en la superficie; asimismo se evita el peligro de formar un estrato impermeable al pie del arado y se puede mejorar la infiltración del agua en el suelo.

5.5.4 El arado de poca profundidad

Este arado de vertedera trabaja normalmente entre 75 a 100 mm de profundidad, lo que permite aumentar el número de cuerpos (Fig. 135) y su rendimiento; tiene como único objetivo labrar el suelo en el régimen de la semilla sembrada. El paso del arado es seguido por una rastra o cultivador de dientes y luego por la sembradora; alternativamente estos pueden operar en combinación, como ya se indicó anteriormente (Fig. 209).

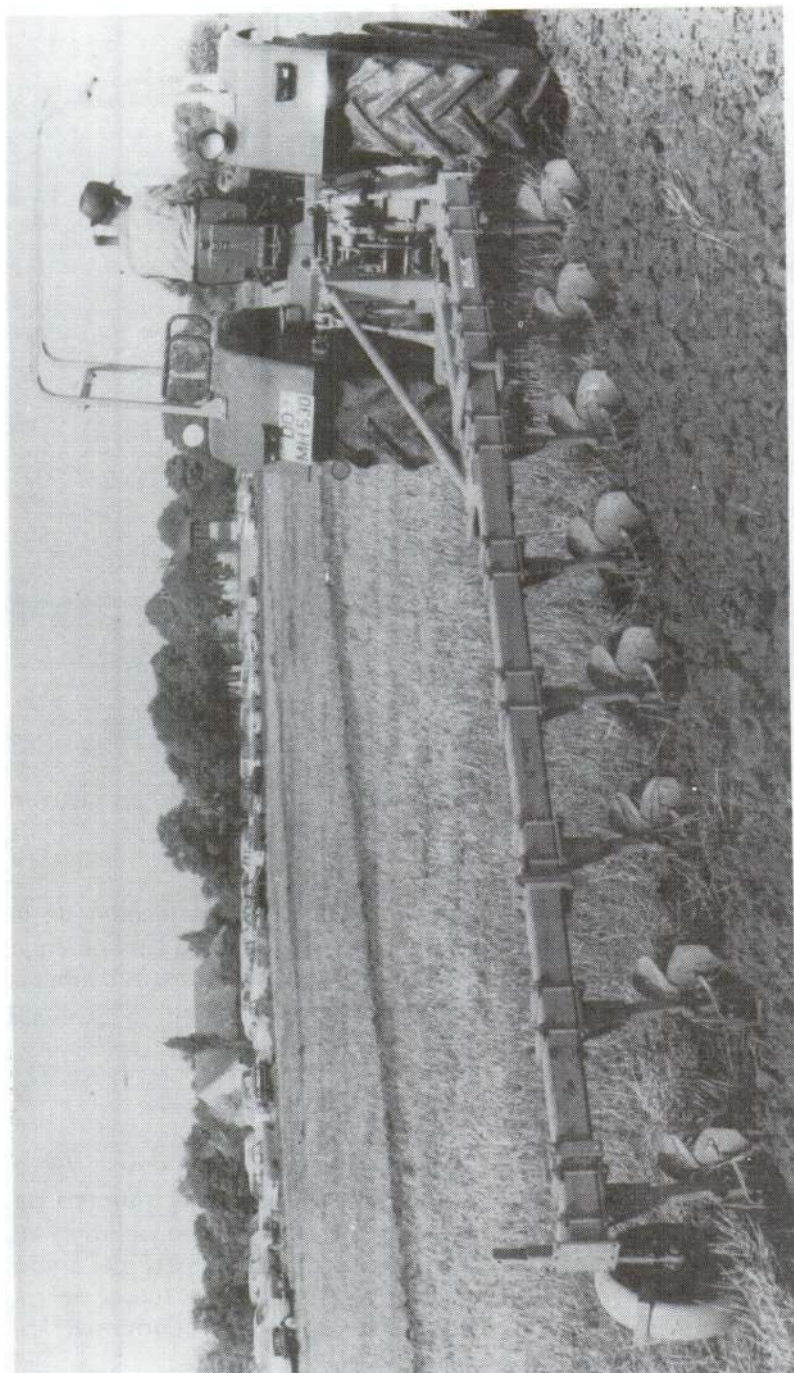


Fig. 135. Un arado de vertedera de poca profundidad (75 a 100 cm) permite aumentar el número de cuerpos trabajando y el rendimiento de la herramienta (Colchester Tillage Ltd, Colchester, Inglaterra).

5.5.5 El cultivador de discos

Esta herramienta^{11,21} tiene mucha aceptación en los Estados Unidos y también efectúa una labranza a poca profundidad, la que puede ser entre 50 y 200 mm. Por razón de su tamaño es más adecuada para los trabajos en grandes extensiones y se le puede utilizar para uno o dos pasos, o en sustitución de una rastra de discos convencional. La Fig. 136 muestra el cultivador en combinación con una sembradora, como un buen ejemplo de una labranza reducida: el rastrojo cortado queda cerca de la superficie para formar un *mulch* con las ventajas discutidas en el numeral 5.3.

5.5.6 El cultivador de cobertura de rastrojo

La Fig. 137 presenta una herramienta para cortar por debajo las raíces de las malezas, a fin de que mueran en la superficie formando una cobertura de materia orgánica o *mulch*. Normalmente se siembra sobre esta cobertura pero a veces es necesario pasar primero una rastra o un apisonador especial de rastrojo (Fig. 138) para picar e incorporar una cobertura bastante densa¹¹; la cobertura ofrece una protección excelente contra la erosión y sirve para conservar la humedad del suelo.

5.5.7 Labranza rotativa en combinación con la siembra

La Fig. 139 muestra una herramienta que permite labrar el suelo con cultivador rotativo y sembrar en un solo paso; el sistema, que ha alcanzado aceptación en Europa y ha sido estudiado en el Ecuador³⁶, hace que el rastrojo quede picado y cerca de la superficie, ofreciendo cierta protección contra la erosión. Otro sistema es el que permite preparar el suelo en fajas de precisión (*strip-till*), las que son sembradas después en el mismo paso¹⁰, con la ventaja de no necesitar labrar el suelo entre las hileras (véase el numeral 5.4.2.4).

5.5.8 Azadón rotativo de alto rendimiento

Estudios de largo plazo en Inglaterra, han resultado en el diseño (Fig. 140) de un azadón rotativo de alto rendimiento que trabaja en combinación con una serie de dientes cinceles para eliminar cualquier estrato impermeable formado por los azadones y también para mantenerlo a su profundidad correcta de trabajo¹⁶

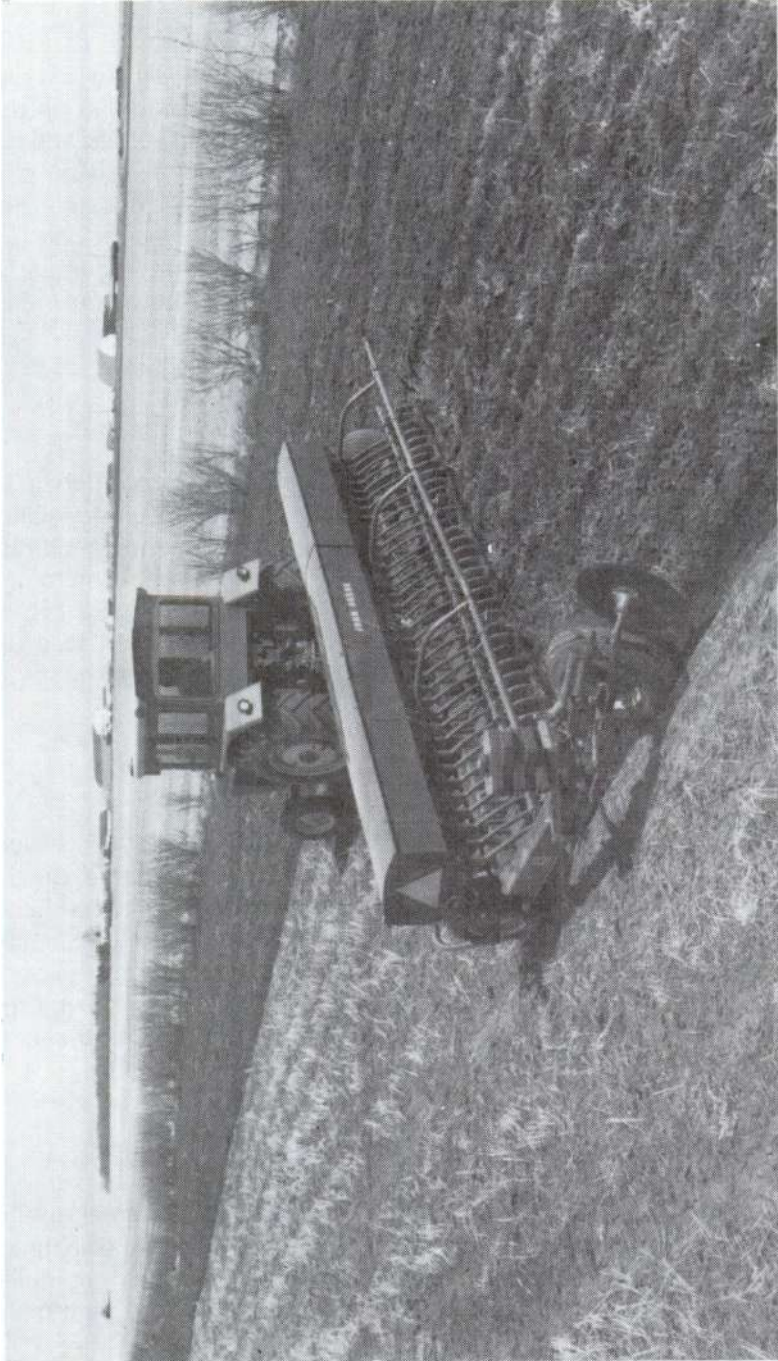


Fig. 136. Un cultivador de discos en combinación con una sembradora demostrando un aspecto de la labranza reducida (*John Deere*, Nottingham, Inglaterra).

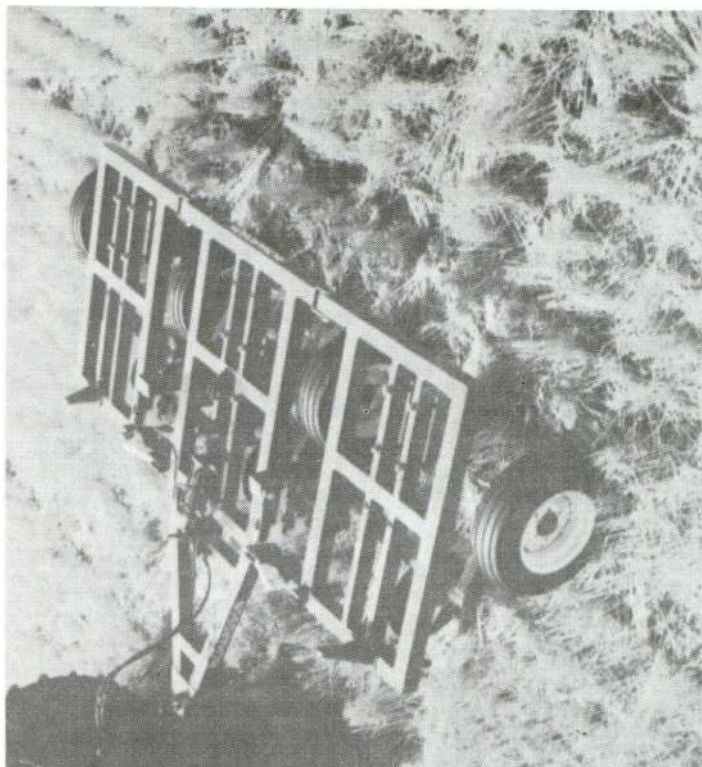


Fig. 137. Un arado especial para formar un *mulch* de rastreo (*Richardson Mng. Co. Inc.*, Cawker City, Kansas, EEUU).

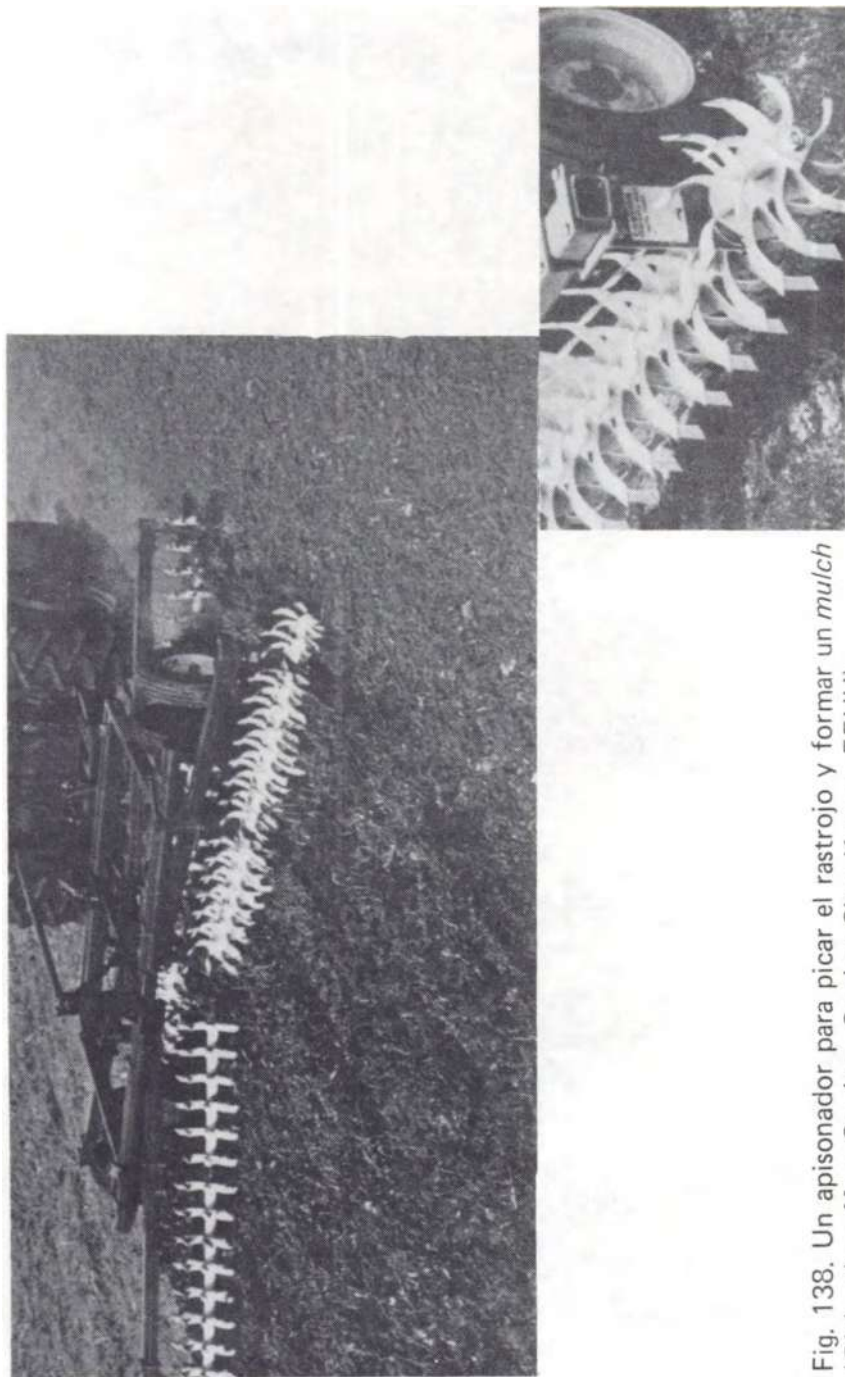


Fig. 138. Un apisonador para picar el rastrojo y formar un *mulch* (*Richardson Ming. Co. Inc., Cawker City, Kansas, EEUU*).



Fig. 139. La herramienta de labranza reducida permite romper el suelo con un cultivador giratorio; sembrar y compactar la cama con un rodillo en un solo paso.

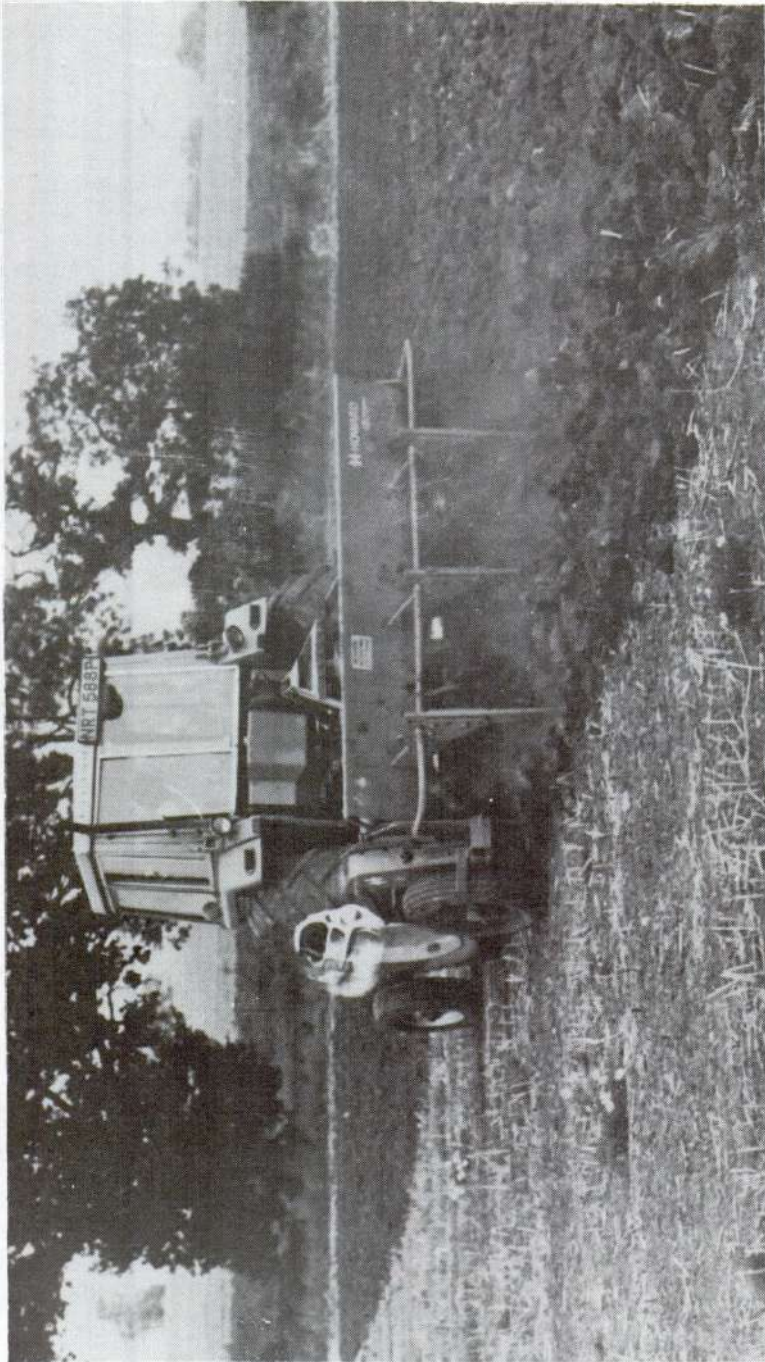


Fig. 140. Un azadón rotativo de alto rendimiento que trabaja en combinación con una serie de cinceles y permite preparar los suelos pesados en un solo paso (*Howard Rotavator Co Ltd*).

Típicamente, los azadones trabajan lentamente a 100 mm y los cinceles a 200 mm de profundidad y se ha medido un rendimiento de 1 ha/hora en un suelo pesado, utilizando un tractor de 56 kW (75 hp). En el sistema se recomienda seguir la herramienta con el cultivador en combinación con la sembradora ya descrita (Fig. 209).

Los resultados del estudio fueron positivos en cuanto a rendimientos de cereales y remolacha de azúcar ensayados hasta la fecha^{27,30}; dicha máquina ya se encuentra en producción comercial.

5.6 CERO LABRANZA Y SIEMBRA DIRECTA

5.6.1 Generalidades

El límite que puede alcanzar una labranza es la eliminación completa de un laboreo mecánico y la utilización de una sembradora que permita introducir la semilla por el rastrojo o vegetación superficial ya controlada químicamente (Figs. 133 y 141). Los controles respectivos de malezas, plagas y enfermedades se realizan por medio del rango moderno de productos químicamente disponibles.

El sistema es relativamente nuevo y todavía sujeto a investigaciones intensas; la técnica no está aún perfeccionada y se dan rendimientos a veces elevados y a veces reducidos en los cultivos, por causas no siempre claras^{12,29}. A pesar de su novedad, existen grandes extensiones en los Estados Unidos y más recientemente en Europa en las que anualmente se siembra un rango amplio de cultivos sin labrar el suelo; a continuación se presenta una lista de algunas de las ventajas de este sistema que, sin duda, va a tener mucha importancia en el futuro.

5.6.2 Algunas ventajas de cero labranza

5.6.2.1 Rendimientos más altos

Aunque las investigaciones continúan, se puede decir que en la mayoría de las situaciones agrícolas sería posible mantener o aumentar los rendimientos empleando cero labranza. Existe una literatura muy amplia de investigaciones que han logrado mantener o mejorar el rendimiento de varios cultivos, por ejemplo maíz para grano y ensilaje^{9,23,24,32,36,39}, trigo^{1,10,14,15,20,30,36}, cebada^{1,30,36}, soya³², arroz¹⁸ y otros.

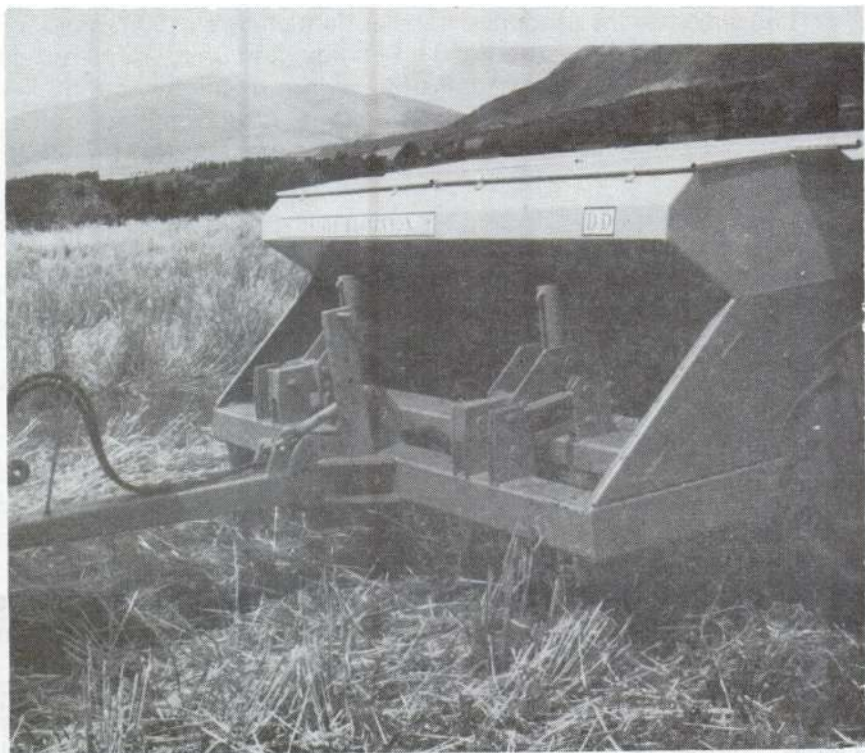


Fig. 141. Una sembradora directa con abresurco de tres discos (véase Fig. 87) que permite sembrar en una cobertura vegetativa, con las malezas controladas químicamente y sin labrar previamente el suelo.

5.6.2.2 Costos reducidos de producción

Para mostrar su ventaja económica sobre un sistema existente el sistema nuevo debe ser o menos costoso o más eficiente. Cero labranza puede cumplir con ambos requisitos, como se prueba en el numeral 5.7. La cero labranza es menos costosa porque demanda menores mano de obra, combustible y desgaste de las herramientas; es más eficiente puesto que permite sembrar en un suelo con una estructura que se mejora progresivamente y al tiempo óptimo para el establecimiento ideal del cultivo^{3,5,7,23,27}.

5.6.2.3 Mejor retención del agua en el suelo

En algunos estudios de maíz^{9,25,26,41} y trigo¹⁴ se ha mostrado que la mayor cantidad de agua en el suelo durante la época de crecimiento es el factor más importante para lograr aumentar el rendimiento al cultivar con cero labranza; se ha comprobado, además, que la evaporación es sumamente reducida bajo el *mulch* y que los efectos de los períodos de sequía son menores.

5.6.2.4 Menor erosión del suelo por agua y viento

Si se deja las plantas o el rastrojo en el suelo sus raíces se adhieren y, aún más importante, la cobertura vegetativa absorbe la energía de las gotas de lluvia. Esto quiere decir que la erosión debida al agua y el escurrimiento es mucho menor, incluso hasta en un trescientos o cuatrocientos por ciento^{3,2,4,4}, además de reducirse la erosión causada por el viento^{3,2}.

5.6.2.5 Menor compactación del suelo

El paso de llantas y herramientas agrícolas causa compactación en los suelos^{17,37}, las primeras alcanzando inclusive hasta un 90 % de la compactación máxima posible⁴. Bajo cero labranza no se produce estratos impermeables a la profundidad del arado y tampoco ocurre la compactación causada por herramientas en la preparación final de la cama de semilla; obviamente, el número de pasos de tránsito es bastante reducido.

5.6.2.6 Siembra efectuada en tiempo oportuno

La preparación convencional del suelo requiere bastante tiempo y a veces es imposible realizarlo debido a la presencia de suelos demasiado húmedos. En muchos suelos la siembra directa puede hacerse no sólo en condiciones relativamente húmedas sino que también se puede sembrar en época más temprana y consecuentemente obtener más y mayores cosechas^{3,32}.

5.6.3 Necesidad de investigaciones futuras

Como en toda nueva tecnología, actualmente existen situaciones que no se prestan completamente a la siembra directa¹⁷; en algunos casos los investigadores han indicado la necesidad de más estudio en las siguientes áreas específicas:

a. Control de malezas

El sistema de cero labranza requiere un buen control químico de las malezas; bajo nuevas condiciones la composición botánica de la población de malezas puede ser cambiada y habría que investigar nuevas mezclas de herbicidas^{2,2,2,9,33,35}.

b. Control de nuevas plagas y enfermedades

La presencia del *mulch* puede atraer algunas plagas, por ejemplo babosas y ratones, y cualquier ambiente nuevo puede presentar condiciones propicias para la propagación de otras más recientes^{2,9,34} y de enfermedades^{4,2}.

CUADRO No. 7. Comparación de los insumos de energía medidos durante seis años de ensayos en el *National Institute of Agricultural Engineering, Inglaterra*^{2,7,30}.

Sistema de labranza	Tipo de suelo y cultivo Consumo de energía en MJ/ha ^(a)					
	Franco arcilloso Trigo de invierno		Franco limoso Trigo de invierno		Franco arcilloso Cebada de primavera	
Arado + rastra + sembradora (Labranza tradicional)	320	(245) ^b	180	(118)	324	(307)
Arado cincel (125 mm) dos pasos + cultivador combinado con sembradora	286	(203)	194	(147)	308	(213)
Arado de poca profundidad (100 mm) + cultivador combinado con sembradora (Labranza reducida)	187	(115)	108	(68)	203	(133)
Azadón rotativo tipo NIAE (rotor a 100 mm, cincheles a 200 mm) + cultivador combinado con sembradora (Labranza reducida)	176	(117)	144	(88)	201	(156)
Herbicida + sembradora directa (Cero labranza)	38	(0)	43	(0)	54	(0)

Notas: a Sin incluir las pérdidas de tracción

b Cifras de labranza primaria entre paréntesis

c 1 MJ (mega Joule) = 10⁶ Joules = 10⁶ Newton metre (véase Anexo 7).

CUADRO No. 8. Predicción de las utilidades totales para varios sistemas de labranza y con distintos tractores, en Inglaterra (Libras esterlinas/ha)^{5, 27, 30}.

Sistema de labranza	Suelo y cultivo Utilidades en £/ha			
	Suelo pesado Cereales	Suelo liviano Cereales	Suelo pesado Cereales/ Remolacha de azúcar	Suelo pesado Cereales/Papa
Arado + cultivador/ sembradora Tractor 56 kW + herramienta	114	150	121	100
Tractor 104 kW + herramienta (Labranza tradicional)	115	148	120	89
Arado cincel (dos pasos) + cultivador/sembradora Tractor 56 kW + herramienta	126	152	132	111
Tractor 104 kW + herramienta	126	151	130	99
Azadón rotativo (tipo NIAE) + cultivador/sembradora Tractor 56 kW + herramienta	136	156	141	114
Tractor 104 kW + herramienta	136	157	139	109
Tractor 56 kW + remolque + Tractor 104 kW + herramienta (Labranza reducida)	135	157	139	109

Nota: En todos los sistemas el cultivador es utilizado en combinación con la sembradora (Fig. 209).

5.7 LA ECONOMIA DE LABRANZA REDUCIDA Y LA CERO LABRANZA

Un análisis económico depende obviamente de los costos locales de los componentes del sistema bajo estudio, por ejemplo maquinaria, combustible, productos químicos, mano de obra y el valor final del cultivo; la opinión expuesta por Mathews²⁷ contiene aspectos aplicables a varias situaciones, pero sobre todo la seguridad de que la labranza reducida y la cero labranza van a tener mayor aceptación en el futuro por ofrecer la posibilidad de una mejor utilidad económica. Los Cuadros Nos. 7 y 8 indican los insumos de energía con base en la superficie y las utilidades encontradas durante ensayos en Inglaterra. Esta información, contemplada a la luz de las demás opiniones y resultados expuestos en este texto y en la bibliografía, tiende a confirmar que en el futuro será necesario considerar un rango de alternativas en vez de la selección simple y tradicional de un arado, una rastra y una sembradora para labrar el suelo y efectuar la siembra.

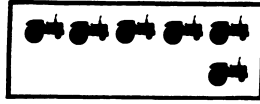
BIBLIOGRAFIA

1. ADAS. Cereals without ploughing. ADAS Profitable Farm Enterprises No. 6. London, ADAS, HMSO, 1978. 80 p.
2. ALESSI, J., POWER, J.F. Corn emergence in relation to soil temperature and seeding depth. *Agron. J.* 63:717-719. 1971.
3. ALLEN, H.P. Direct drilling: its contribution towards conservation of time, energy and labour in crop planting. Farnham, UK, ICI Plant Protection División. 1977. 8 p.
4. ASAE. Compaction of agricultural soils. ASAE Monograph, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1971. 471 p.
5. AUDSLEY, E., DUMONT, S., BOYCE, D.S. An economic comparison of methods of cultivating and planting cereals, sugar beet and potatoes and their interaction with harvesting, timeliness and available labour by linear programming. *J. Ag. Engg. Res.* 23(3):283-300. 1978.
6. BARNES, B.T., ELLIS, F.B. Effects of different methods of cultivation and direct drilling, and disposal of straw residues, on populations of earthworms. *J. Soil Sci.* 30:669-679. 1979.
7. BLACKBEARD, J. Direct drilling scores on work rate, cost and energy input. London, Arable Farming, May 1978. pp. 60-63.
8. BLEVINS, R.L., COOK, D. No tillage: its influence on soil moisture and soil temperature. Progress Report No. 187. Kentucky, USA, University of Kentucky, 1970. 15 p.
9. _____, _____, PHILLIPS, S.H., PHILLIPS, R.E. Influence of no tillage on soil moisture. *Agron. J.* 63:593-596. 1971.

10. BOLTON, F.E., BOOSTER, D.E. Strip-till planting in dryland cereal production. *Trans. ASAE* 24(1):59-62. 1981.
11. BUCKINGHAM, F. Cultivo. Fundamentos de funcionamiento de maquinaria (FMO). Moline, Illinois, EE.UU., John Deere, 1976. 368 p.
12. BUTTERWORTH, W. Direct Drilling: A technical roundup from overseas. *Agric. Engg.* 61(1):30-32. 1980.
13. CANNELL, R.Q., FINNEY, J.R. Effects of direct drilling and reduced cultivation on soil conditions for root growth. *Outlook on Agriculture* 7(4):184-189. 1973.
14. _____. Cultivation and soil plant relationships. *The Agric. Engr.* 34(4):91-93. 1979.
15. _____, ELLIS, F.B. Simplified cultivation: effects on soil conditions and crop yield. *ARC Research Review* 5(2):1-5. 1980.
16. CHAMEN, W.C.T., COPE, R.E., PATTERSON, D.E. Development and performance of a high output rotary digger. *J. Ag. Engg. Res.* 24(3):301-318. 1979.
17. DAVIES, B., EAGLE, D., FINNEY, B. Soil management. 4th edition. Ipswich, UK, Farming Press, 1982. 287 p.
18. ELIAS, R.S. Rice production and minimum tillage. *Outlook on Agriculture* 6(2):67-70. 1969.
19. ELLIS, F.B., LYNCH, J.M. Why burn straw? London, ARC Research Review 3(2):29-33. 1977.
20. _____, ELLIOTT, J.G., POLLARD, F., CANNELL, R.Q., BARNES, B.T. Comparison of direct drilling, reduced cultivation and ploughing on the growth of cereals. *J. Agric. Sc.* 93:391-401. 1979.
21. FAO. Soil erosion by water. FAO Development Paper No. 81. Rome, Italy, FAO, 1965. 284 p.
22. HAKIMI, A.H., KACHRU, R.P. Response of barley crop to different tillage treatments on calcareous soil. *J. Ag. Engg. Res.* 21(4):399-403. 1976.

23. ICI. Handbook of direct drilling. Fernhurst, UK, ICI Plant Protection Division. s.f. 86 p.
24. ———. Direct drilling the silage maize crop. Technical Bulletin No. 6. Fernhurst, UK, ICI Plant Protection Division. s.f. 2 p.
25. JONES, J.N., MOODY, J.E., SHEAR, G.M., MOSCHLER, W.W., LILLIARD, J.H. The no-tillage system for corn (*Zea mays* L.). *Agron. J.* 60:17-20. 1968.
26. ———, ———, LILLIARD, J.H. Effect of tillage, no-tillage and *mulch* on soil water and plant growth. *Agron. J.* 61:719-721. 1969.
27. MATHEWS, J. The power requirements for tillage in the next decade. *The Agric. Engr.* 34(4):99-104. 1979.
28. McKYES, E., NEGI, S., DOUGLAS, E., TAYLOR, F., RAGHAVAN, V. The effect of machinery traffic operation on the physical properties of a clay and on yield of silage corn. *J. Ag. Engg. Res.* 24(2):143-148. 1979.
29. NEWCOMER, J.L. No-till farming: its not for everyone. *Crops and Soil Magazine*, 1978. 15-16. December 1978.
30. PATTERSON, D.E., CHAMEN, W.C.T., RICHARDSON, C.D. Long term experiments with tillage systems to improve the economy of cultivations for cereals. *J. Ag. Engg. Res.* 25(1):1-35. 1980.
31. PHILLIPS, R.E. Soil water, evapotranspiration and soil temperature in no-tilled soil. No-tillage Research Conference Proceedings, Kentucky USA, University of Kentucky, 1974. p.6.
32. PHILLIPS, S.H., YOUNG, H.M. No-tillage farming. Milwaukee, Wisconsin, USA, Reiman Associates, 1973. 224 p.
33. ———. No tillage – past and present. No-tillage Research Conference Proceedings, Kentucky, USA, University of Kentucky, 1974. p. 1.
34. RANEY, H. Insects in no-tillage soybeans. No-tillage Research Conference Proceedings, Kentucky, USA, University of Kentucky, 1974. p. 59.

35. RIECK, C.E., HERRON, J.W. Weed control in no-till corn and soybeans. No-tillage Research Conference Proceedings, Kentucky, USA, University of Kentucky, 1974. p. 24.
36. SIMS, B.G., ZAMBRANO, J., ORBE, G., PADILLA, A., ASHBURNER, J.E. Estudios preliminares en la reducción de labranza en cebada, maíz y trigo en la Sierra Ecuatoriana. Boletín Técnico No. 37, Quito, Ecuador, Depto. de Ing. Agríc., INIAP, 1981. 54 p.
37. SOANE, D.B. The effect of traffic and implements on soil compaction. J. Instn. Agric. Engrs. 25(3):115-126. 1970.
38. _____, PIDGEON, J.D. Tillage requirement in relation to soil physical properties. Soil Sci. 119:370-384. 1975.
39. SOZA, R.F., VIOLIC, A.D., KOCHER, F., STILWELL, T. Zero-tillage in the maize crop. Mexico, CIMMYT, 1978. 16 p.
40. THOMAS, G.W. Fertilization for no-tillage. No-tillage Research Conference Proceedings, Kentucky, USA, University of Kentucky, 1974. p. 20.
41. TRIPLETT, G.B., VANDOREN, D.M., SCHMIDT, B.L. Effect of corn (*Zea mays* L.) stover mulch on no-tillage corn yield and water infiltration. Agron. J. 60:236-239. 1968.
42. WILLIAMS, A.S. No-till and plant disease. No-tillage Research Conference Proceedings, Kentucky, USA, University of Kentucky, 1974. p. 66.
43. WILLIS, W.O., AMAMIYA, M. Tillage management principles: soil temperature effects. National Conservation Tillage Conference Proceedings, Des Moines, USA, 1973 pp. 22-24.
44. WIJEWARDENE, R. Appropriate technology in tropical farming systems. World Crops. 30(3):128-134. 1978.
45. WITHERS, B., VIPOND, S. Irrigation design and practice. London, Batsford, 1974. 306 p.



MECÁNICA DEL TRACTOR

6.1 TRABAJO DEL TRACTOR EN SUPERFICIE PLANA

6.1.1 Análisis de las fuerzas

Las fuerzas que actúan sobre el tractor durante el trabajo son numerosas, complejas y en general varían continuamente. Su análisis se simplifica al hacer ciertas suposiciones cuyo efecto debe ser tomado en cuenta para entender más profundamente el comportamiento del tractor bajo las condiciones del campo.

Primero se estudia el caso de un tractor convencional al trabajar en superficie plana. Se puede eliminar el efecto de las fuerzas de aceleración si la velocidad del tractor es uniforme. La resistencia al rodado es catalogada con valor cero: este tema se discutirá ampliamente en el Capítulo 9.

La fuerza variable resultante de la herramienta se considera que actúa inclinada al horizonte, como se describe en el Capítulo 7; queda solamente identificar la posición en que operan las fuerzas,

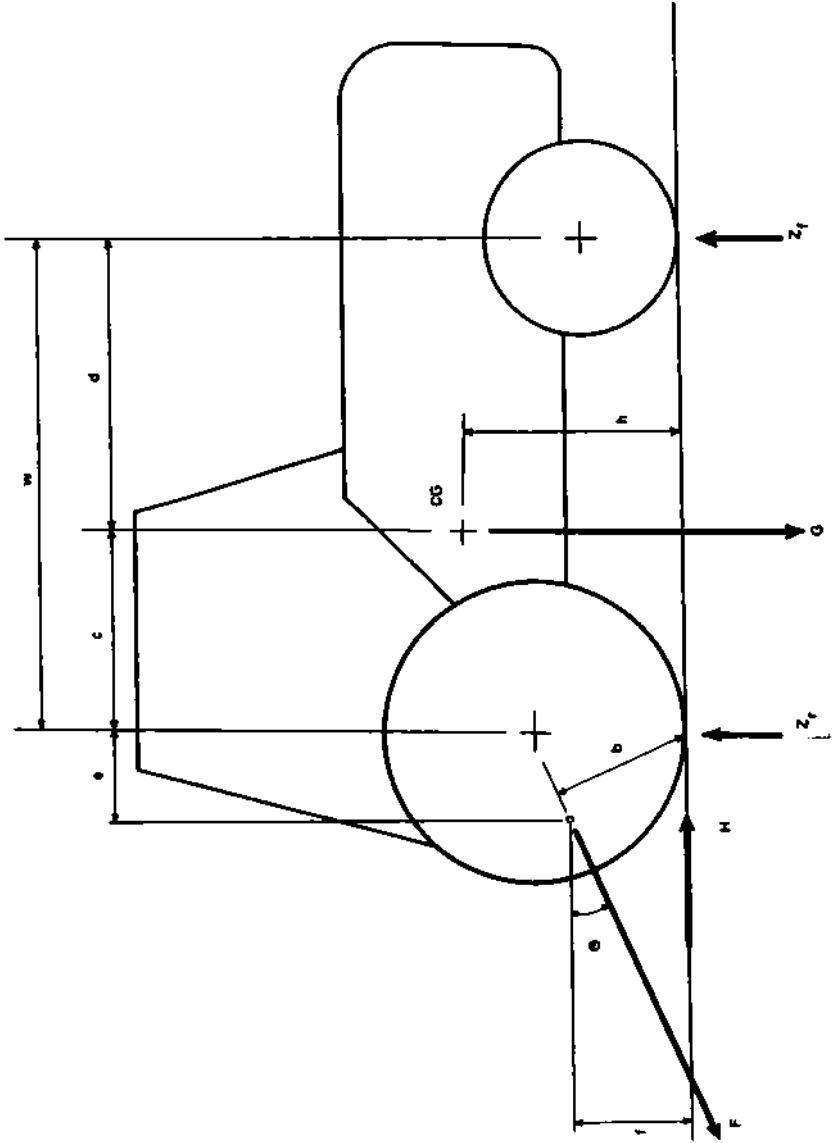


Fig. 142. Tractor trabajando en superficie plana y mostrando sus fuerzas y dimensiones principales.

como se demuestra en la Fig. 142, en la que debe notarse que el sentido de las flechas indica la dirección en que las fuerzas actúan sobre el tractor, y no al contrario.

La situación de equilibrio citada provee tres distintas ecuaciones expuestas a continuación:

El equilibrio de las fuerzas horizontales da:

$$H = F \cos \theta \quad (1)$$

El equilibrio de las fuerzas verticales da:

$$Z_f + Z_r = G + F \sin \theta \quad (2)$$

Los momentos alrededor del punto de contacto de la llanta trasera dan:

$$Z_f w = G c - F b \quad (3)$$

La Ecuación 3 es la más simple al cotizar las dimensiones del tractor como valores λ , que son las fracciones de la distancia entre ejes w . Este sistema hace a las ecuaciones aplicables para un rango de tractores de la misma forma.

$$Z_f = \frac{G c}{w} - \frac{F b}{w}$$

$$Z_f = G \lambda_c - F \lambda_b \quad (4)$$

Poniendo (4) en (2) y ordenando, da:

$$Z_R = G + F \sin \theta - G \lambda_c + F \lambda_b$$

$$= G (1 - \lambda_c) + F \sin \theta + F \lambda_b$$

Pero: $1 - \lambda_c = \frac{w - c}{w} = \frac{d}{w} = \lambda_d$

Entonces: $Z_r = G \lambda_d + F \lambda_b + F \sin \theta \quad (5)$

Transfe- rencia de peso	Adición de peso
-------------------------------	-----------------------

6.1.2 Transferencia y adición de peso

Las ecuaciones (4) y (5) muestran dos efectos importantes de la resultante F de la fuerza inclinada de la herramienta sobre la reacción Z_r de la rueda trasera.

- a. La **transferencia de peso** de $F \lambda_b$ desde el eje delantero hasta el posterior.
- b. La **adición de peso** de $F \sin \theta$ a la reacción del eje posterior, lo cual tiene valor positivo en el caso de que F esté inclinada ($\theta > 0$).

Estos dos efectos son importantes en el diseño de un tractor con capacidad para desarrollar alta tracción. Al aumentar la reacción vertical sobre las llantas de mando se alcanza mejor tracción (ver Cap. 9), lo que significa que para un tractor convencional con mando en las llantas traseras la fuerza de la herramienta ayuda a aumentar dicha capacidad de tracción.

El valor de la transferencia de peso aumenta por medio de un punto de acople más alto (mayor λ_b), aunque se debe tener cuidado de no transferir tanto peso del eje delantero ya que se pierde maniobrabilidad y, como resultado, finalmente ocurre el volcamiento hacia atrás; normalmente la maniobrabilidad es inadecuada al bajar la reacción sobre el eje delantero hasta un valor menor al 20 % del peso total del tractor G .

Al incrementar la inclinación de la fuerza resultante de la herramienta (aumentar θ), se debe aumentar la adición de peso, lo que se cumple por medio del diseño; en la Fig. 143 por ejemplo, se eleva el valor de θ del tractor con remolque al diseñar el eje del remolque hacia atrás. La adición de peso y el valor de θ no afectan ni la maniobrabilidad ni la estabilidad.

6.1.3 Distribución estática del peso del tractor

Las ecuaciones (4) y (5) también dan la distribución estática del peso del tractor. Un tractor sin carga tiene $F = 0$.

$$\text{Reacción sobre las llantas delanteras} \quad Z_f = G \lambda_c \quad (6)$$

$$\text{Reacción sobre las llantas traseras} \quad Z_r = G \lambda_d \quad (7)$$

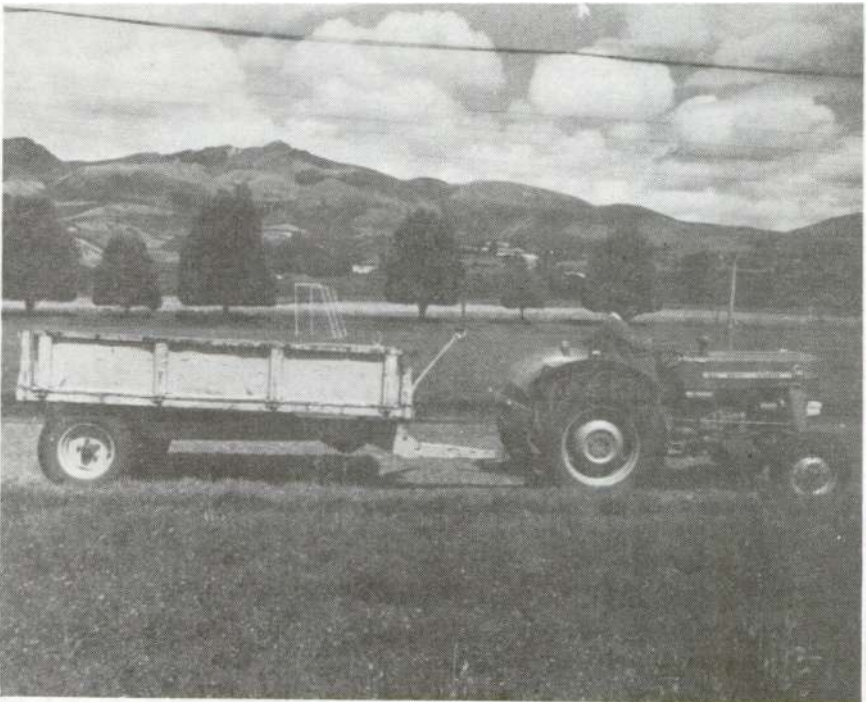
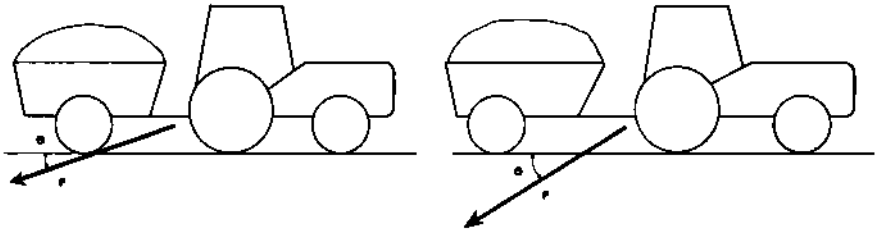
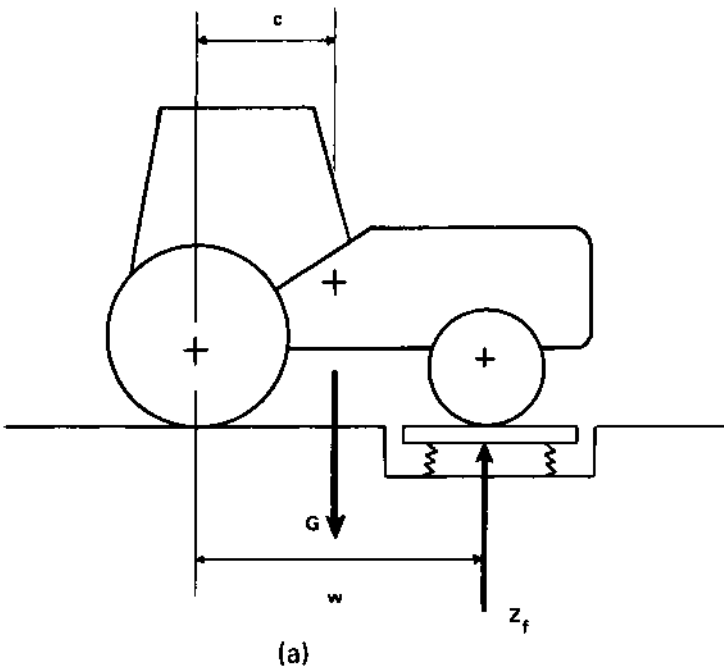


Fig. 143. La ubicación del eje del remolque hacia atrás aumenta la inclinación θ de la fuerza F y aumenta la adición de peso al tractor.



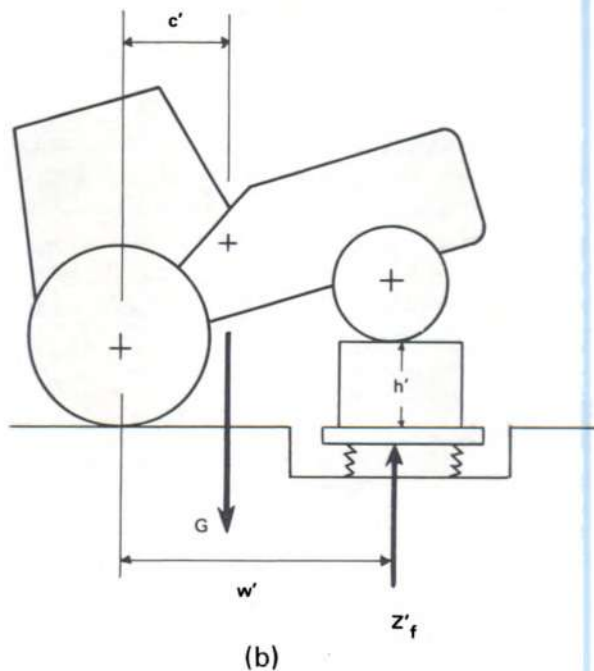


Fig. 144. Se determina la ubicación del centro de gravedad al pesar el tractor en posición nivelada e inclinada.

Normalmente $\lambda_c \cong 1/3$ para los tractores convencionales con mando en las llantas traseras, lo que da más de dos tercios del peso sobre las llantas de mando durante el trabajo con una herramienta. En el caso de los tractores de doble transmisión (Fig. 227) típicamente $\lambda_c \cong 0.6$, para dar más o menos una distribución uniforme del peso sobre los dos ejes con llantas de mando durante el trabajo. Se pierde la capacidad para desarrollar una tracción máxima al alterar mucho estos valores de λ_c en el diseño del tractor, pero a veces se puede justificar por la economía de fabricación en el caso de un tractor de doble transmisión construido como una modificación de un tractor convencional (Fig. 228).

Con esto se recalca el conocimiento de que la posición del centro de gravedad del tractor tiene suma importancia; a continuación se muestra algunos métodos para determinarlo.

6.2 DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL TRACTOR

6.2.1 Tractores de llantas

El método más simple para determinar la posición del centro de gravedad del tractor es por medio de un gráfico a escala. Primero se debe pesar el tractor sobre una báscula nivelada u otro equipo para obtener el peso total G ; luego se pesa la reacción de las llantas delanteras Z_f con el tractor en posición horizontal (véase Fig. 144) y la Ecuación 6 da la distancia (c) del centro de gravedad del eje trasero.

$$Z_f = G \lambda_c$$

$$c = \frac{Z_f}{G} w \quad (8)$$

Además se debe medir la distancia entre ejes (w) y los radios estáticos al rodado de las llantas delanteras (r_f) y traseras (r_r) (Fig. 225); luego se dibuja el gráfico a escala, como en la Fig. 145, incluyendo la línea de acción del peso del tractor.

A continuación se debe soportar las llantas delanteras en una posición elevada sobre la báscula para dar una inclinación entre 20° y 25° al tractor (Fig. 144). Se mide la distancia proyectada a la horizontal (c') del centro de gravedad al eje posterior en igual forma.

$$c' = \frac{Z'_f w'}{G} \quad (8a)$$

Se debe dibujar estas nuevas adiciones en el gráfico de la Fig. 145 y se notará que la inclinación de las líneas proyectadas θ está dada aproximadamente por:

$$\tan \theta = \frac{h_1}{w}$$

por lo cual h_1 es la elevación dada a las llantas delanteras. El pequeño error existente se debe a la diferencia en las deflecciones de las llantas, lo que ocurre por el cambio de la distribución del peso del tractor.

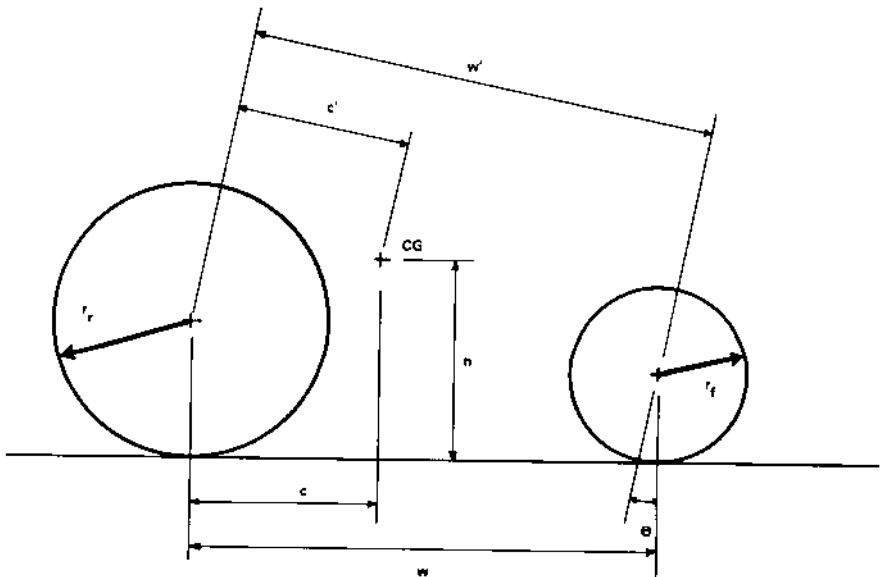


Fig. 145. Construcción gráfica para interpretar los resultados del peso (Fig. 144) y localizar el centro de gravedad.

El centro de gravedad queda en la intersección de las dos líneas de acción del peso del tractor y se puede medir su altura (h) en el gráfico. Es mejor verificar la posición al repetir las mediciones con el tractor inclinado en una o dos posiciones diferentes, con lo que resulta un grupo de puntas de intersección.

La ubicación lateral del centro de gravedad se determina al pesar la reacción lateral Z_s de las llantas delanteras y traseras (Fig. 146). La distancia se calcula como se indicó anteriormente:

$$y = \frac{Z_s t}{G} \quad (8b)$$

donde (t) es la trocha del tractor.

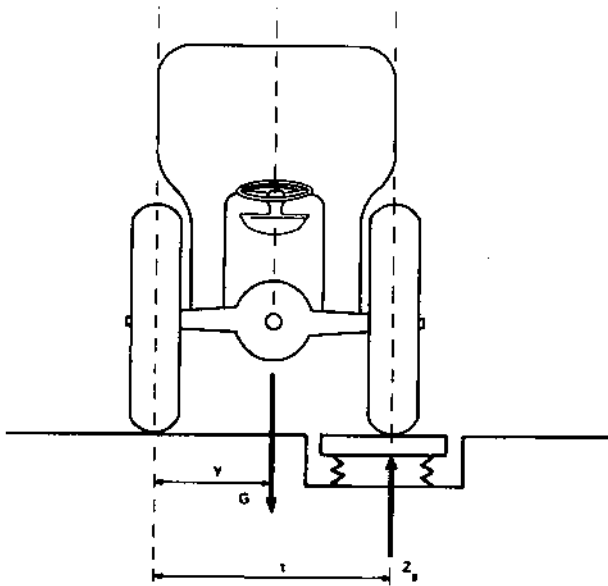


Fig. 146. Determinación del peso del tractor para obtener la posición lateral del centro de gravedad.

6.2.2 Tractores de oruga

6.2.2.1 Método de báscula

La ubicación lateral del centro de gravedad se determina como se indica arriba (Fig. 146 y Ecuación 8b) pero los demás métodos presentan dificultades ya que el peso del tractor está distribuido a lo largo de la oruga. Se puede evitar esta dificultad, en caso de que no sea necesario determinar la altura del centro de gravedad, soportando el tractor sobre filos de acero angulado, como se muestra en la Fig. 147.

El acero angulado debe tener suficiente tamaño como para que las orugas de tracción no toquen el suelo y, probablemente, será necesario amarrar las orugas en el centro. La Ecuación 8 da los cálculos, aunque se debe observar que las distancias se refieren a la posición de los filos.

6.2.2.2 Método de suspensión

El método de suspensión (Fig. 148) es conveniente para determinar la altura del centro de gravedad. Se coloca un tablón, verticalmente, por un lado del tractor y cerca de la posición del centro de gravedad, mientras que el tractor queda suspendido con cuatro cables de un solo gancho. Se utiliza un teodolito para marcar un plano vertical pasando por el gancho de suspensión; al principio será necesario nivelar el tractor y orientarlo para que quede perpendicular al plano descrito por el teodolito.

A continuación se marca la línea del plano vertical sobre el tablón, abajo del punto de suspensión. Se eleva el tractor con varias inclinaciones para marcar más líneas verticales y el punto de intersección de éstas da la posición del centro de gravedad. Normalmente una inclinación de unos 15° hacia adelante y otra hacia atrás resultan convenientes.

En caso de que se necesite determinar con frecuencia el centro de gravedad podrá resultar conveniente y más rápido construir un aparato especial, el que generalmente consiste de un tipo de plataforma de balanza, como se indica en las normas técnicas^{4,13,14} pertinentes.

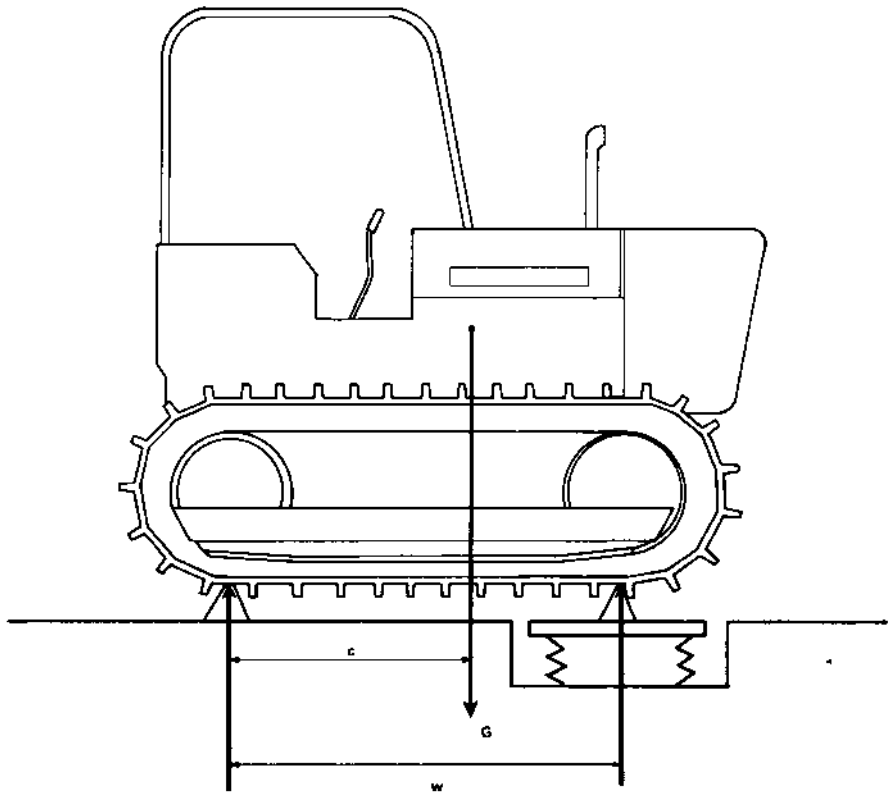


Fig. 147. Determinación de la posición longitudinal del centro de gravedad para el tractor de oruga utilizando pivotes y una báscula.

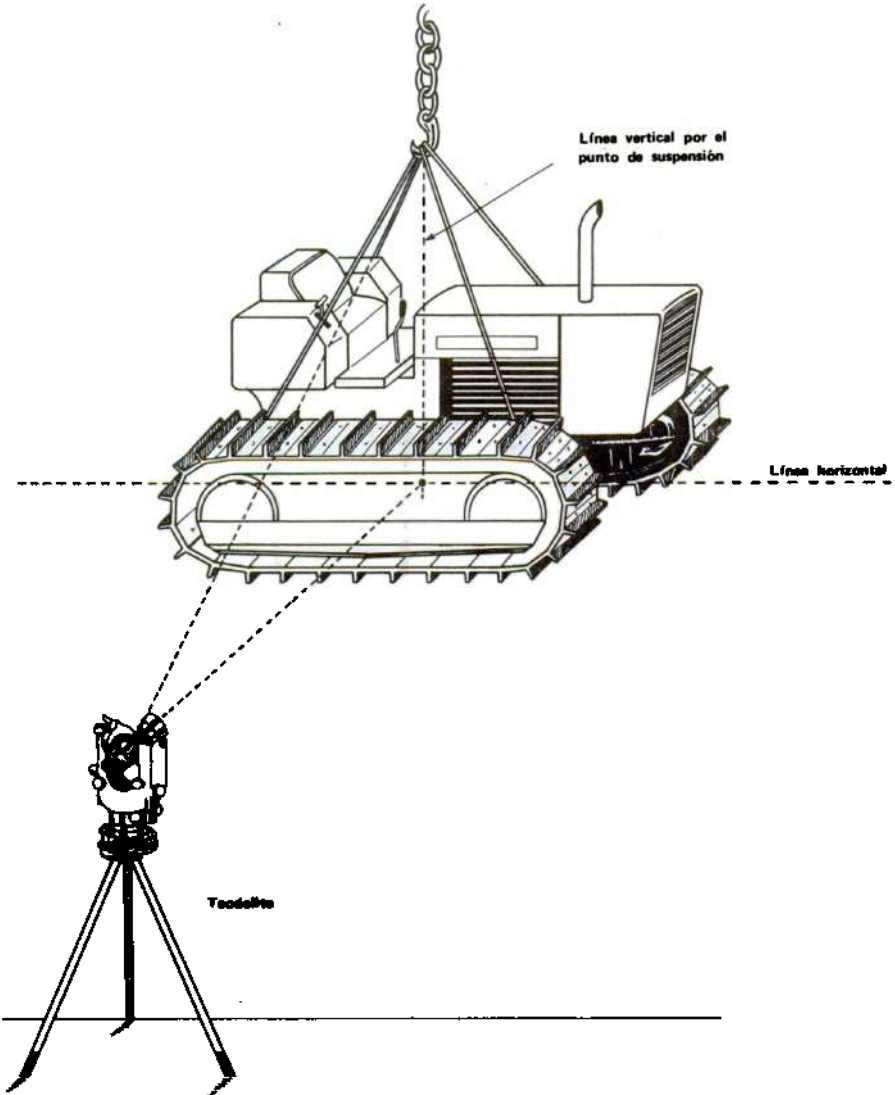


Fig. 148. Determinación del centro de gravedad por el método de suspensión. El teodolito describe el plano vertical pasando por el punto de suspensión.

6.3 ANALISIS DEL TRABAJO DEL TRACTOR EN UNA PENDIENTE

6.3.1 Trabajo del tractor con una velocidad uniforme

Las reacciones de soporte del tractor cambian al trabajar en una pendiente. La Fig. 149 indica las fuerzas de equilibrio en que las fuerzas de aceleración y resistencia al rodado tienen valor cero.

Tres distintas ecuaciones resultan de la situación de equilibrio:

Las fuerzas paralelas a la pendiente dan:

$$H = F \cos \theta + G \sin \beta \quad (9)$$

Las fuerzas perpendiculares a la pendiente dan:

$$Z_r + Z_f = G \cos \beta + F \sin \theta \quad (10)$$

Los momentos con respecto al punto de contacto de las llantas traseras dan:

$$Z_f w = G x - F b \quad (11)$$

Como se indicó anteriormente, resulta más conveniente cotizar las dimensiones como fracciones de la distancia entre ejes (w) ocupando la notación λ . La Ecuación 11 se transforma como:

$$Z_f = \frac{G x}{w} - F \frac{b}{w}$$

$$Z_f = G \lambda_x - F \lambda_b \quad (12)$$

Al substituir la Ecuación 12 en la 10:

$$Z_r = G (\cos \beta - \lambda_x) + F \lambda_b + F \sin \theta \quad (13)$$

Transfe- rencia de peso	Adición de peso
-------------------------------	-----------------------

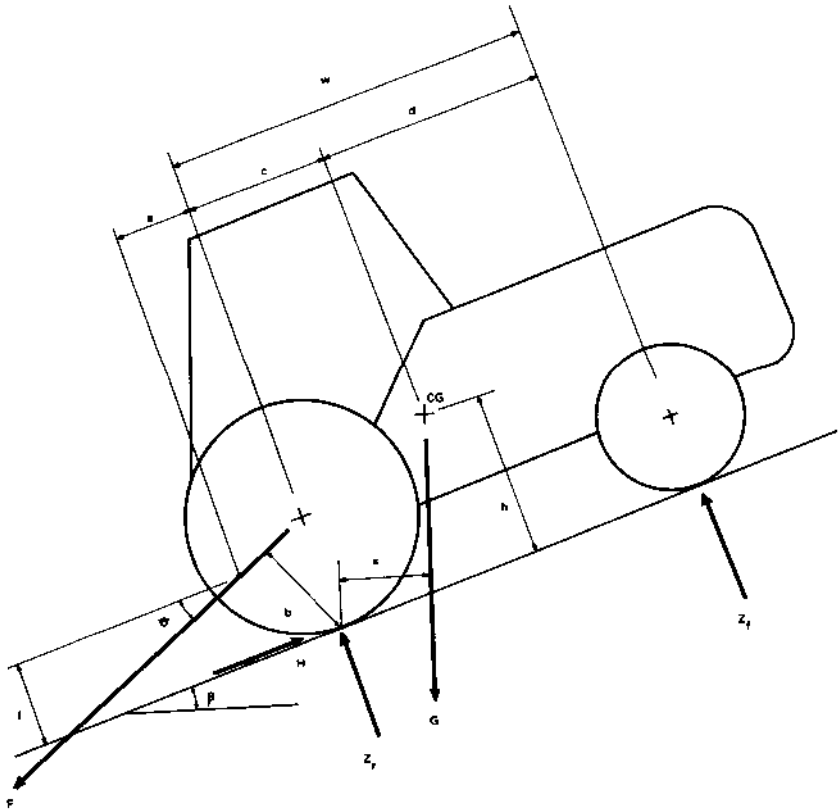


Fig. 149. El tractor trabajando en una pendiente y demostrando fuerzas y dimensiones principales.

Se nota que mientras el tractor trabaja por la pendiente, nuevamente ocurre una **transferencia de peso** de $F \lambda_b$ desde las llantas delanteras hasta las traseras, y una **adición de peso** de $F \sin \theta$ hasta las llantas traseras; esto es igual al caso del tractor que trabaja en una superficie plana.

6.3.2 Efecto de la pendiente sobre las fuerzas principales

Existen dos efectos muy importantes de considerar, el primero ocurre con respecto a la fuerza de la herramienta F , derivado en la Ecuación 9.

$$F = \frac{H - G \sin \beta}{\cos \theta}$$

En este caso se observa que la pendiente disminuye la fuerza máxima de la herramienta F , la que se puede desarrollar en condiciones iguales de tracción representadas por la fuerza H . Por el contrario, en una pendiente negativa el tractor puede halar naturalmente una fuerza mayor de la herramienta F .

El segundo efecto se refiere a la estabilidad del tractor. La Ecuación 11 da el valor de la reacción de las llantas delanteras Z_f , y la inestabilidad resulta al reducir ésta a un valor cero. El valor de la fuerza de la herramienta F que da la inestabilidad es:

$$F = \frac{G x}{b} \quad (14)$$

Una inspección de la dimensión (x) en la Fig. 149 demuestra que ésta disminuye con las pendientes mayores, lo cual significa que el tractor puede tirar menos carga antes de llegar a una condición de inestabilidad.

La Ecuación 11 también demuestra que un tractor sólo con cero carga F puede llegar inestable en una pendiente dado que el valor x es cero y la línea de acción del peso del tractor pasa directamente por el punto de contacto de las llantas traseras; esto se discute a continuación.

6.3.3 Estabilidad longitudinal de un tractor en una pendiente^{1 2, 1 5}

La inestabilidad ocurre al reducir la reacción de las llantas delanteras a un valor cero, pero además se pierde la maniobrabilidad del tractor al reducir la reacción a menos de un 20 % del peso total del tractor G , por lo que es muy importante apreciar los factores principales que influyen en la estabilidad longitudinal del tractor.

La Ecuación 14 muestra el peligro de acoplar un cable al tractor en un punto alto, por ejemplo en el tercer punto, al tratar de halar una carga pesada. Significa que la dimensión (b) es grande y que una fuerza de tiro pequeña será suficiente para hacer inevitable un volcamiento hacia atrás.

Otra causa común de accidentes sucede al tratar de prevenir el patinaje de las llantas posteriores echando piedras a la huella, o quizás amarrando una estaca a la rueda para ayudar la tracción. Esto permite aumentar la fuerza de tiro a un valor que posiblemente causaría un volcamiento. Se mejora considerablemente la situación al acoplar a un punto lo más bajo posible para éstas operaciones de alto tiraje.

En el diseño del tractor también es muy importante la disminución de estabilidad al reducir la dimensión x en la Ecuación 14 (ver Fig. 149), ya que para una mejor estabilidad se requiere un centro de gravedad bajo (h), con su posición adelante del eje trasero (c). Desafortunadamente esta condición no es compatible con una tracción óptima en un tractor convencional con mando por llantas traseras, y de allí que un arreglo con $\lambda_c = c/w \approx 1/3$ sea seleccionado normalmente.

Finalmente, se debe observar que cualquier acercamiento para mejorar la tracción por medio del uso de ruedas de acero, cadenas o semi-orugas, por razón de la fuerza aumentada de tiro F , debe transferir más peso de las llantas delanteras hacia las de atrás, lo que si bien ayuda la tracción, por una parte, por otra aumenta la posibilidad de inestabilidad (véase la Ecuación 12). Se debe buscar otro arreglo por medio del diseño del tractor (aumentar x) o realizar los trabajos de alta tracción hacia abajo de las pendientes, y no hacia arriba.

6.3.4 El efecto de la aceleración por una pendiente

La fuerza de inercia debida a la aceleración de un tractor reduce la estabilidad.

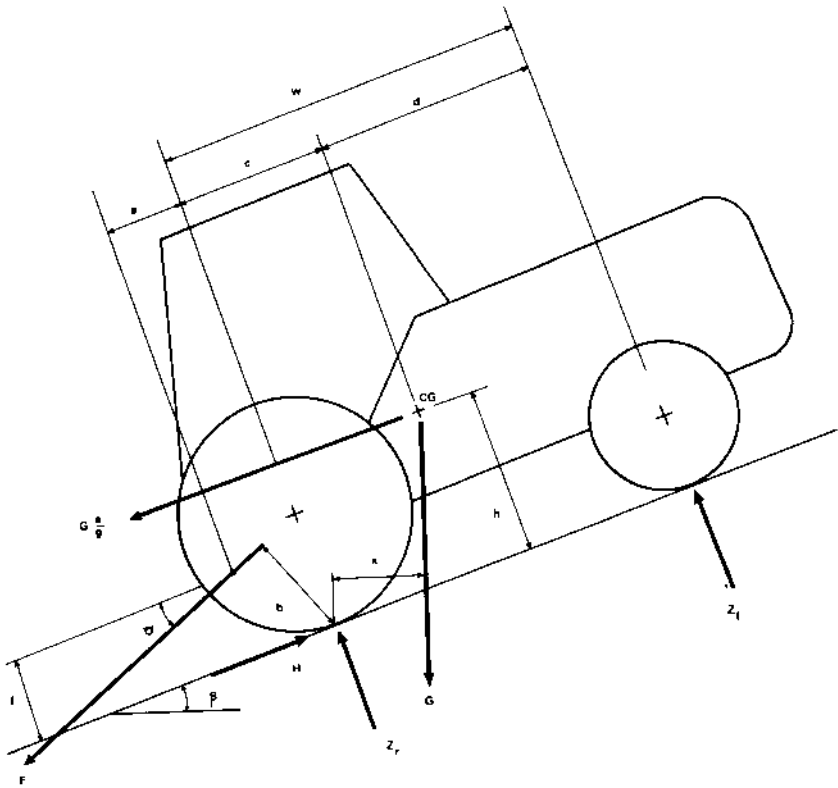


Fig. 150. El tractor en aceleración por la pendiente.

La Fig. 150 muestra las fuerzas que actúan y que originan las tres ecuaciones de equilibrio siguientes:

Las fuerzas paralelas a la pendiente dan:

$$H = F \cos \theta + G \sin \beta + G \frac{a}{g} \quad (15)$$

Las fuerzas perpendiculares a la pendiente dan:

$$Z_r + Z_f = G \cos \beta + F \sin \theta \quad (16)$$

Los momentos con respecto al punto de contacto de las llantas traseras dan:

$$Z_f w = G x - F b - G \frac{a}{g} h \quad (17)$$

La Ecuación 17 se transforma como:

$$Z_f = G \frac{x}{w} - F \frac{b}{w} - G \frac{a}{g} \frac{h}{w}$$

$$Z_f = G \lambda_x - F \lambda_b - G \frac{a}{g} \lambda_h \quad (18)$$

Se nota en la Ecuación 18 que el valor de Z_f está reducido por $G \frac{a}{g} \lambda_h$, comparada con la Ecuación 12. A continuación se calcula algunos valores típicos:

Ejemplo: en una situación normal el tractor acelera de 0 a 10 km/h dentro de 5 segundos.

$$\begin{aligned} \text{Aceleración}^* &= a = 10 \frac{\text{km}}{\text{hora}} \cdot \frac{1}{5 \text{ s}} \cdot \frac{1\,000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3\,600 \text{ s}} \\ &= 0.55 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

(*) Véase en Anexo 6 este sistema de conversión de unidades.

Un valor típico de λ_h es 0.37 en el diseño de un tractor moderno convencional²: esta aceleración entonces reduce la reacción de las llantas delanteras por un valor

$$G \frac{a}{g} \lambda_h = G \cdot \frac{0.55}{9.81} \cdot 0.37 = 0.021 G$$

porque la aceleración de gravedad $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. Esta reducción significa un 2 % del peso total G del tractor.

Si se considera una operación anormal del tractor, en el que se acelera 2 km/h en 0.1 s, quizás debido a un enganche muy rápido del embrague:

$$\begin{aligned} \text{Aceleración} = a &= 2 \frac{\text{km}}{\text{hora}} \cdot \frac{1}{0.1 \text{ s}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} \\ &= 5.5 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

Entonces, para un valor de $\lambda_h = 0.37$, la reacción de las llantas delanteras es reducida en:

$$G \frac{a}{g} \lambda_h = G \cdot \frac{5.5}{9.81} \cdot 0.37 = 0.21 G$$

Esto representa aproximadamente el 20 % del peso G del tractor y seguramente afectará la maniobrabilidad y podrá causar el volcamiento hacia atrás o el patinaje hacia un lado, resultando finalmente en un volcamiento lateral.

6.3.5 Estabilidad lateral en una pendiente

En los accidentes de los tractores por motivos de volcamiento solamente un 15 % ocurre hacia atrás¹⁰. Las causas principales de los volcamientos laterales son:

- a. Al virar demasiado rápido.
- b. Al bajar una pendiente fuera de control.
- c. Al caer dentro de un desagüe o por una loma.

A continuación se presenta un análisis simple en el caso de un tractor que atraviesa una pendiente. Primero se debe considerar la estructura del chasis de un tractor convencional: el eje anterior puede girar por un pivote B (ver Figs. 151 y 152) antes de tocar los topes, que normalmente se origina en la fundición del motor.

Esto significa que ocurren dos etapas para un volcamiento lateral: al principio el tractor gira por la línea AB (ver Figs. 151 y 152) y luego con las llantas de un solo lado por AC.

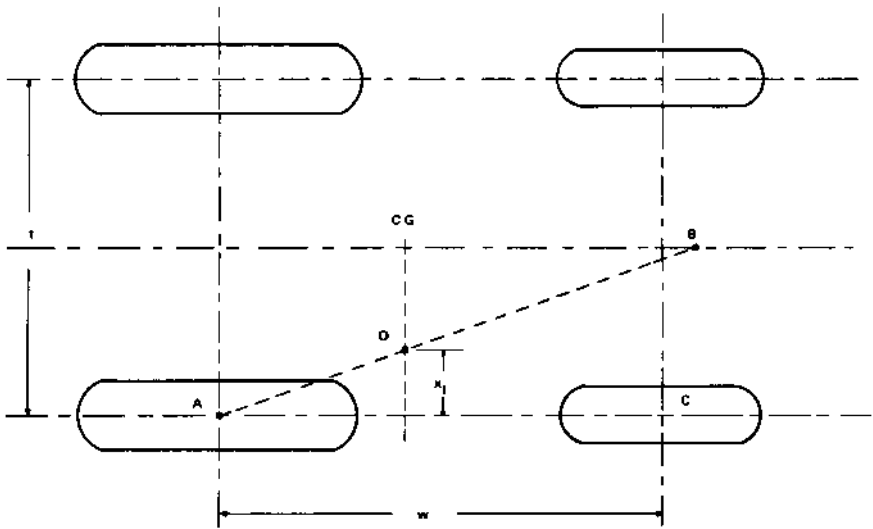


Fig. 151. Vista en planta del tractor indicando el pivote B del eje delantero.

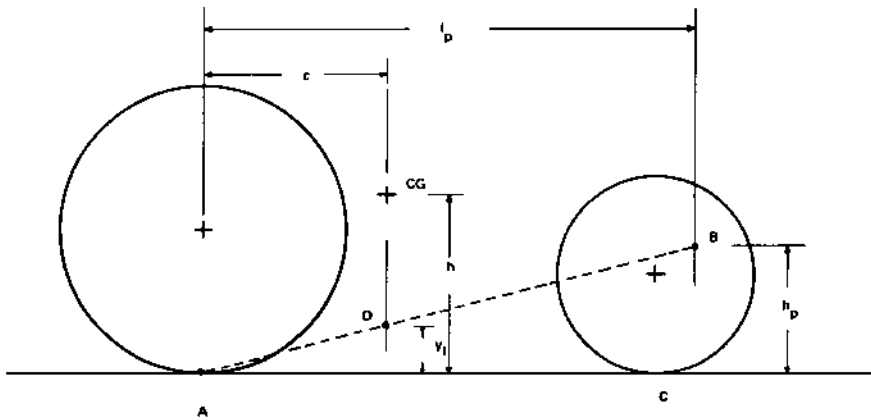


Fig. 152. Vista en elevación del mismo tractor de la Fig. 151.

El punto D queda por la línea AB en el plano lateral, pasando por el centro de gravedad CG. La Fig. 153 presenta al tractor atravesando una pendiente en que la fuerza centrífuga F_C es cero. La primera etapa de inestabilidad lateral ocurre al pasar la línea de acción del peso del tractor G por el punto D. Esta pendiente ϕ_1 (Fig. 153) es:

$$\tan \phi_1 = \frac{(t/2 - x_1)}{(h - y_1)}$$

En la Fig. 151 se observa:

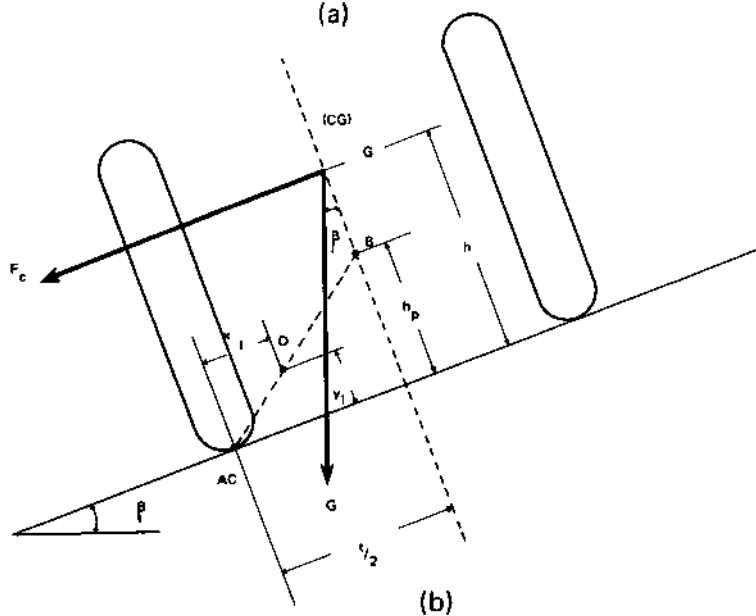
$$x_1 = \frac{t}{2} \cdot \frac{c}{l_p}$$

y en la Fig. 152:

$$y_1 = h_p \cdot \frac{c}{l_p}$$



(a)



(b)

Fig. 153. El tractor de las Figs. 151 y 152 al virar a través de la pendiente.

Entonces,

$$\tan \phi_1 = \frac{\frac{t}{2} \left(1 - \frac{c}{1_p}\right)}{h \left(1 - \frac{h_p}{h} \cdot \frac{c}{1_p}\right)} \quad (19)$$

La segunda etapa de inestabilidad lateral ocurre al pasar el peso del tractor por la línea AC (Fig. 153); con pendientes más inclinadas resultaría un volcamiento lateral completo. Esta pendiente ϕ_2 es:

$$\tan \phi_2 = \frac{t/2}{h} = \frac{t}{2h} \quad (20)$$

Si el tractor vira en esta pendiente actúa una fuerza centrífuga adicional F_c , por lo cual se debe calcular la resultante de ésta y del peso del tractor. La inestabilidad inicial ocurre al pasar la resultante por la línea AC.

Ejemplo: un tractor que trabaja en una pendiente de 15° hace un viraje con un radio de 10 metros; ¿qué velocidad causaría su inestabilidad inicial?

Dimensiones del tractor:

$$\begin{aligned} t &= 1\,420 \text{ mm} \\ c &= 790 \text{ mm} \\ 1_p &= 2\,230 \text{ mm} \\ h_p &= 620 \text{ mm} \\ h &= 880 \text{ mm} \end{aligned}$$

Solución: la resultante de F_c y G debe pasar por el punto D; la Ecuación 19 da entonces el ángulo DGB.

$$\tan \angle DGB = 0.695$$

$$\text{ángulo DGB} = 35^\circ$$

Se puede calcular el valor de la fuerza centrífuga por medio del gráfico de la Fig. 154.

$$F_c = G \frac{\text{sen } 20^\circ}{\text{sen } 55^\circ} = 0.417 G \quad (21)$$

Pero la fuerza centrífuga es:

$$F_c = \frac{G v^2}{g r} \quad (22)$$

en la cual la velocidad es v y el radio de viraje es r .

De las Ecuaciones 21 y 22:

$$v^2 = 0.417 \cdot g \cdot r$$

Entonces $v = 6.4$ metros/segundo

$$= 23 \text{ km/h}$$

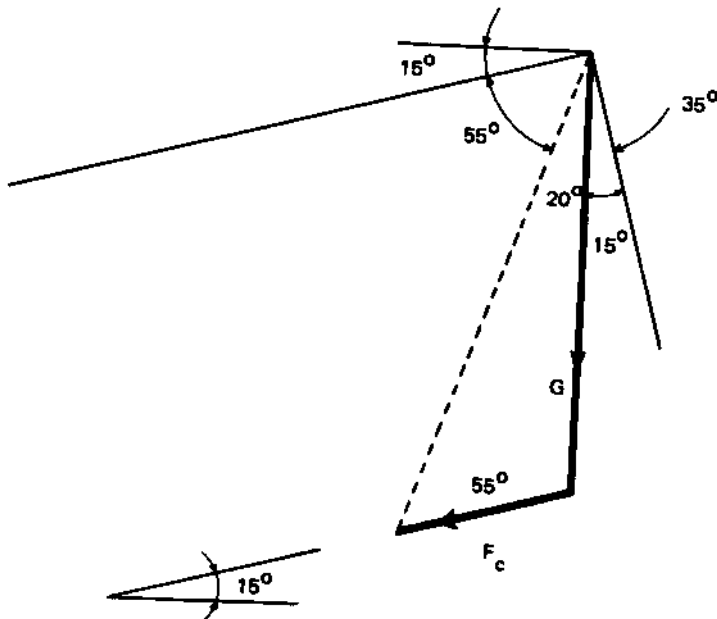


Fig. 154. Gráfico que determina la fuerza centrífuga causa de la inestabilidad inicial del tractor ilustrado en la Fig. 153.

6.4 ESTRUCTURAS DE PROTECCION CONTRA LOS VOLCAMIENTOS

En los países europeos ocurría anteriormente un accidente fatal por volcamiento de tractor, al año, entre cada 4 a 10 000 tractoristas, durante su trabajo. En 1959 Suecia fue el primer país en introducir leyes que exigían la provisión de una estructura en el tractor para dar protección en el caso de volcamiento; desde esa fecha muchos países exigen también aditamentos similares y de allí que las fatalidades hayan disminuido considerablemente y que casi ninguna haya ocurrido en los casos de tractores equipados con tales estructuras (Fig. 155).

Dentro del rango de diseños que existe en el mercado de hoy el más simple involucra dos postes verticales fuertemente fijados al eje posterior. Otros diseños incorporan fijaciones adicionales por debajo de la fundición del motor para conformar la cabina, las que pueden ser amortiguadas para mejorar la comodidad y reducir el nivel de ruido^{1,1}.

Dos tipos principales de prueba han sido desarrollados para la aprobación de los diseños^{1,5,7}. Lo más común es una prueba de impacto, en que se amarra el tractor al piso para luego golpearlo con un péndulo de 2 000 kg, con un nivel de energía que depende del peso del tractor; se aplica impactos adelante, atrás (Fig. 156) y a un lado en combinación con pruebas de compresión estática al techo de la cabina. La aprobación se otorga si hay ausencia de fallas en la estructura y ciertos límites a la deformación.

En el segundo tipo de prueba las cargas se aplican estáticamente hasta que la estructura absorba una cierta cantidad de energía, dependiendo del peso del tractor¹. Estos niveles son por lo menos los mismos que los de la prueba por impacto.

Algunas veces se aplica un tercer tipo de prueba que consiste en un volcamiento en el campo sobre una rampa inclinada, especialmente en los casos en que las estructuras están diseñadas para la protección de volcamientos múltiples^{1,5}. El ASAE requiere esta comprobación cuando la energía aplicada en la prueba estática no alcanza más que 115 % de la energía especificada por la prueba de impacto. La razón es que bajo condiciones dinámicas el acero dulce de la cabina muestra un aumento en su resistencia³.



(b)

(a)



Fig. 155. Demostración espectacular de un tractorista valiente con protección contra volcamientos por una estructura de seguridad.

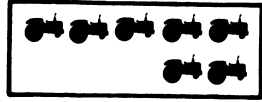


Fig. 156. Sistema de prueba de las estructuras de seguridad por impacto con un péndulo de 2 000 kg (NIAE, Silsoe, Bedford, RU).

BIBLIOGRAFIA

1. ASAE. Safety frames test procedures. Standards Nos. 310.2 and 383. ASAE Yearbook. St Joseph, Michigan, USA, 1980. pp. 185-190.
2. ASHBURNER, J.E. An investigation into aspects of the design and testing of tractor safety frames and cabs. (Unpublished Ph.D Thesis). Silsoe, Bedford, UK, NCAE, 1972. 340 p.
3. ————. Aspects of the design and testing of tractor safety frames. Paper No. 202/75, Proceedings of Conference of Off-highway vehicles, tractors and equipment. London, I.Mech.E., 1975. pp. 59-66.
4. BRITISH STANDARD. Locating the centre of gravity of heavy object. BS 3318. London, British Standards Inst., 1961. 20 p.
5. ————. Requirements and testing of protective cabs and frames for agricultural wheeled tractor. BS 4063. London, British Standards Inst., 1973. 23 p.
6. COMBES, G.B. Slope stability of tractors. London, Farm Machine Design Engg. 2:18-33. 1968.
7. ————. Safety frames for tractors. London, Farm Machine Design Engg. 5:59-61. 1971; 6:64-65. 1972.
8. DAVIS, D.C., REHKUGLER, G. Agricultural wheel tractor overturns. Part 1, Mathematical model; Part 2, Verification. Trans. ASAE 17(3):477-483. 1974; 17(3):484-488, 492. 1974.
9. GILFILLAN, G. Tractor behaviour during motion uphill. J. Ag. Engg. Res. 15(3):221-243. 1970.

10. MANBY, T.C.D. Safety aspects of cabs and their testing. *J. and Proc. I. Ag. Engrs.* 20(1):53-62. 1964.
11. MATHEWS, J. TALAMO, J.D.C.T. A study of tractor noise control. *J. and Proc. I. Ag. Engrs.* 26(1):25-42. 1971.
12. SACK, H.W. Longitudinal stabilities of tractors. *Agric. Engg.* 37(5):328-333. 1956.
13. SAE. Test code J — Centre of gravity. Washington, USA, Society of Automotive Engrs.
14. STEINBRUEGGE, G.W. Improved methods of locating centres of gravity. *Trans. ASAE* 12(5):681-684, 689. 1969.
15. WORTHINGTON, W.H. Evaluation of factors affecting the operational stability of wheeled tractors. *Agric. Engg.* 30(3):119-123. 1949; 30(4):179-183. 1949.



COMPORTAMIENTO DEL TRACTOR CON LAS HERRAMIENTAS DE LABRANZA

7.1 SISTEMAS DE ACOPLER

7.1.1 Una clasificación de los sistemas de acople

Es conveniente clasificar el tipo de acople para las herramientas de acople posterior, para luego analizar su efecto en el comportamiento del tractor. Tres métodos principales están en uso para el tractor moderno:

- a. Herramienta de tiro (Fig. 157). La herramienta marcha tirada desde un solo punto, y si bien una parte de su peso puede ser soportado nunca puede ser transportada completamente en el aire.
- b. Herramienta semi-integral (Fig. 158). La herramienta va acoplada al tractor por dos o más puntos, pero su peso sólo es soportado parcialmente durante el transporte; la herramienta se ve afectada directamente por los cambios de la dirección del tractor.

- c. Herramienta integral (Fig. 159). Uno, dos o normalmente tres puntos acoplan el tractor y las herramientas, las que pueden ser transportadas completamente en el aire.

7.1.2 Barra de tiro

La barra de tiro ofrece un sólo punto para halar las herramientas, por lo que la fuerza resultante debe pasar por éste. El análisis presentado en el numeral 6.3.1 ya demostró que en la situación típica de la Fig. 157 existe una transferencia de peso de $F \lambda_b$, de las llantas delanteras hacia las traseras, y un aumento de peso de $F \sin \theta$. Con el objetivo de que el diseño de las herramientas aproveche esta situación se ha desarrollado tres tipos de barra de tiro para el tractor.

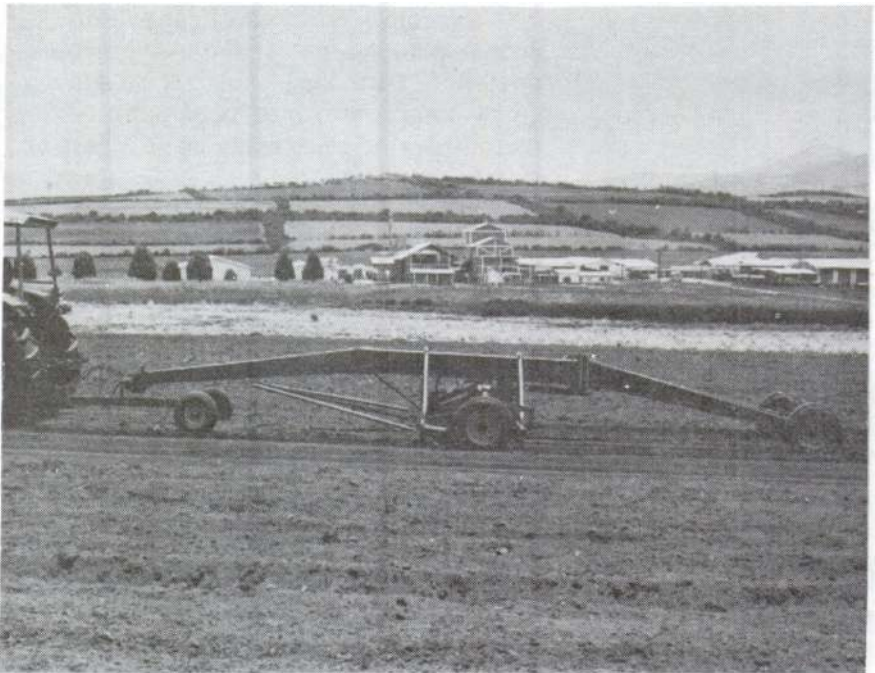


Fig. 157. Acople de tiro de un nivelador.



Fig. 158. Acople semintegral de un arado de vertedera (*John Deere* – Ponce Yepes, Quito).



Fig. 159. Acople integral de un distribuidor de fertilizantes.

7.1.2.1 Acople de gancho (Fig. 160a)

En el acople de herramientas de tiro pesado, tales como remolques grandes de dos llantas, esparciadores de estiércol y distribuidores de abono, es necesario reducir a un mínimo la transferencia de peso para mantener la maniobrabilidad durante el trabajo con una fuerza grande de la herramienta F . Con tal propósito se disminuye la dimensión λ_b , diseñando un gancho cerca del eje posterior y lo más bajo posible^{4,5,25}. Las herramientas llevan un anillo de acople al gancho, especialmente diseñado para evitar su enganche por equivocación a las barras de tiro descritas a continuación.



(a) Acople de gancho

7.1.2.2 Barra de tiro oscilante (Fig. 160b)

El nombre de esta barra de tiro indica que su posición puede ser excéntrica a la línea central del tractor para facilitar el alineamiento de herramientas que trabajan en hileras, tales como cosechadores de forraje, empaquetadoras, elevadores y otras.

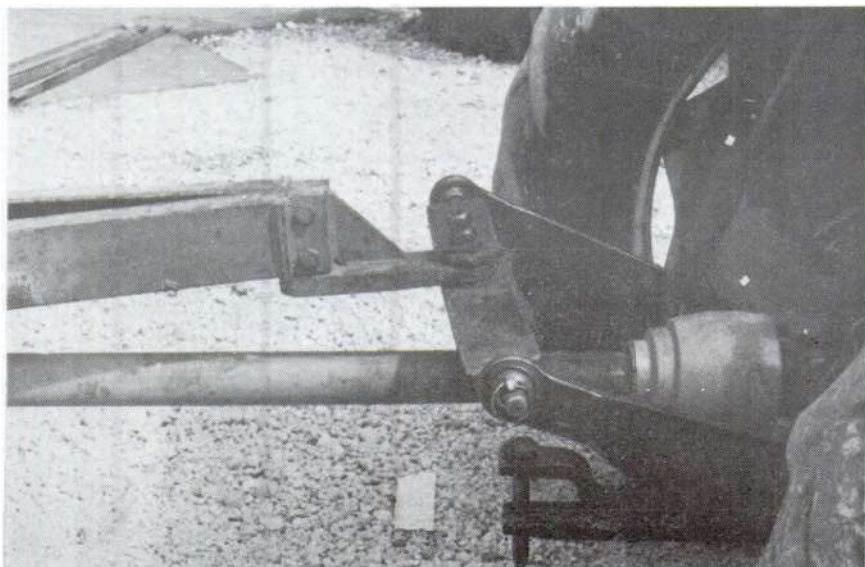
Adicionalmente es normal que la barra tenga dos o más posiciones opcionales longitudinales; la posición delantera se utiliza para remolques livianos, y tiene la dimensión λ_e típicamente igual a 0.3 (Figs. 142 y 149). La posición trasera, 350 mm o 400 mm atrás de la toma de fuerza (TDF) para herramientas de categoría 1 ó 2, es apropiada para herramientas con mando por la TDF que permita un movimiento en telescopio mínimo del eje al virar; además mejora la línea que sigue la herramienta atrás del tractor^{5,6,11}. Debe advertirse que es muy peligroso acoplar los remolques pesados, de un solo eje, a la barra de tiro en esta posición extendida, por la pérdida de estabilidad resultante.



(t) Acople por barra de tiro oscilante.

7.1.2.3 Barra de tiro sobre los brazos inferiores (Fig. 160c)

Esta barra va montada sobre los brazos inferiores, que regularmente tienen estabilizadores; posee la ventaja de poderla subir o bajar con el sistema hidráulico del tractor. Algunos tractores tienen también un soporte vertical para remover la carga del sistema hidráulico, si bien nunca debe utilizarse este tipo de barra de tiro en las situaciones de carga excesiva, pues puede causar inestabilidad; tampoco se utiliza normalmente con la TDF por peligro de interferencia.



- (c) Acople por barra de tiro en los brazos inferiores. Normalmente se coloca soportes a los brazos para prevenir interferencia con el eje de toma de fuerza.

Fig. 160. Sistemas de acople para las herramientas de tiro.

7.1.3 Acople de tres puntos

Este acople es el más común de los sistemas y provee tres brazos que convergen hacia el tractor (Fig. 161). Los brazos inferiores llevan cadenas para restringir el movimiento lateral y también se puede acoplar cadenas o bloques de estabilización para dar mayor restricción a este movimiento. Los brazos de levante están acoplados al sistema hidráulico para permitir subir o bajar la herramienta.

Se debe acomodar la fuerza resultante de la herramienta F por medio de las fuerzas que actúan por las bolillas de los brazos. El brazo superior no tiene restricción, por lo que las fuerzas solamente pueden actuar a lo largo de él (Fig. 161); los inferiores, en cambio, normalmente tienen restricción por el mecanismo de levante, con lo que las fuerzas en tensión o compresión pueden ser inclinadas a los brazos (Fig. 161). Una situación típica se observa en la Fig. 162, en que las fuerzas se unen en el punto V , denominado punto de acople virtual; la fuerza resultante de la herramienta F debe pasar por V para una situación de equilibrio.

7.1.4 Acople automático o rápido

Se ha desarrollado varios sistemas para facilitar el acople²⁷, el más simple de los cuales es una modificación al brazo inferior. Se debe primero acercar el tractor a la herramienta y luego desconectar el pasador de las extensiones en los brazos inferiores para acoplar fácilmente la herramienta; al retroceder el tractor o al levantar la herramienta, en el caso de que esté conectado el brazo superior, los brazos inferiores se contraen y cierran en posición de trabajo. Otros sistemas simples tienen copas o ganchos en los brazos inferiores, que se mantienen aparte por medio de un brazo ajustable¹⁰.

Existen acoples automáticos para que el tractorista no tenga que levantarse de su asiento. En Estados Unidos hay una norma para un acople de gancho¹, consistente en una estructura de 'U' invertida con ganchos para acoplar a los pasadores de la herramienta (Fig. 163). Una estructura 'A', popular en Europa, ya ha sido adoptada como norma en Gran Bretaña y permite acoplar un rango amplio de herramientas con ensamble convencional o automático.

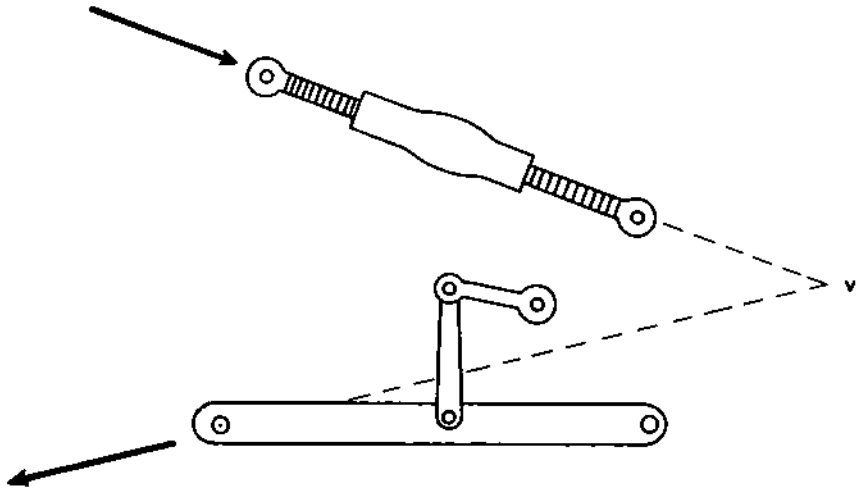


Fig. 161. El punto de acople virtual V en la intersección de fuerzas de los brazos superiores e inferiores.

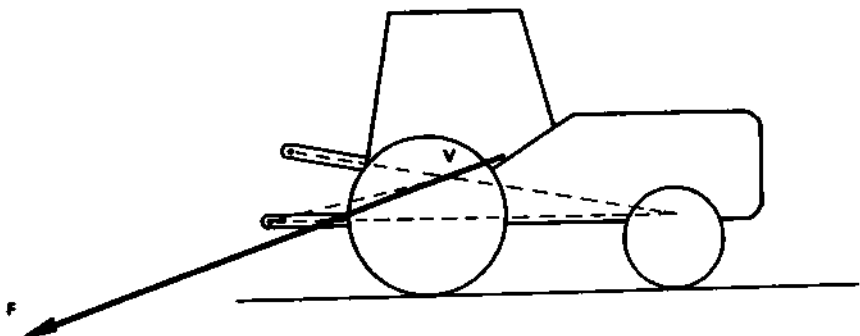


Fig. 162. Situación de equilibrio donde la fuerza resultante de la herramienta F, pasa por el punto de acople virtual V.

Estos sistemas de acople no cambian la situación de las fuerzas pero la herramienta normalmente queda desplazada entre 100 y 220 mm hacia atrás, lo que provoca efectos desventajosos de estabilidad y maniobrabilidad.

7.1.5 Acoples especiales para tractores pequeños

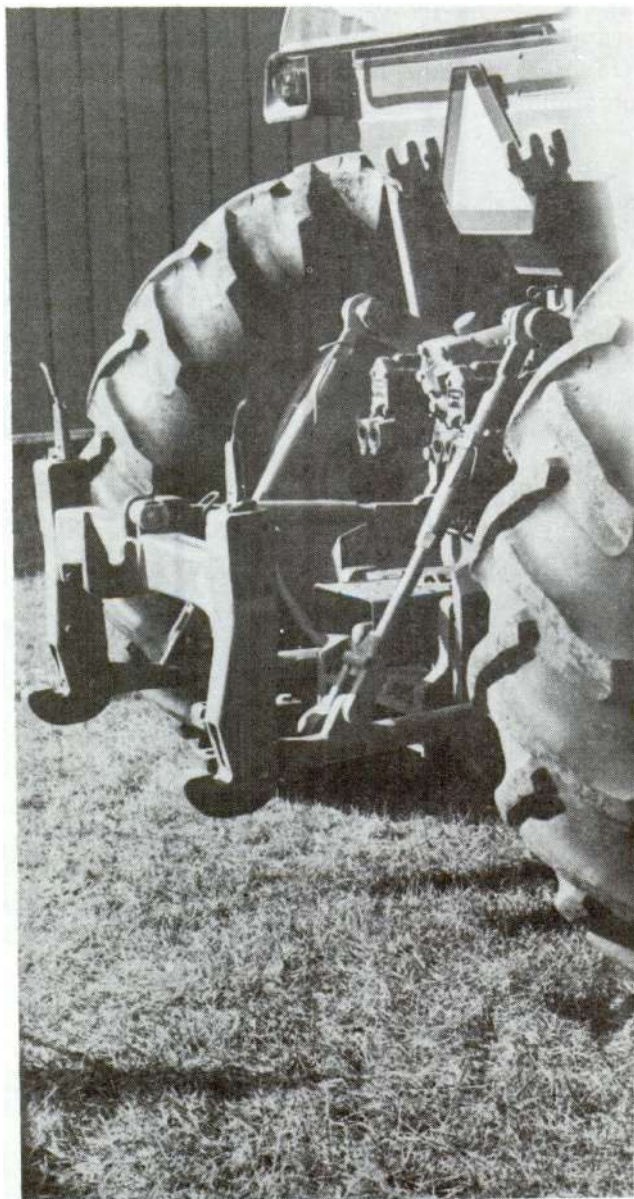
Existe un rango de sistemas de acople para tractores pequeños, los que se pueden generalizar con una potencia de menos de 15 kW (20 hp). Además de un pequeño acople convencional de tres puntos hay acoples de dos o de un punto que también permiten un buen grado de apoyo a la tracción por medio de transferencia de peso (Fig. 164).

7.2 LAS FUERZAS EN LAS HERRAMIENTAS DE LABRANZA DEL SUELO

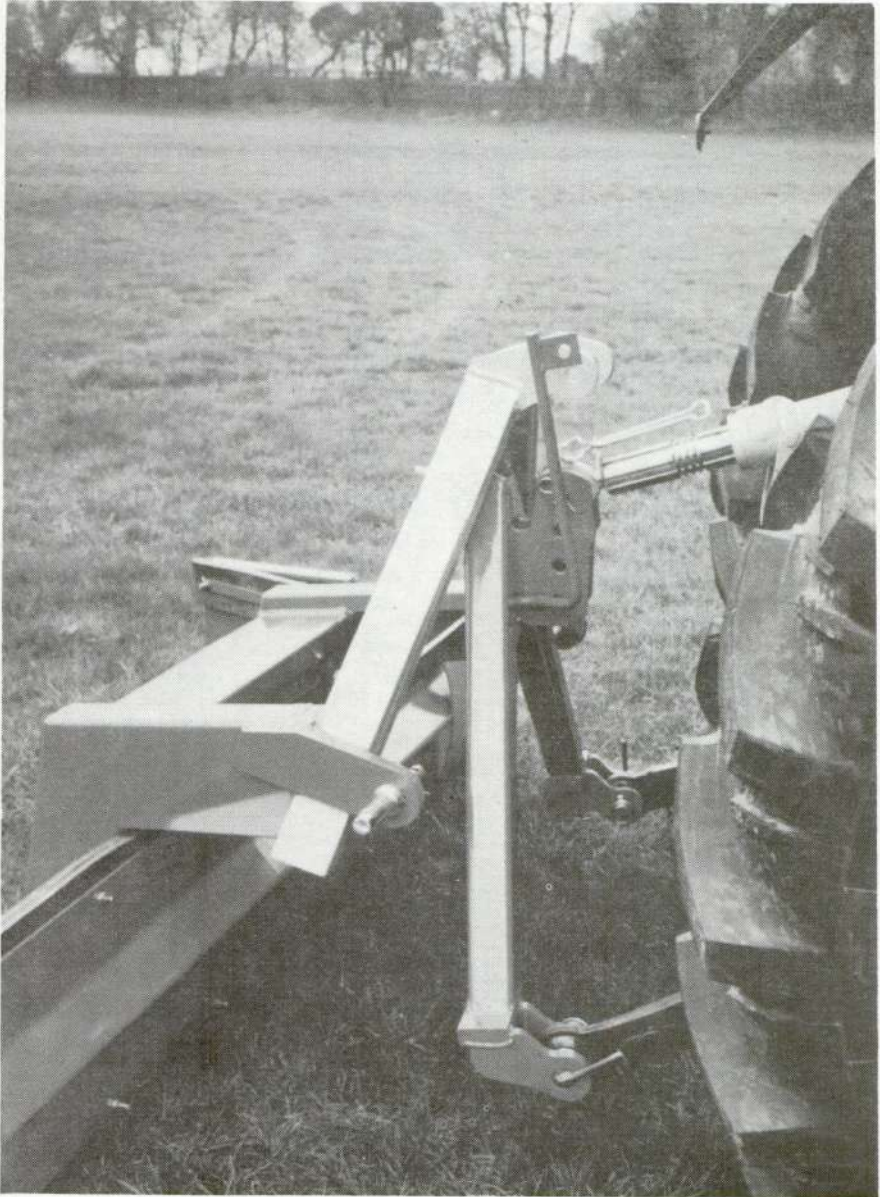
En el Capítulo 4 se explicó cómo el suelo es removido por las distintas formas de los dientes de las herramientas de labranza. Si bien es posible realizar un análisis teórico para casos muy complejos, el comportamiento del tractor con sus herramientas se entiende mejor por medio de los resultados de las pruebas de campo que miden las características de las fuerzas. Se ha realizado pruebas para diversas herramientas pero en este Capítulo es suficiente anotar los resultados obtenidos con el arado de vertedera y de disco. El Anexo 2 presenta los valores típicos para otras herramientas.

7.2.1 Las fuerzas sobre el arado de vertedera

Es conveniente considerar las fuerzas que actúan en las direcciones perpendiculares x , y y z (Fig. 165). Se ha hecho varios ensayos para estudiar estas fuerzas^{14-16,26,28-31}, en distintas condiciones y se da un resumen a continuación; en el numeral 4.9 se ofrece una discusión de la calidad de labranza del arado de vertedera.



(a) Sistema de acople utilizado en los Estados Unidos (*John Deere, Moline, EEUU*).

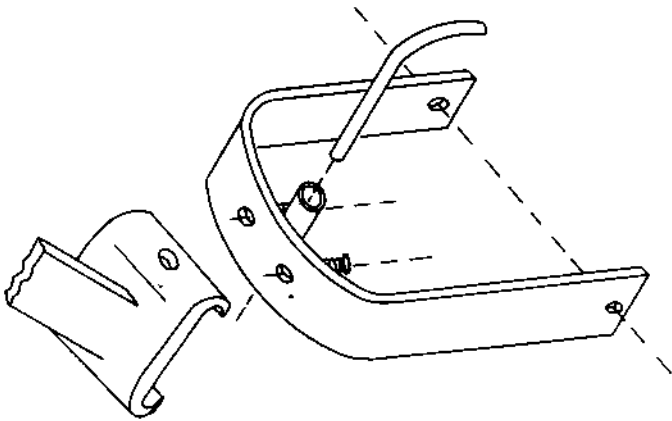


(b) Sistema de acople rápido utilizado en Europa, con estructura en forma de 'A' (*Ferranti Engineering Ltd*).

Fig. 163. Dos distintos sistemas de acople rápido y automático, para las herramientas del tractor.



(a)



(b)



(c) Acople por un solo punto en un tractor jardinero (*John Deere, Moline*).

Fig. 164. Sistemas de acople para tractores pequeños. (a) Acople por tres puntos para un tractor pequeño. (b) Acople de un punto para tractores pequeños, adoptado como estándar en los Estados Unidos.

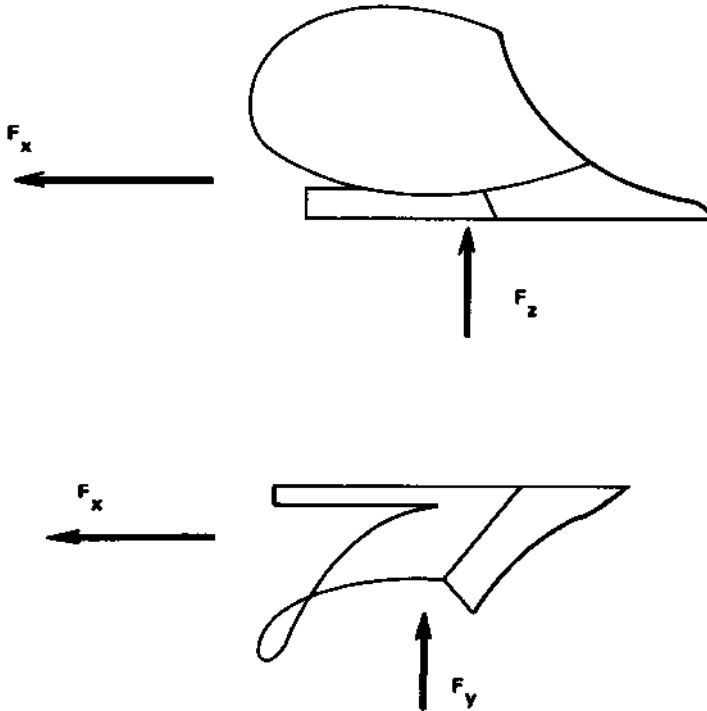


Fig. 165. Componentes de la fuerza del suelo que actúan sobre la vertedera del arado.

7.2.1.1 La fuerza de arrastre F_x

La fuerza de arrastre es la fuerza principal que actúa sobre el cuerpo y depende de la forma del arado, la velocidad y profundidad de trabajo y la condición del suelo. Generalmente las tres últimas varían durante la labor en el campo, con los consiguientes efectos sobre el sistema de control de la herramienta en el tractor. La Fig. 166 muestra cómo la fuerza de arrastre en tres condiciones de suelo depende de la profundidad de trabajo; aunque la relación no es lineal, se nota que al aumentar la profundidad también se incrementa la fuerza de arrastre.

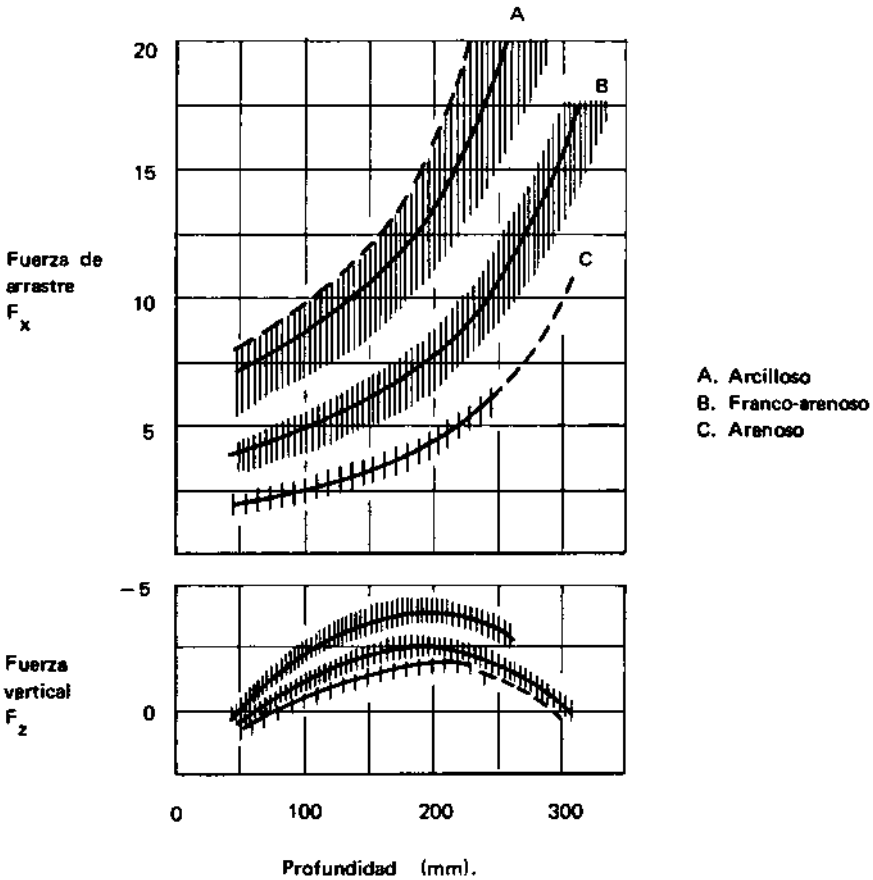


Fig. 166. Fuerzas de arrastre y verticales que actúan sobre un arado de vertedera de tres cuerpos, al trabajar en diferentes profundidades y en tres distintos suelos¹¹.

7.2.1.2 La fuerza vertical F_z

En las Figs. 166 y 167 se muestra el efecto de la profundidad y la velocidad en la fuerza vertical, y donde se nota normalmente que trata de levantar el cuerpo fuera de la tierra. Tanner y Dean³¹ explican este efecto indicando que a una profundidad de trabajo de 150 mm la fuerza vertical hacia arriba sobre el disco es más o menos doble que la fuerza hacia abajo sobre el cuerpo de la vertedera.

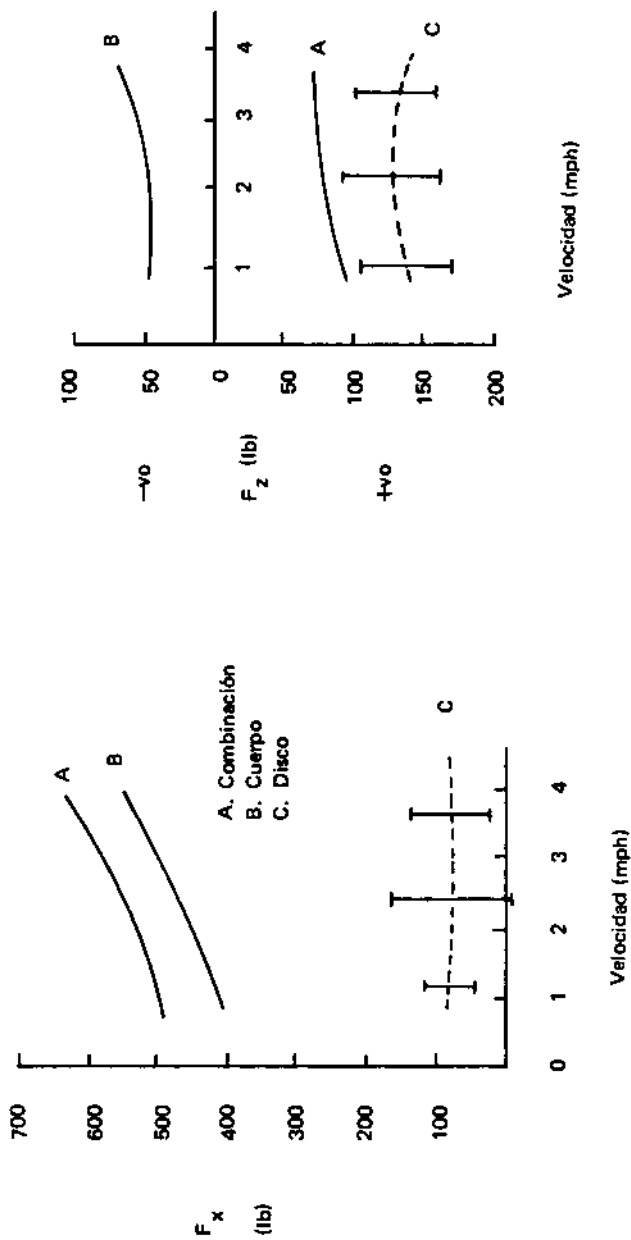


Fig. 167. Fuerzas de arrastre y verticales que actúan en el cuerpo, el disco y la combinación de un arado de vertedera como función de velocidad. Se incluye los niveles del 95 % de confianza para las fuerzas en los discos^{1,2}.

plano horizontal tiene un ángulo α que por lo general está entre 40° y 50° con respecto a la dirección de avance. En el numeral 4.10 se discutió el efecto de éstos ángulos en la calidad de trabajo.

La Fig. 169 presenta la variación en los componentes de fuerza F_x , F_y y F_z de acuerdo con la profundidad de trabajo². Se nota que la fuerza de arrastre F_x aumenta rápidamente con la profundidad, mientras que la fuerza vertical F_z es pequeña y se aproxima a cero.

Aunque la fuerza vertical es mucho menor que la de arrastre, muestra las mismas características de profundidad y velocidad y tiene una importancia especial para el diseño de algunos de los sistemas de control de las herramientas en el tractor.

7.2.1.3 La fuerza lateral F_y

La fuerza lateral empuja los cuerpos del arado hacia el surco y debe ser resistida por un talón o rueda de apoyo montado sobre el último cuerpo, trabajando al fondo del surco. El talón entonces sufre una resistencia friccional proporcional a la fuerza lateral y que contribuye a la fuerza de arrastre F_x . La investigación ha mostrado que esta interacción de las fuerzas laterales y de arrastre no tiene mayor importancia en el comportamiento de los sistemas de control hidráulico descrito en el numeral 7.4.

7.2.1.4 La fuerza resultante sobre el arado de vertedera

La fuerza resultante de las fuerzas verticales y horizontales en el arado de vertedera se ilustra en la Fig. 168. En ella se nota que el efecto de la rueda de profundidad (si la tiene) sirve para reducir la inclinación θ de la resultante, que a su vez disminuye la adición del peso (ver numeral 6.3.1); se puede observar, además, que al aumentar la profundidad de trabajo se incrementa el valor de la resultante F y disminuye su inclinación θ .

7.2.2 Las fuerzas sobre el arado de discos

A continuación se ofrece un resumen sobre los diversos factores que afectan las variaciones de las fuerzas en el arado de discos^{2,17,23,24,32}. La inclinación vertical del cuerpo del disco tiene un ángulo β normal entre 15° y 25° . El diámetro del disco en el

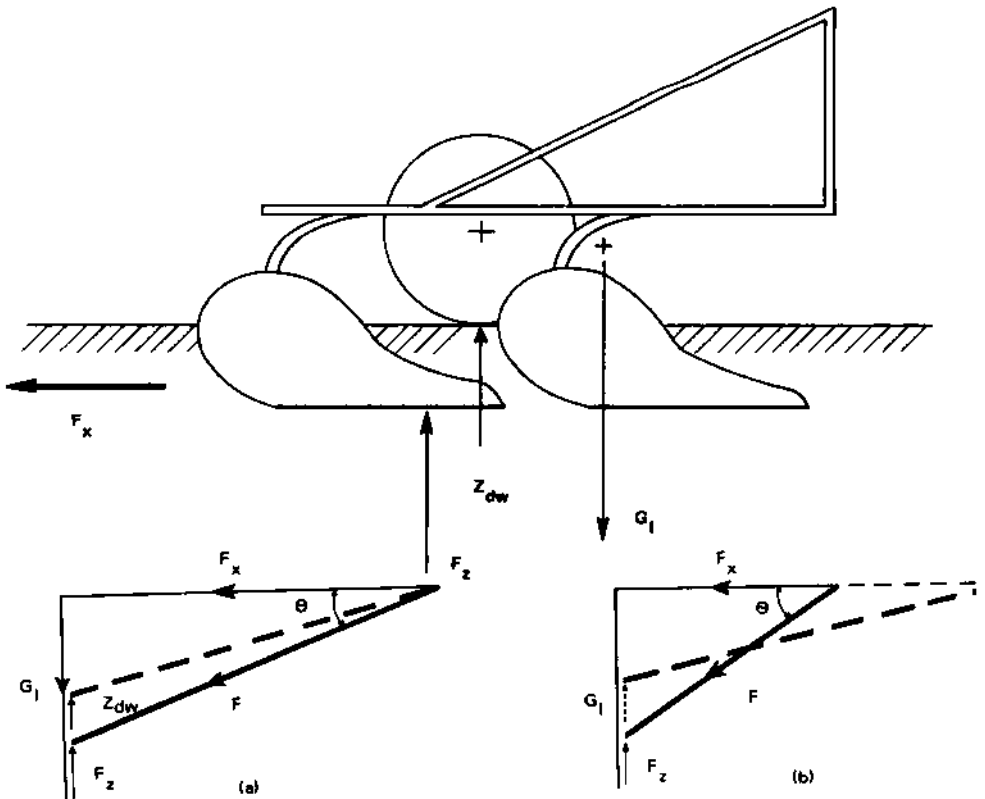
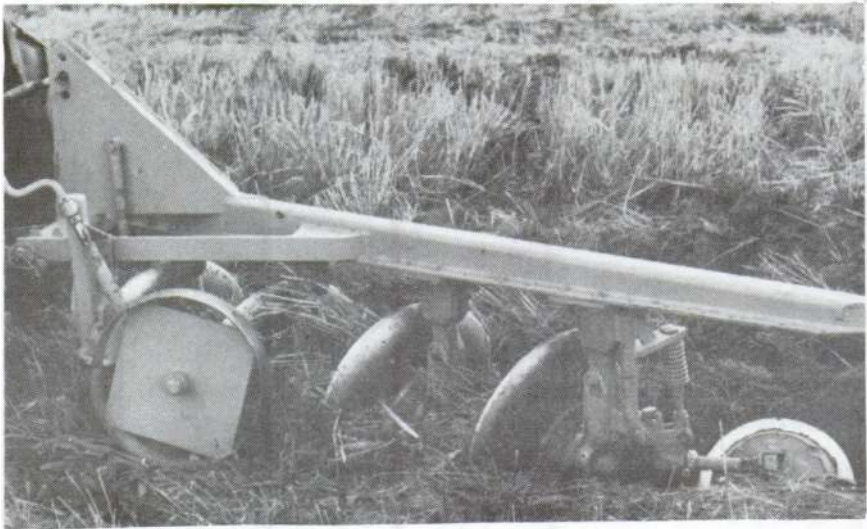


Fig. 168. Efecto sobre la fuerza resultante de la herramienta F , (a) con la introducción de una rueda de profundidad y (b) con un aumento en la profundidad de trabajo pero sin una rueda de profundidad.

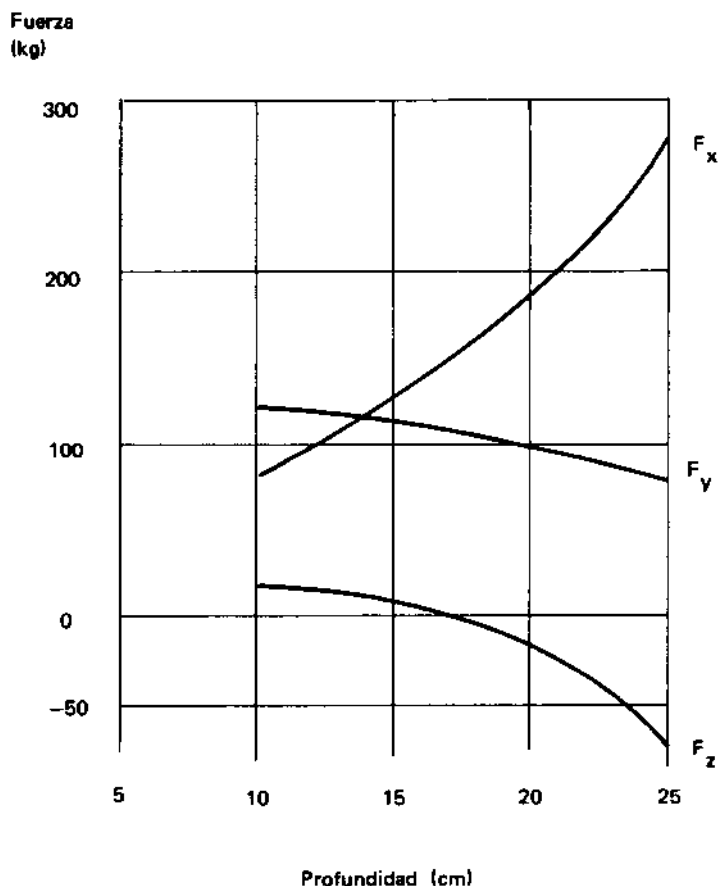


Fig. 169. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo del arado de discos, a diferentes profundidades de trabajo para un surco de 28 cm de ancho^{1 8}.

La fuerza de arrastre aumenta casi en forma lineal con la velocidad^{2 3} (Fig. 170). Aunque anteriormente se consideraba que la fuerza de arrastre mostraba un valor mínimo para un ángulo de unos 45° del disco α , los ensayos realizados recientemente^{2 3} indican que existe un amplio rango del ángulo dependiente del ancho y profundidad del surco, la condición del suelo y el diseño del filo del disco. Básicamente, una reducción en el ángulo del disco α disminuye la fuerza de

arrastre pero presenta problemas de penetración dado que aumenta la fuerza vertical de soporte³², como se ilustra en la Fig. 171. Reducir el ángulo del disco a menos de 45° , y aumentar el ancho de corte del surco tanto como sea posible, parece ser la solución óptima.

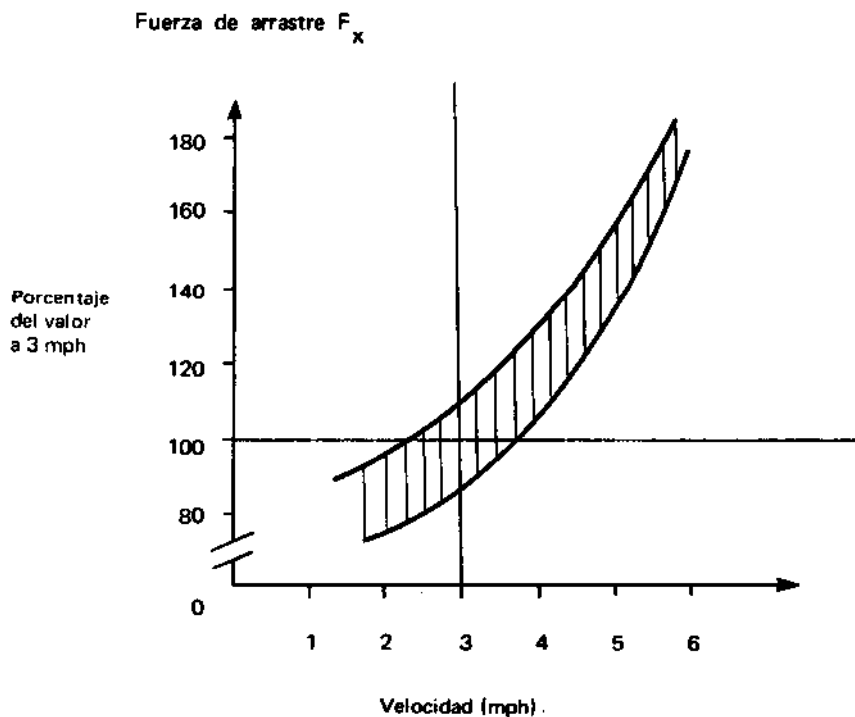


Fig. 170. Efecto de la velocidad en la fuerza de arrastre para un arado de disco con el cuerpo vertical (tipo *Wheatland Disc Plough*²³).

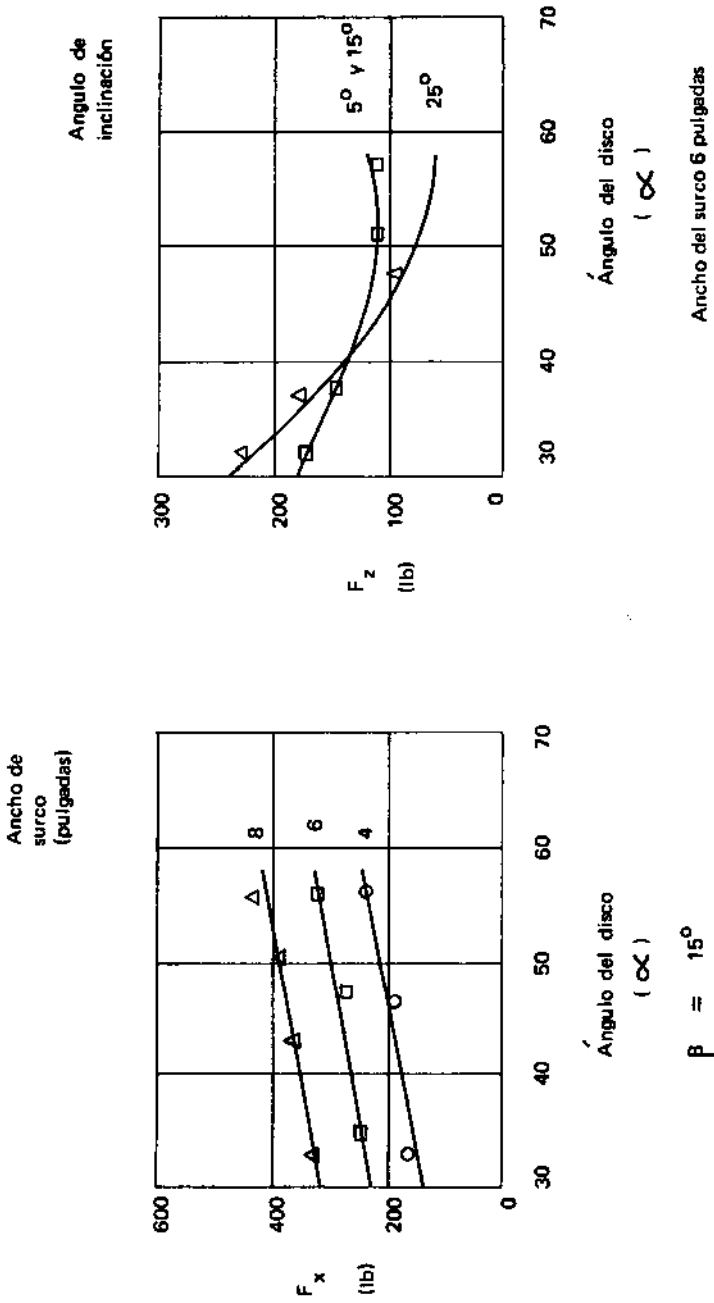


Fig. 171. Efecto del ángulo de disco (α), ancho de surco y ángulo de inclinación (β) en las fuerzas de arrastre F_x y vertical F_z , para un cuerpo del arado de discos trabajando a 4 mph a una profundidad de 3 1/2 pulgadas³².

El efecto combinado de estas relaciones se presenta en la Fig. 172, en la cual, igual que en el caso del arado de vertedera, al aumentar la profundidad de trabajo se incrementa la fuerza resultante de la herramienta F y se disminuye su inclinación θ .

7.3 AJUSTE DEL ACOPLÉ PARA LAS HERRAMIENTAS DE TIRO

7.3.1 Herramientas de tiro con ruedas de soporte delanteras y traseras

Existe tres tipos básicos de herramientas de tiro que trabajan en el suelo²⁴. El primero de ellos se presenta en la Fig. 173a, que es un arado de tiro con ruedas de soporte delanteras y traseras.

El valor de las reacciones de soporte de las ruedas delanteras y traseras depende de la condición del suelo y de la profundidad de trabajo. Se puede ajustar la distribución de estas fuerzas de soporte cambiando el punto de acople en la herramienta; se nota que un punto de acople alto da más fuerza sobre las ruedas de soporte delanteras y ayuda en la penetración (Fig. 173a), mientras que un punto de acople bajo aumenta la fuerza en la rueda de soporte trasera mejorando la estabilidad del arado y previniendo que la rueda salte encima del surco. Es claro que se debe ajustar el arado en el campo para aprovechar de la manera posible estos dos efectos.

7.3.2 Herramientas de tiro sin ruedas de soporte

El segundo tipo de herramienta de tiro (Fig. 173b) no tiene ruedas de soporte, como en el caso de una rastra de discos. Nuevamente, un punto de acople alto da más peso a la parte delantera de la herramienta de lo que puede ser necesario, por ejemplo al trabajar con una rastra de discos en suelos compactados, donde los cuerpos delanteros penetrarán el suelo duro y los cuerpos posteriores trabajarán a una profundidad similar en el suelo suelto. Al laborar en suelos livianos se debe acoplar con un punto más bajo para prevenir que se entierren los cuerpos delanteros.

7.3.3 Herramientas de tiro con un eje de ruedas de soporte

El tercer tipo de herramienta de tiro tiene un solo eje de ruedas de soporte que a veces también se puede utilizar como transporte.

Los ejemplos típicos son los subsoladores, algunos arados de cincel, los cultivadores con dientes de resorte o las rastras de disco. Se acopla la herramienta directamente a la barra de tiro del tractor sin un brazo de bisagra (Fig. 173c), contrario a los dos tipos anteriores, y entonces la barra de tiro puede ser sujeta a una fuerza vertical.

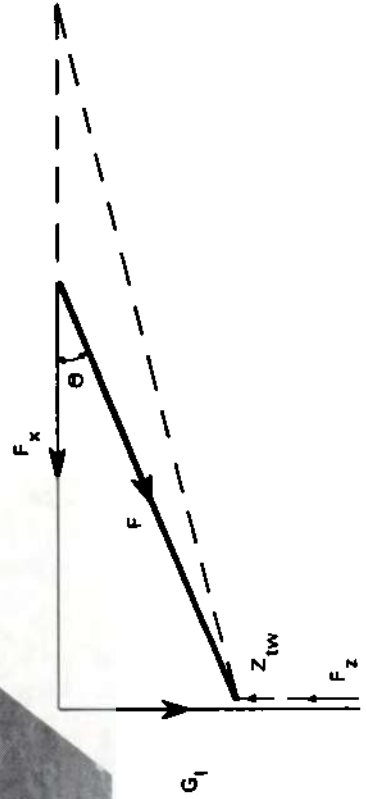
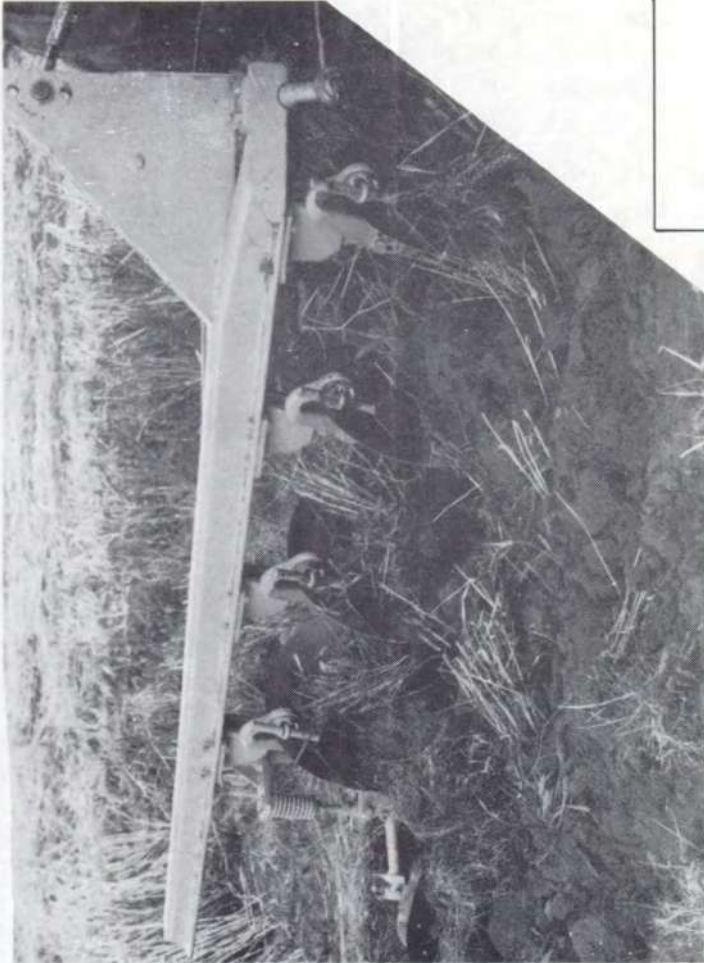
El objetivo del ajuste en este tipo de herramienta es reducir la fuerza de soporte de las ruedas al mínimo, que dé la estabilidad a la herramienta al trabajar a la profundidad deseable y también al mantenerla nivelada. Una fuerza de soporte baja también ayuda a la tracción, dado que se puede transferir más peso a las llantas traseras del tractor.

Si se sube el punto de acople de la herramienta o baja la barra de tiro del tractor, se obtiene poca inclinación en la fuerza resultante de la herramienta F , lo que origina un trabajo profundo y una baja fuerza de soporte en las ruedas. El ajuste opuesto es recomendable para trabajo a poca profundidad, manteniendo al mismo tiempo una baja fuerza de soporte de las ruedas.

7.4 CONTROL DE LA HERRAMIENTA POR EL ACOPLA DE TRES PUNTOS

7.4.1 Posición controlada

Es importante entender la razón por la que se debe cambiar la posición relativa de la herramienta y el tractor al cultivar el suelo. En la Fig. 174 se observa que una variación considerable de profundidad de trabajo ocurre en el caso de que la herramienta tenga su posición fija respecto al tractor; lo deseable es que éste baje la herramienta al pasar encima de una loma y la suba al entrar en una zanja baja. Se puede efectuar estos ajustes manualmente pero resulta inconveniente y frecuentemente inexacto.



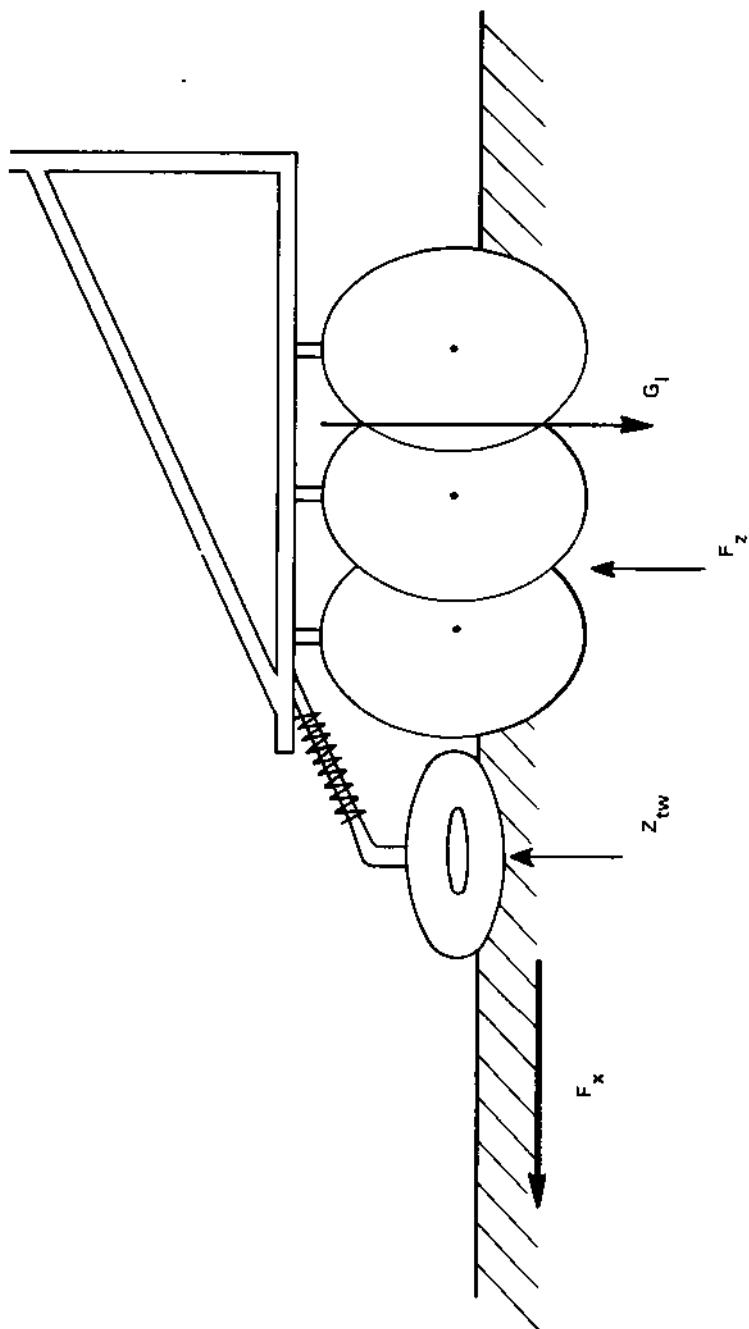


Fig. 172. Fuerzas que actúan sobre el arado de disco debido a su peso G_1 , la rueda de apoyo Z_{tw} y las fuerzas F_x y F_2 . Las líneas discontinuas indican un trabajo profundo.

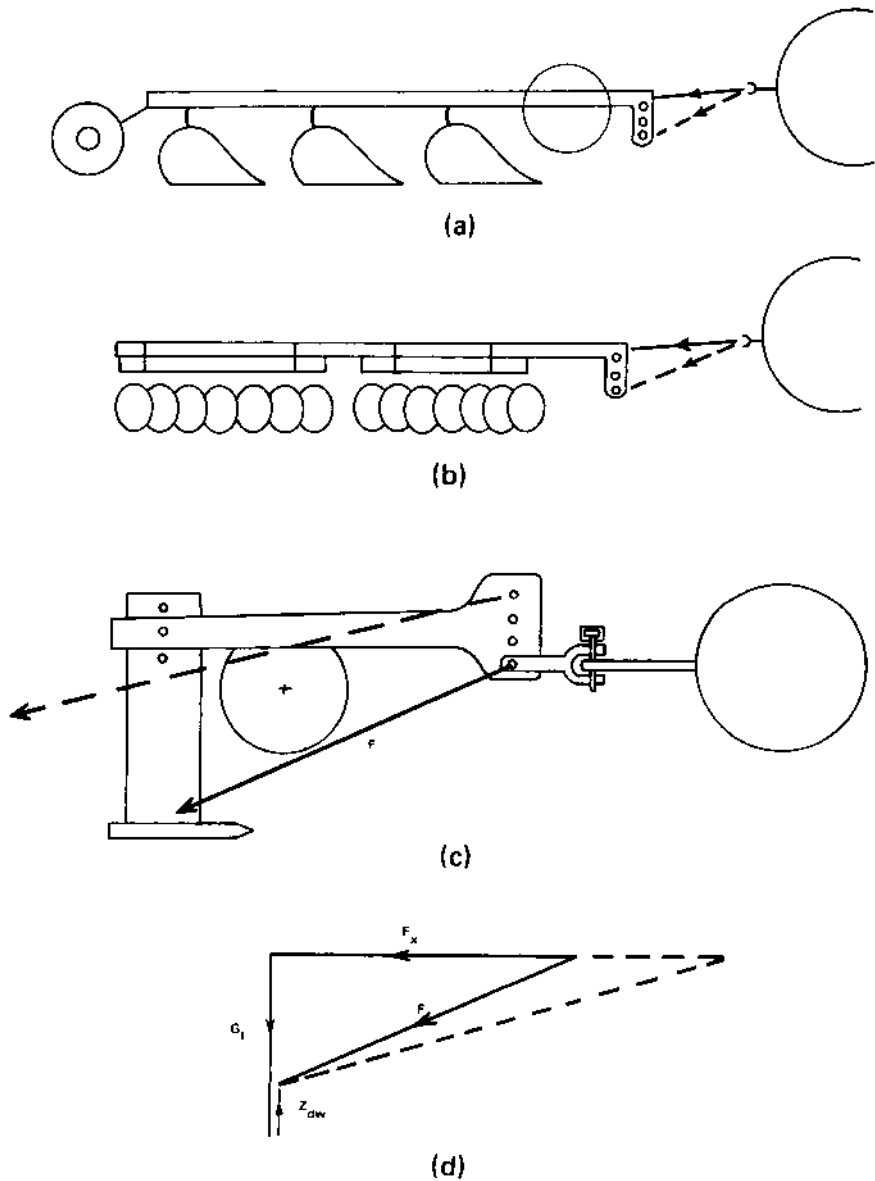


Fig. 173. Efecto de diferentes alturas del punto de acople para los implementos de tiro, (a) con ruedas de soporte delantero y trasero, (b) sin ruedas de soporte y (c) con un solo eje de soporte. (d) Las fuerzas en el implemento al aumentar la profundidad de trabajo.



(e) Rastra pesada de tiro.



(f) Un arado de disco con acople de tiro (*Towner, Santa Ana, California, EUA*).

La mayoría de los tractores modernos está equipada con la llamada 'Posición Controlada', la que permite ajustar la posición de los brazos inferiores por medio de una palanca de control hidráulico; el método implica introducir o vaciar aceite del cilindro hidráulico hasta que los brazos alcanzan una posición predeterminada.

El uso de Posición Controlada es imprescindible para el acople y desacople de las herramientas, a fin de prevenir movimientos inesperados y peligrosos de los brazos inferiores (esto puede ocurrir en el caso de Fuerza Controlada). También se utiliza para herramientas como aspersores, segadoras, palas traseras, sembradoras, distribuidores de abono y para el transporte de equipo.

La Fig. 175b, muestra una representación simplificada de Posición Controlada con las líneas sólidas para la posición neutral en la que el aceite no puede fluir fuera ni dentro del cilindro por estar cerrada la válvula de control. Al mover la palanca a la posición A', la válvula de control abre en la posición D' y el aceite entra al cilindro y levanta los brazos a la posición B'. Esto a su vez mueve la válvula de control por medio de las palancas (posición E') y la devuelve a la posición neutral con los brazos inferiores en su nueva posición predeterminada.

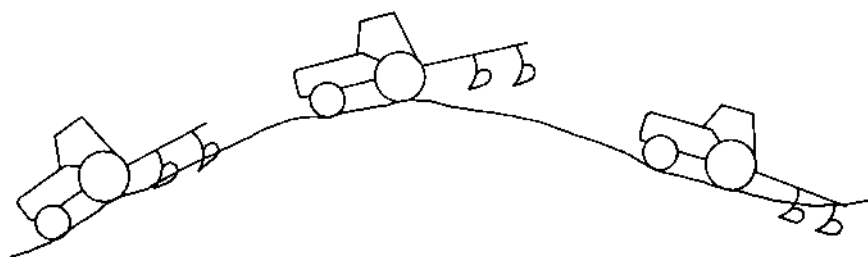
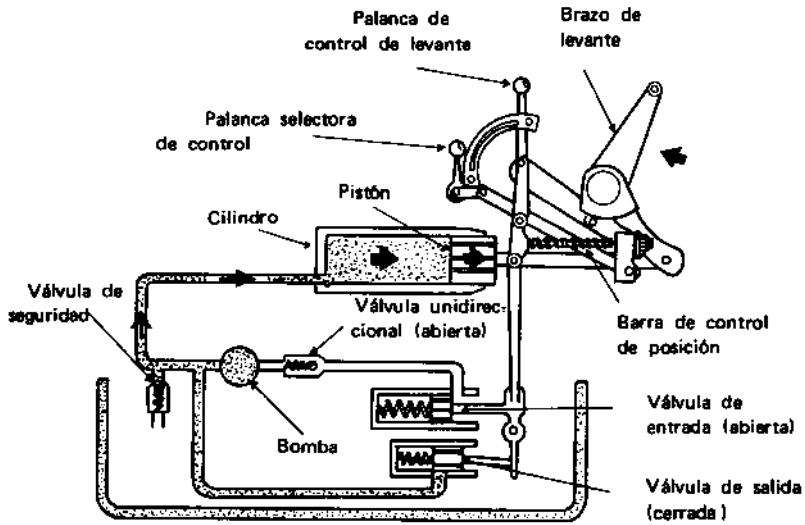
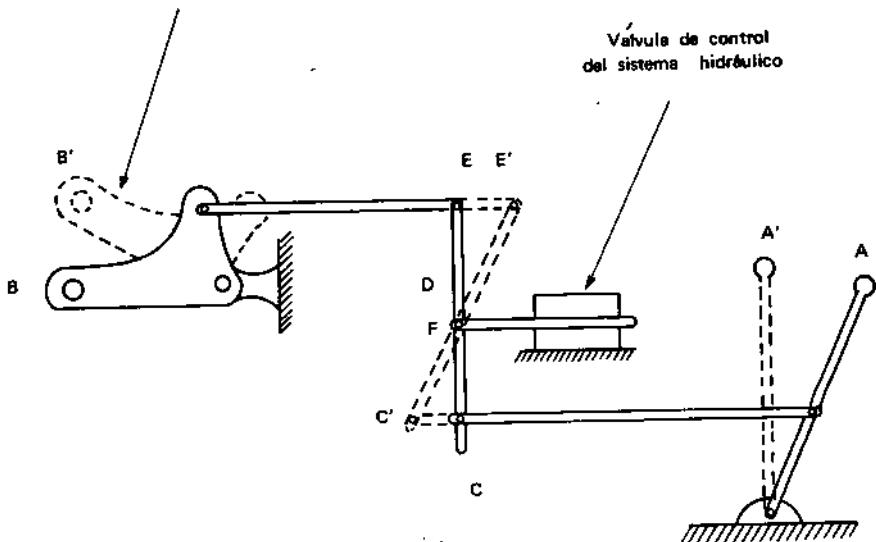


Fig. 174. Efecto exagerado de una herramienta fija con respecto al tractor.



(a)

Brazo para levantar los brazos inferiores



(b)

Fig. 175. El sistema de posición controlada con las válvulas puestas para levantar los brazos (a); simplificación del sistema de Posición Controlada, (b).

7.4.2 Sistema de brazos libres y la herramienta con rueda de profundidad

Una de las formas más simples para controlar las herramientas que trabajan en el suelo es por medio del acople de tres puntos, que no tiene restricción y que evita la complicación de un sistema de control hidráulico en el tractor. El uso de una válvula hidráulica simple facilita levantar la herramienta durante el transporte o bajarla en el trabajo, ya que la estabilidad de la herramienta se apoya con una rueda de profundidad.

Puesto que los brazos no tienen restricción después de bajar la herramienta en el trabajo, las fuerzas deben alinearse a lo largo de los ejes de los brazos (Fig. 176) y se cruzan en el punto V, el punto virtual de acople. Este es muy importante en el estudio del control de las herramientas porque para mantener la estabilidad la fuerza resultante F debe pasar por V.

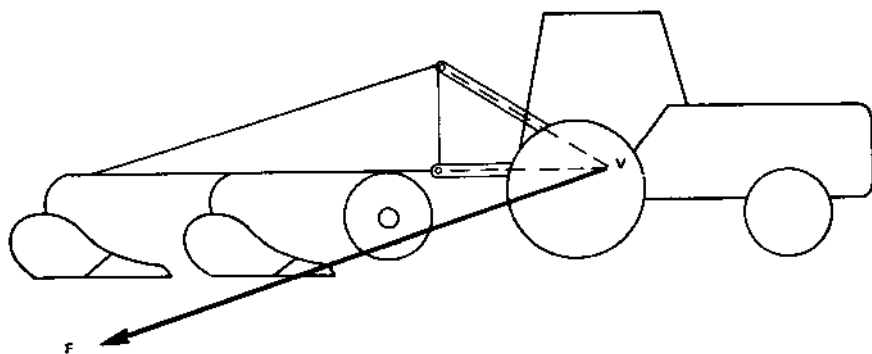


Fig. 176. Sistema de brazos libres en el tractor y una rueda de profundidad en la herramienta.

Cuando la fuerza F pasa por encima del punto virtual de acople V se da una mayor penetración de la herramienta. Esto significa que aumenta la fuerza de soporte en la rueda de profundidad y disminuye la inclinación de la fuerza resultante F (Fig. 168) hasta que ésta pasa por el punto V nuevamente. En tal instancia la estabilidad de la herramienta se ve restituida y la profundidad de trabajo se mantiene constante.

Al trabajar en condiciones variables del campo, la fuerza en la rueda de profundidad cambia para mantener la fuerza resultante de la herramienta F que pasa por V . En terrenos ondulados se conserva la profundidad de trabajo de una manera similar (Fig. 174). Debe anotarse que el uso de una rueda de profundidad disminuye la inclinación de la fuerza resultante de la herramienta F y de esta manera previene que se aproveche al máximo la transferencia y la adición de peso del tractor.

7.4.3 Sistema de brazos libres y geometría de acople variable

La situación de las fuerzas actuantes en el acople de un sistema de brazos libres fue discutida en la sección 7.4.2 anterior, y se observó que para la estabilidad de la herramienta es necesario que la fuerza resultante F deba pasar por el punto virtual de acople V . En caso de que la herramienta no esté provista de una rueda de profundidad, la inclinación de la fuerza F aumenta al disminuir la profundidad de trabajo, lo que significa que al pasar el tractor por encima de una loma, la línea en que actúa la fuerza F pasa arriba del punto V y por un momento hace aumentar la profundidad en lugar de que la herramienta salga del suelo (ver Fig. 174); en esta situación se puede mantener la profundidad de trabajo uniforme aun en terrenos ondulados.

Cuando la línea de acción de F cambia con la profundidad de trabajo, se puede modificar la geometría del acople para alcanzar distintas profundidades (Fig. 177). Normalmente se puede cambiar la posición de acople de los brazos inferiores en el tractor; una posición baja mueve el punto de acople virtual V' hacia adelante, lo que requiere una reducción en la inclinación de la fuerza F para estabilidad y una profundidad de trabajo mayor.

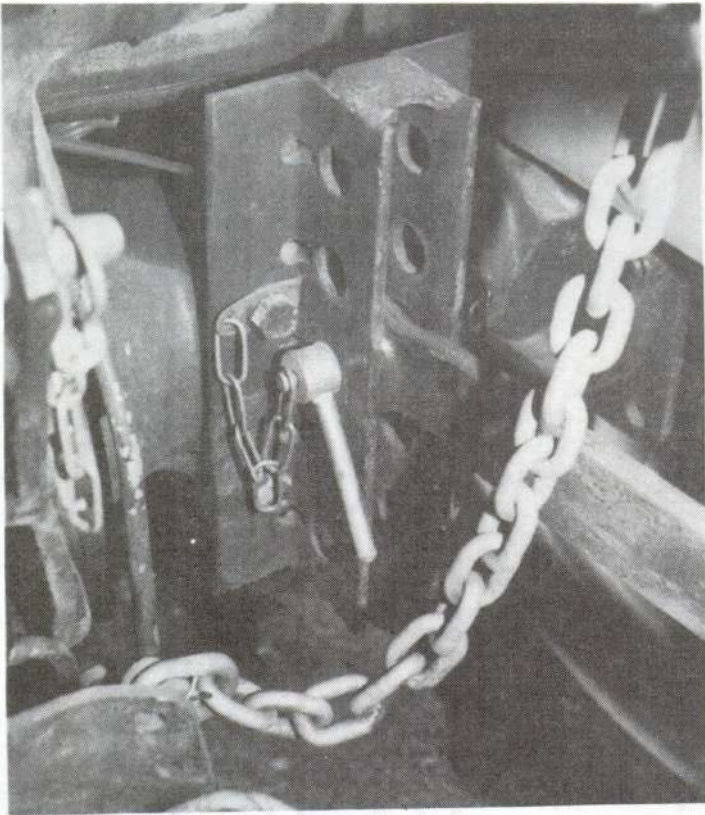
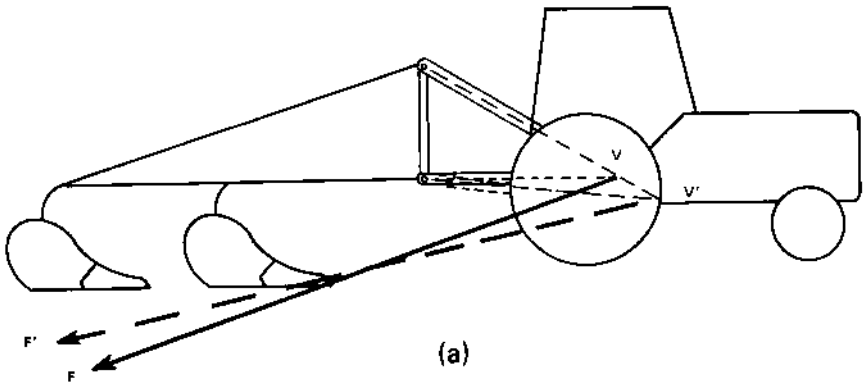


Fig. 177. Sistema de brazos libres con geometría variable para trabajos mediano y profundo (líneas discontinuas) (a); sistema de acople de los brazos libres en el tractor *Leyland 154* (b).

Dado que en el campo se encuentra terreno ondulado y cambios en la textura del suelo, la profundidad de trabajo varía según las distintas condiciones pero se puede rectificar la situación al proveer una rueda de profundidad en la herramienta; la profundidad de trabajo se mantendrá como se describe en la sección 7.4.2.

La transferencia de peso al tractor es menor al usar la rueda de profundidad, y de allí que el objetivo de ajustar la geometría del acople sea reducir la fuerza de soporte de la rueda a un mínimo que todavía provea estabilidad a la herramienta en trabajo.

Se puede resumir los ajustes a la geometría del acople en la siguiente forma:

- a. Acople bajo de los brazos inferiores en el tractor:
 - 1) mueve el punto de acople virtual hacia atrás,
 - 2) disminuye la profundidad de trabajo (sin rueda de profundidad),
 - 3) disminuye la fuerza de soporte de la rueda de profundidad y aumenta la tracción máxima (con rueda de profundidad),
 - 4) puede causar variación en la profundidad de trabajo por inestabilidad de la herramienta (con rueda de profundidad).

- b. Acople alto de los brazos inferiores en el tractor:
 - 1) mueve el punto de acople virtual hacia adelante,
 - 2) aumenta la profundidad de trabajo (sin rueda de profundidad),
 - 3) aumenta la fuerza de soporte en la rueda de profundidad y disminuye la tracción máxima (con rueda de profundidad).

7.4.4 Sistema de fuerza controlada

Una de las innovaciones más significativas en el diseño del tractor agrícola fue el realizado por Harry Ferguson sobre el sistema de Fuerza Controlada, en los años 1930-1940; este sistema de control está todavía incorporado, en forma modificada, en la mayoría de los tractores modernos.

La fuerza resultante de la herramienta F aumenta al trabajar más profundamente, lo que a su vez da compresión al brazo superior del acople (Fig. 178). El sistema de control debe dar respuesta a este aumento de profundidad levantando la herramienta.

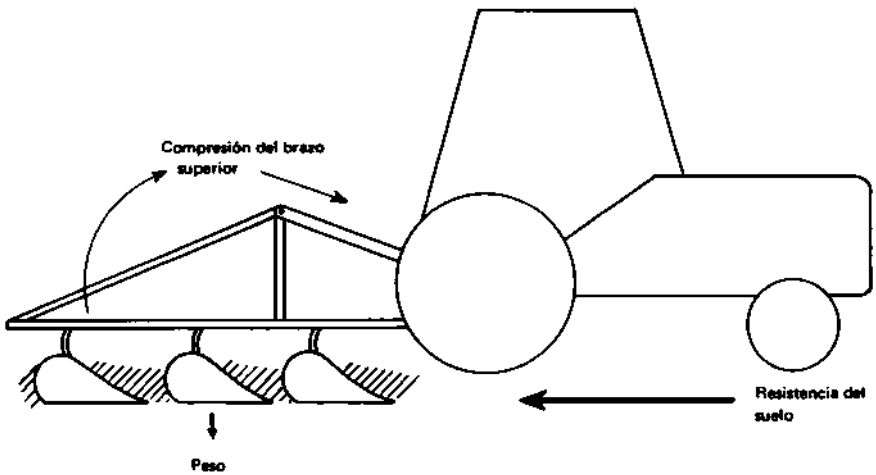


Fig. 178. Compresión del tercer punto debido a la fuerza de arrastre de la herramienta.

En la Fig. 179 se muestra un sistema de control simplificado en que el punto de acople del brazo superior es conectado a un resorte sensor. La mayor profundidad de trabajo comprime el resorte, mueve la válvula de control hidráulico y levanta la herramienta; la reducción de profundidad de trabajo resultante ocasiona extender el resorte y volver la válvula de control a su posición neutral.

De esta manera el sistema de fuerza controlada da respuesta a la fuerza de la herramienta y mantiene una profundidad de trabajo constante en un suelo uniforme aunque la superficie sea ondulada; se aprovecha al máximo la transferencia de peso ya que la herramienta no necesita una rueda de profundidad y porque a ésta la soporta el sistema hidráulico del tractor.

En las condiciones variables del suelo en un campo normal la fuerza de la herramienta F cambiará dando una variación en la profundidad de trabajo; esto significa que el operador debe hacer ajustes menores en la palanca de control durante el trabajo. La fuerza de arrastre F_x y la fuerza vertical F_z , que es más pequeña, afectan el sistema de control (Fig. 168). Cowell y Len⁸ y Dwyer¹¹ indican que la fuerza vertical tiene una importancia especial en los sistemas que experimentan la fuerza por el brazo superior. Este factor contribuye a la variación de la profundidad del trabajo en condiciones normales, aunque esto ocurra dentro de un rango aceptable²³.

Se puede fabricar un acople para sentir estas fuerzas de compresión y tensión en el brazo superior (Fig. 181) pero es más simple, además de confiable, utilizar la fuerza unidireccional en los brazos inferiores para los grandes tractores con herramientas pesadas, dado que ésta queda en tensión durante el trabajo; este sistema es común en los Estados Unidos y lleva la ventaja de que depende casi únicamente de la fuerza de arrastre de la herramienta F_x .

En la Fig. 180 se muestra el efecto del acople de las herramientas largas y pesadas que cambian la fuerza en el brazo superior desde compresión hasta tensión³.

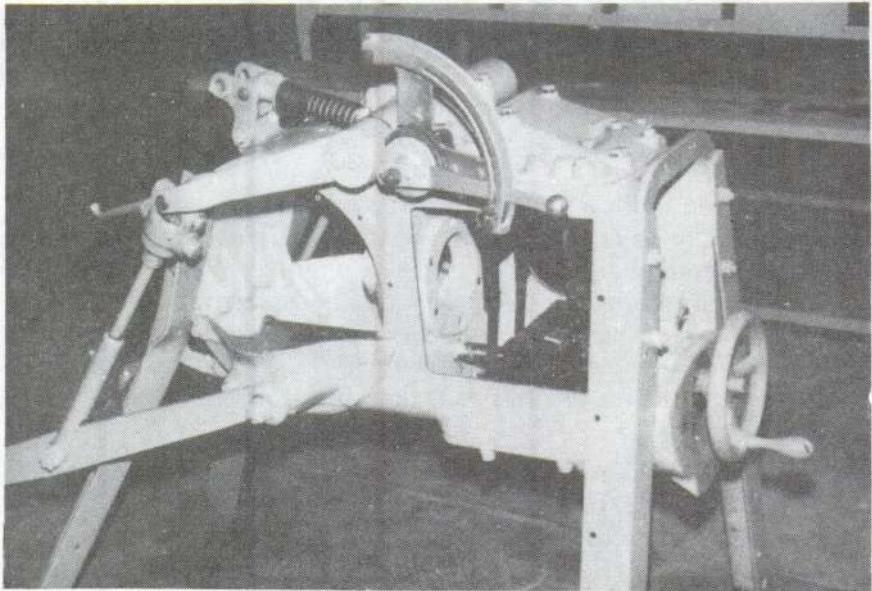
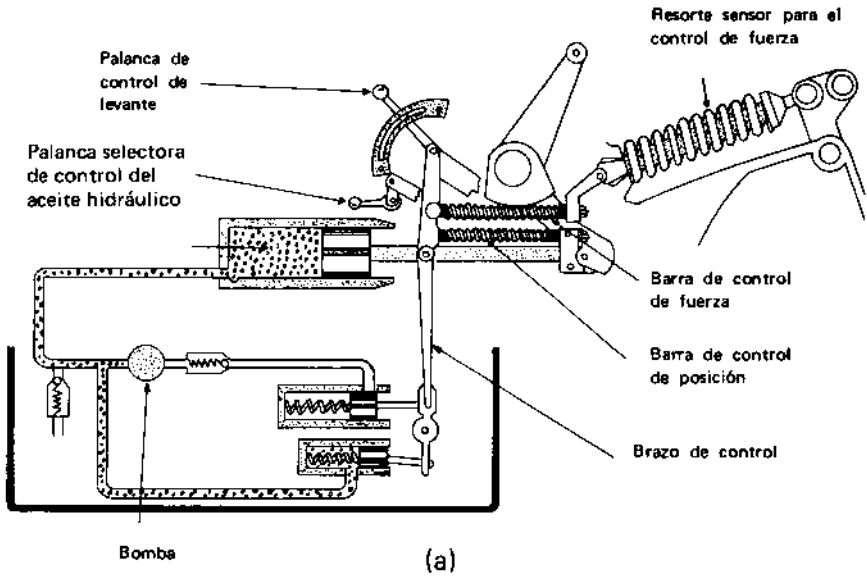


Fig. 179. Control hidráulico de fuerza controlada indicando los componentes principales para un sistema, con un sensor en el tercer punto (a) y vista en detalle del sistema de fuerza controlada utilizado en los tractores *Ferguson* hace 50 años (b).

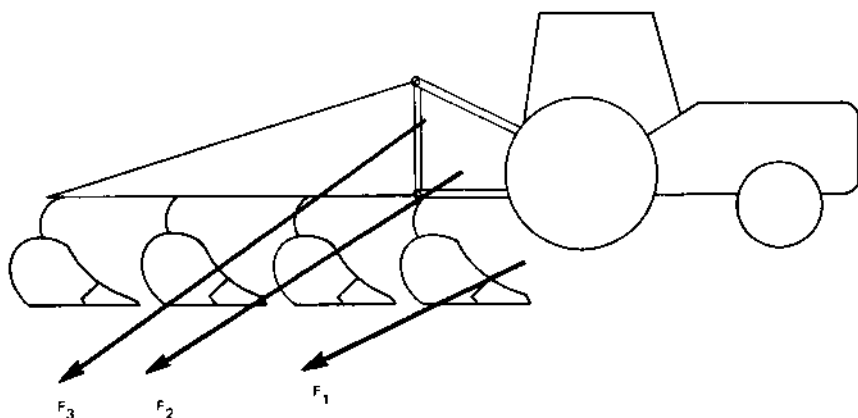


Fig. 180. La fuerza resultante de la herramienta causa una compresión en el brazo superior para los arados livianos (F_1), cero fuerza para los arados medianos (F_2) y una tensión para los arados largos y pesados (F_3). Los brazos inferiores quedan en tensión para todos los casos.

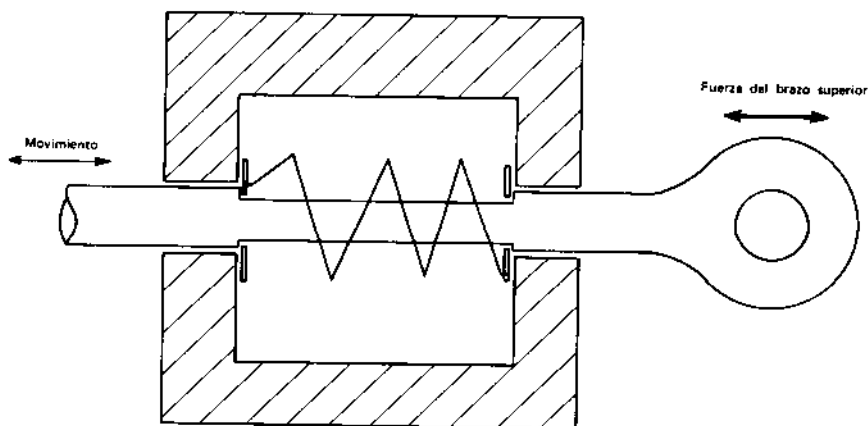


Fig. 181. Sistema simplificado para sentir las fuerzas de compresión o tensión en el brazo superior. El resorte siempre trabaja en compresión (*Ford*).

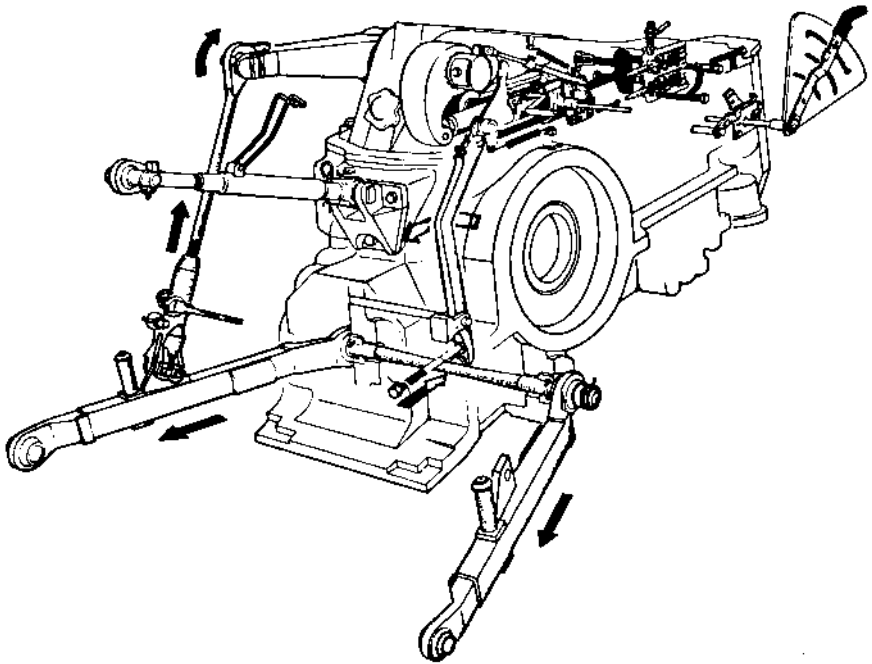


Fig. 182. Sistema de fuerza controlada con un eje flexible acoplado a los brazos inferiores para sentir la fuerza de arrastre de la herramienta (cortesía *John Deere*).

7.4.5 Sensor para el torque de la transmisión (*Load Monitor*)

Otro sistema de fuerza controlada es el diseñado para sentir el torque de la transmisión del tractor (Fig. 183). El valor del torque T es igual a $H r$, en donde H es la tracción y r es el radio de rodado de la llanta trasera. La Ecuación 15 derivada anteriormente en el numeral 6.3.4 muestra que el torque depende de la fuerza de arrastre $F_x = F \cos \theta$, la pendiente β y la aceleración del tractor a . Además, la resistencia al rodado afecta el torque total como sigue:

$$\text{Torque total } T = H r$$

$$T = F_x r + G r \sin \beta + G r \frac{a}{g} + R r$$

Con un aumento en el torque la carga del motor hace levantar la herramienta por medio del sistema de control hidráulico (Fig. 183) hasta que la carga del motor vuelva nuevamente a su nivel predeterminado. Esto significa que el sistema provee una carga uniforme al motor pero que no necesariamente mantiene una profundidad de trabajo constante.

La compañía Ford¹³ recomienda el uso de este sistema, *Load Monitor*, para las herramientas semi-integrales y para las integrales en condiciones muy variables de suelo. El mismo tractor tiene un sistema convencional de fuerza controlada por el brazo superior, el que se recomienda usar en condiciones de alto patinaje, por ejemplo en suelos sueltos arenosos o en condiciones pesadas y húmedas.

Una de las ventajas del *Load Monitor* es su uso en herramientas largas semi-integrales con ruedas de profundidad traseras con operación hidráulica. La mayoría de los tractores de otras marcas controla la parte delantera de la herramienta en forma automática pero ajusta la altura de la rueda de profundidad sólo en forma manual por medio de la palanca de servicios externos hidráulicos. El sistema de *Load Monitor*, en cambio, controla los brazos inferiores y el sistema externo hidráulico, lo que significa que se ajusta la profundidad de trabajo delantera y atrás de la herramienta al mismo tiempo, manteniendo una posición nivelada.

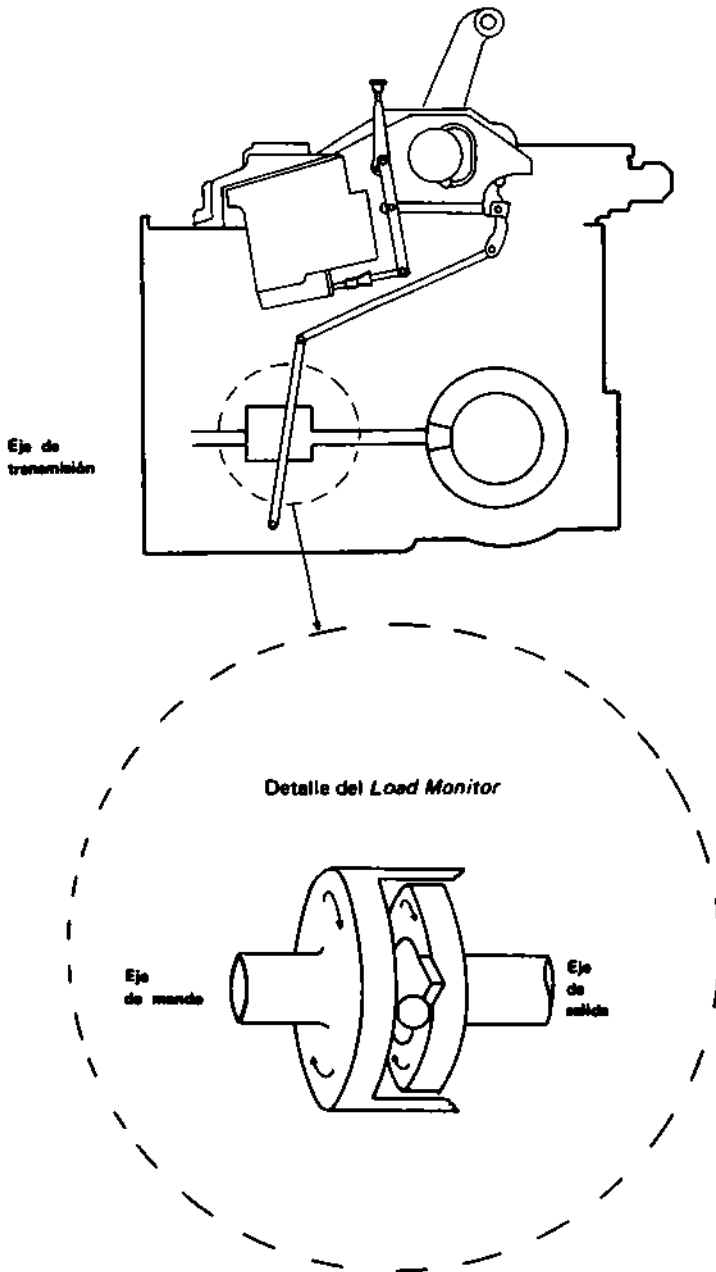


Fig. 183. Sensor para el torque de la transmisión, *Load Monitor* (Ford).

7.4.6 Sistema de control de la fuerza de arrastre

Es factible diseñar el control hidráulico del tractor para que responda únicamente a la fuerza de arrastre F_x . Se ha realizado ensayos^{1 2} de comparación entre un sistema de control de la fuerza de arrastre pura y los sistemas comerciales de fuerza controlada, los cuales, como se indicó en el numeral 7.4.4, dan respuesta a una mezcla variable de la fuerza de arrastre F_x y la fuerza vertical F_z . Estos ensayos mostraron poca mejoría en la uniformidad de la profundidad de trabajo por medio de un sistema neto de fuerza controlada.

7.4.7 Sistema de control con brazos sostenidos y una rueda de profundidad en la herramienta (Tracción Controlada)

En el numeral 7.4.2 se discutió el uso de una rueda de profundidad para alcanzar un trabajo uniforme en condiciones variables de campo. La desventaja consiste en que no se alcanza una transferencia de peso óptima y en la posibilidad de que ocurra un patinaje excesivo en condiciones difíciles.

La compañía David Brown ha desarrollado el sistema **Tracción Controlada**, en el cual la presión en el cilindro de levante puede ser aumentada por el movimiento de la palanca de control hidráulico. Este aumento de presión trata de levantar la herramienta y disminuye la fuerza vertical sobre la rueda de profundidad de la misma transfiriéndola a las llantas traseras del tractor, mejorando así la tracción. El uso cuidadoso de la palanca de control hidráulico permite mantener una profundidad de trabajo uniforme al mismo tiempo que disminuye esta fuerza a un mínimo sobre la rueda de profundidad; de esta manera la transferencia de peso puede llegar casi al máximo. La situación de las fuerzas para el uso de **Tracción Controlada** es mostrada en la Fig. 184.

7.4.8 Sensores de profundidad

Los investigadores Hesse y Moller^{1 8-2 2} han realizado numerosos estudios en Alemania sobre los métodos para medir en forma directa la profundidad del trabajo de la herramienta. En uno de esos estudios se controló la hidráulica del tractor por medio de una rueda sensora puesta un poco adelante del primer cuerpo del arado; además se puede dominar la inclinación de las herramientas más largas por

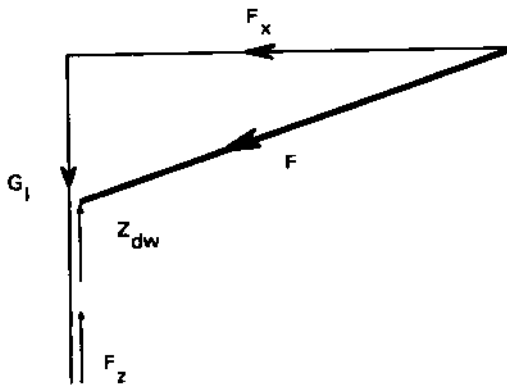
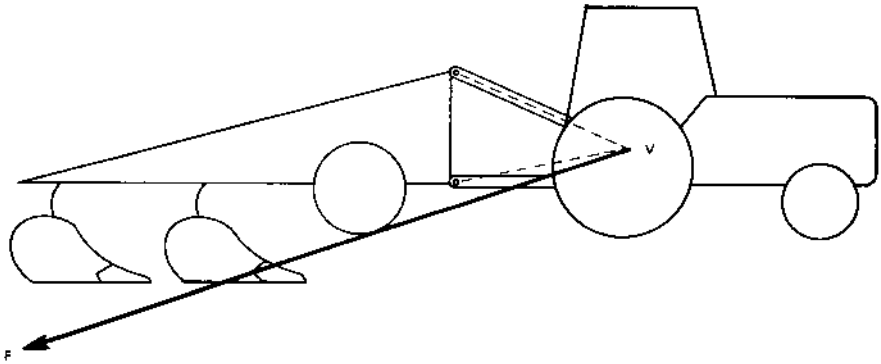


Fig. 184. El sistema de tracción controlada levanta los brazos inferiores con una presión constante, para reducir la fuerza de soporte Z_{dw} sobre la rueda de profundidad.

medio de una segunda rueda sensora colocada adelante del último cuerpo. Se estudió la posibilidad de sentir la transferencia de peso del eje delantero como un apoyo a la tracción en el caso de las herramientas semi-integrales. Estos métodos directos mostraron algunas ventajas pero los sistemas de control necesitan ser medio complejos para permitir distinguir entre los cambios de profundidad provisorios (terrones) y los de naturaleza permanente (ondulaciones) y hasta la fecha nadie los ha utilizado en forma comercial.

7.4.9 Control de respuesta

Los sistemas de control hidráulico que dan respuesta a los cambios en la fuerza de la herramienta normalmente requieren un método para cambiar la rapidez del sistema según las condiciones del campo. Por ejemplo, el sistema de fuerza controlada requiere de una respuesta lenta en condiciones muy variables de campo para evitar demasiada variación en la profundidad de trabajo; en cambio, se requiere de una respuesta más rápida en un suelo uniforme o al utilizar cuchillas traseras entre otros.

La respuesta hidráulica depende de una válvula de restricción en la línea de entrada o salida del aceite por el cilindro de levante (normalmente hay una sola válvula); se ajusta la válvula por medio de una palanca (ej. *Massey Ferguson*), una perilla (ej. *Ford*) o un tornillo con tuerca de seguridad (ej. *John Deere*), y es preferible buscar el ajuste óptimo durante el trabajo de campo.

En algunos diseños del sistema de control hidráulico existe la posibilidad de seleccionar entre una mezcla variable de fuerza controlada y posición controlada (ej. *John Deere*); esto tiene el efecto de cambiar nuevamente la respuesta del sistema a las modificaciones en la fuerza de la herramienta (Fig. 185).

Otro método permite acomodar las herramientas livianas o pesadas, para lo cual se provee al tractor con puntos de acople alternativos para el brazo superior, lo que implica que se requiere de una fuerza menor o mayor para comprimir el resorte que siente la fuerza de la herramienta (Fig. 186).

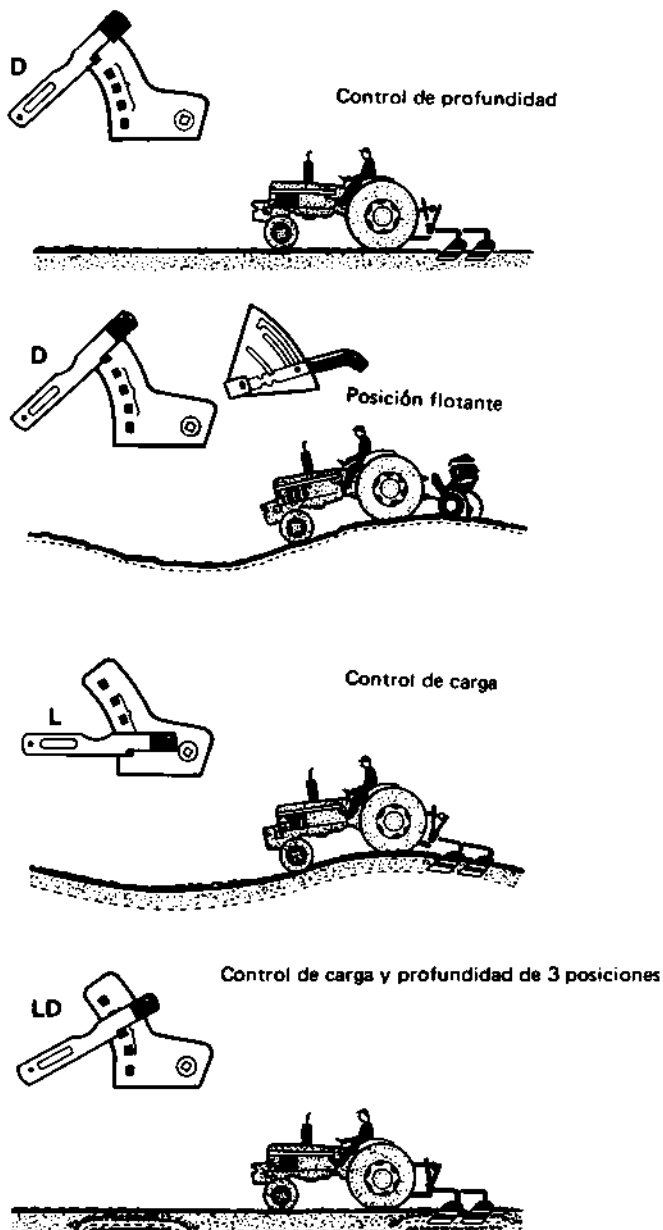


Fig. 185. Ajuste de la Palanca Selectora del Eje Oscilante para condiciones cambiables del suelo y ondulaciones del terreno (*John Deere*).

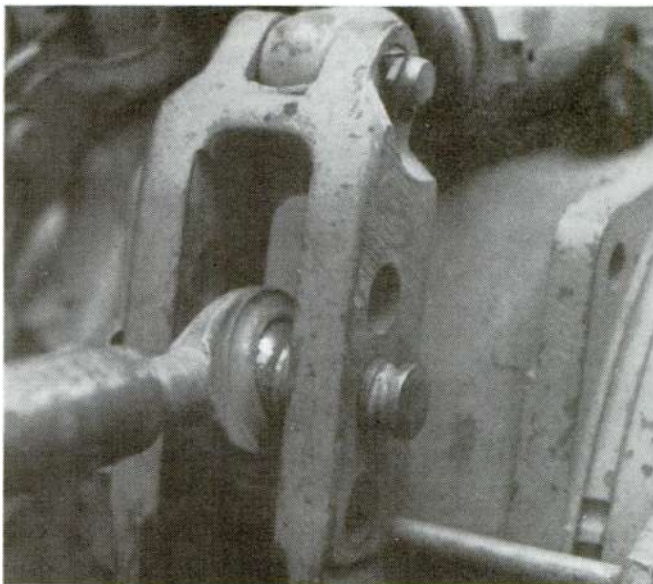


Fig. 186. Tres alternativas para el enganche del tercer punto en un tractor, con el sensor para el sistema de fuerza controlada en esta parte. Estas permiten cambiar la posición del punto de acople virtual (véase Fig. 187) y la sensibilidad del resorte. Normalmente se engancha por el hueco inferior en las herramientas pesadas por el intermedio en las medianas y por el superior en las livianas.

7.5 ACOPLE Y ESTABILIZACION DE LA HERRAMIENTA SOBRE EL ACOPLE DE TRES PUNTOS

7.5.1 Acople de la herramienta por los tres puntos

Se debe acoplar primeramente el brazo inferior, que no tiene ajustes; luego se acopla el otro brazo inferior y finalmente el brazo superior. Para desacoplar se actúa en orden inverso.

Normalmente el tractor y sus herramientas tienen varias alternativas para el acople del brazo superior y a veces también para los brazos inferiores (Fig. 187), con lo que se logra cambiar la distancia hacia adelante del punto de acople virtual (ver numeral 7.1.3) en el que una posición delantera apoya la penetración para trabajo profundo y una posición hacia atrás es más apropiada para trabajo liviano.

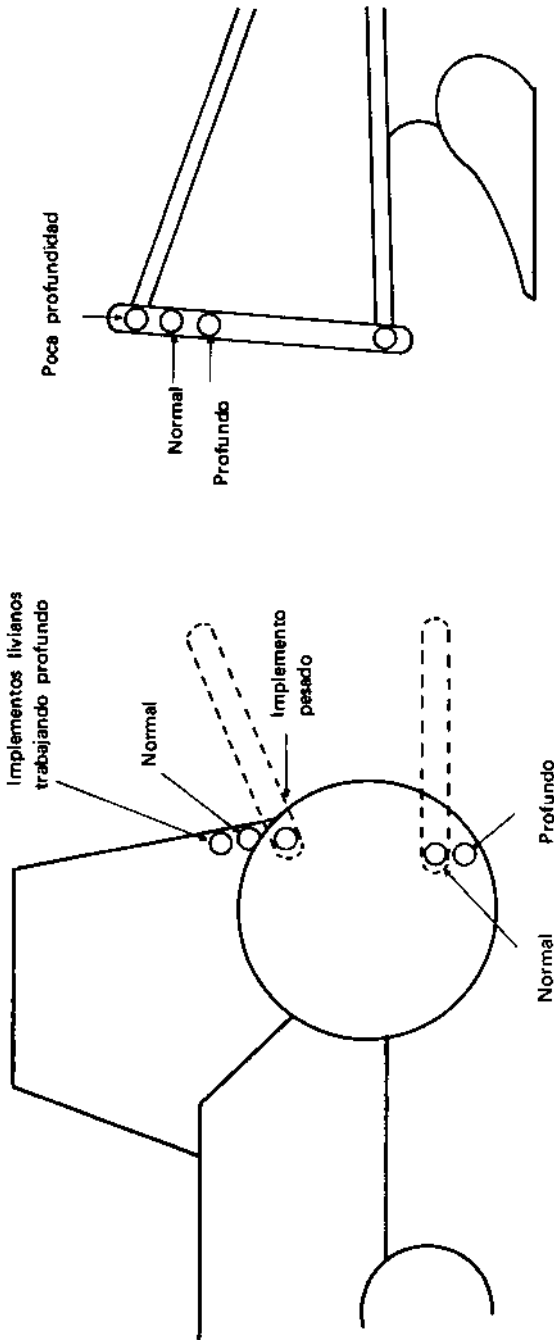


Fig. 187. Las posiciones de acople de una herramienta al tractor.

7.5.2 Estabilización de la herramienta

El objeto de los estabilizadores es restringir el movimiento lateral de la herramienta. Pueden consistir en cadenas, brazos o bloques; el uso correcto es imprescindible para prevenir daños en los brazos inferiores.

La estabilización es una ventaja para la mayoría de las herramientas transportadas, tales como aspersores integrales, abonadoras, segadoras o sembradoras. Por otra parte, es importante nunca restringir demasiado el movimiento lateral al trabajar con arados, rastras de discos o subsoladores porque pueden aparecer fuerzas laterales bastante elevadas; estas herramientas, además, están diseñadas para seguir en línea recta atrás del tractor, y cualquier desvío se deberá a algún daño en la herramienta o un mal ajuste que se debe corregir.

Las herramientas de labranza más livianas pueden beneficiarse algunas veces con la estabilización para obtener mejor precisión en el trabajo, por ejemplo en el caso de las surcadoras y algunas cultivadoras, pero se debe evitar la sobrecarga en los brazos inferiores.

7.5.3 Seguridad

Después de acoplar la herramienta es recomendable levantarla y bajarla para verificar que no se sobrecargue el sistema de estabilización y que no haya interferencia de la herramienta con el tractor, particularmente en las llantas.

NUNCA *tratar de remolcar por medio del acople en el brazo superior porque se podría causar fácilmente un volcamiento.*

NUNCA *pararse entre la herramienta y el tractor durante el acople.*

NUNCA *dejar la herramienta en el aire soportada únicamente por el sistema hidráulico del tractor para efectuar reparaciones. Siempre se deberá usar soportes sólidos adicionales.*

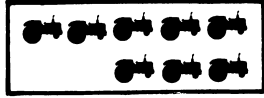
NUNCA *efectuar ajustes o reparaciones a las herramientas con mando por la toma de fuerza sino hasta que se haya apagado el motor del tractor.*

BIBLIOGRAFIA

1. ASAE. Attachment of implements to agricultural wheel tractors equipped with quick-attaching coupler. ASAE Standard No. S 278.5 ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. pp. 196-198.
2. BERNACKI, H., HAMAN, J., KANAFOJSKI, Cz. Agricultural machines, theory and construction. Vol. 1 (1967); English translation, Washington, USA, USDA, 1972. 883 p.
3. BORCHELT, M.C., SMITH, C.A. Lower link sensing in implement hitches. Agric. Engg. 43(8):450-453. 1962.
4. BRITISH STANDARD. Drawbars and hitches for agricultural machines, implements and trailers. BS 3413 Part 1:1961, Dimensions of ring-hook automatic hitch. London, British Standards Instn., 1961. 6 p.
5. _____. Agricultural tractor details for light and medium tractors. BS 1495:1970 (AMD 2232:1977). London, British Standards Instn., 1977. 33 p.
6. _____. Agricultural power take-off shafts and guards. BS 3417:1974 Part 4, Power input connection – drawbar height relationship. London, British Standards Instn., 1974. 24 p.
7. _____. Implement headstock for tractor/implement connection by three-point linkage or automatic coupler. BS 4621:1970. London, British Standards Instn., 1970. 8 p.
8. COWELL, P.A., LEN, S.C. Field performance of tractor draught control systems. J. Ag. Engg. Res. 12(3):205-221. 1967.
9. CULPIN, C. Farm machinery. 10th edition. London, Granada, 1981. pp. 18-49.

10. DIN. (Rapid couplers for three point linkages). (In german). Standard No. 9675, Berlin, Germany.
11. DWYER, M.J. Implement coupling and control. The Agric. Engr. 29(3):61-66. 1974.
12. _____, CROLLA, D.A., PEARSON, G. An investigation of the potential for the improvement of tractor draught controls. J. Ag. Engg. Res. 19(2):147-166. 1974.
13. FORD. Ford 7000 Operators Manual. Ref. No. SE 3180, UK, Ford Motor Company, 1973. 62 p.
14. GETZLAFF, G. (Measurement of force components of a plough body). (In german). Grundl. der Landtech. 1:16-24. 1951.
15. _____. (Soil forces on ploughs with various body forms and soils). (In german). Grundl. der Landtech. 3:60-70. 1952.
16. _____. (Change of forces by turning the plough body from its original normal setting). (In german). Grundl. der Landtech. :71-74. 1952.
17. HARRISON, H.P. Soil reacting forces for disks from field measurements. Trans. ASAE 20(5):836-838. 1977.
18. HESSE, von H., MOLLER, R. Experimentelle und simulierte Untersuchung eines elektrohydraulischen Pflugregelungssystems. Grundl. der Landtech. 18(5):177-184. 1968.
19. _____, _____. Möglichkeiten der Treibachslasterhöhung bei Ackerschleppern. Grundl. der Landtech. 19(4):119-122. 1969.
20. _____, _____. Eine elektrohydraulische Zwei-Groben-Tiefenregelung für grob Schlepperanbaupflüge. Part 1. Grundl. der Landtech. 22(3):75-79. 1972.
21. _____, _____. Eine elektrohydraulische Zwei-Groben-Tiefenregelung für grob Schlepperanbaupflüge. Part 2. Grundl. der Landtech. 22(4):102-106. 1972.

22. HESSE, von H., MOLLER, R. Untersuchung eines Systems zur Treibachslasterhöhung an einem Ackerschlepper mit Aufsattelpflug. *Grundl. der Landtech.* 24(5): 164-171. 1974.
23. JOHNSTON, R.C.R., BIRTWISTLE, R. Wheatland disc plough investigations. Part II, Disc forces. *J. Ag. Engg. Res.* 8(4):312-326. 1963.
24. KEPNER, R.A., BAINER, R., BARGER, E.L. Principles of farm machinery. 3rd edition. Westport, USA, Avi, 1978. pp. 177-180.
25. KOFOED, S.S., CHRISTIANSEN, Sv. Aa. An approach to a universal tractor hitch. *J. Ag. Engg. Res.* 18(1):37-45. 1973.
26. McKIBBEN, E.G., REED, I.F. The influence of speed on the performance characteristics of implements. Paper for the SAE National tractor meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA, Sept. 1952.
27. OSBORNE, L. Automatic tractor/implement coupling. Paper for National Power Farming Conference, Scarborough, UK, February, 1971. 10 p.
28. ROGERS, O.S.J., HAWKINS, J.C. Soil loads on plough bodies. Technical Memorandum No. 105, Parts I and II, Silsoe, Bedford, UK, NIAE, 1955, 12 p.; 1956. 15 p.
29. SKALWEIT, H. (Measurement of forces on the three point linkage in field tests on ploughs with control system operated through the tractor hydraulic lift). (In german). *Grundl. der Landtech.* 20:53-57. 1964. (English translation, Silsoe, Bedford, UK, NIAE, Translation No. 272).
30. SOUCEK, Z. (Fundamentals of the calculation of strenght for mouldboard ploughs). (In czech). *Sb. Zemed. Tech.* 11(1):13-42. 1965.
31. TANNER, D.W., DEAN, J.R. The soil forces acting on the body and on the disc coulter of a plough. *J. Ag. Engg. Res.* 8(2):194-201. 1963.
32. TAYLOR, P.A. Field measurement of forces and moments on wheatland plow discs. *Trans ASAE* 10(6):762-770. 1967.



COMPORTAMIENTO DEL TRACTOR CON OTRAS HERRAMIENTAS AGRÍCOLAS

8.1 EL ACOUPLE DE REMOLQUES AL TRACTOR AGRICOLA

Por ser el transporte una tarea agrícola importante se ha diseñado para ello un rango amplio de remolques. Desde el punto de vista de movilidad se les puede clasificar de la siguiente manera:

- a. Remolques balanceados de cuatro ruedas con las delanteras dirigidas por la barra de tiro.
- b. Remolques balanceados de cuatro ruedas con acoplamiento estrecho de los ejes y sin ruedas dirigidas.
- c. Remolques no balanceados de dos ruedas, diseñados para transferir peso hacia las llantas traseras del tractor a fin de apoyar la tracción (ver 6.1).
- d. Remolques no balanceados de dos ruedas con mando por la toma de fuerza para apoyar en mejor forma la tracción.

También existen remolques no balanceados con acoplamiento estrecho de dos ejes para el transporte de cargas pesadas pero en la mayoría de los casos se les puede considerar como el de un remolque no balanceado de dos ruedas.

Se ha efectuado varios análisis detallados sobre el comportamiento de la combinación tractor y remolque, especialmente con referencia a los sistemas para apoyar la tracción y los remolques con mando por la toma de fuerza^{1,3,13,16}. A continuación se presenta un análisis simplificado para indicar las fuerzas principales que actúan al trabajar dicha combinación en una pendiente.

8.1.1 Remolque balanceado dirigible de 4 ruedas.

El remolque balanceado (Fig. 188) va tirado en la pendiente por una barra de tiro, articulado en un plano vertical.

Al ignorar el peso de la barra de tiro, la fuerza vertical F_y es cero:

$$F_y = 0 \quad (1)$$

Al considerar las fuerzas paralelas a la pendiente para el remolque:

$$F_x = G_l \operatorname{sen} \beta + R_l \quad (2)$$

en donde R_l es la resistencia al rodado del remolque.

8.1.2 Remolque balanceado con acoplamiento estrecho de 4 ruedas

El diseño de un remolque con acoplamiento estrecho (Fig. 189) es más económico y simple por cuanto evita la necesidad de un mecanismo de dirección, pero su uso agrícola está un poco limitado por razón de sus características de comportamiento sobre una pendiente, como se demuestra en las líneas siguientes.

Generalmente se arregla la geometría de acople para que la barra de tiro rígida esté al mismo nivel que el punto de acople en el tractor, lo que significa que la fuerza vertical F_y es de cero en terreno nivelado. Solamente se puede analizar en forma completa la distribución de las fuerzas en terrenos ondulados o una pendiente al considerar las deflecciones de los resortes y las llantas. La razón es que el análisis

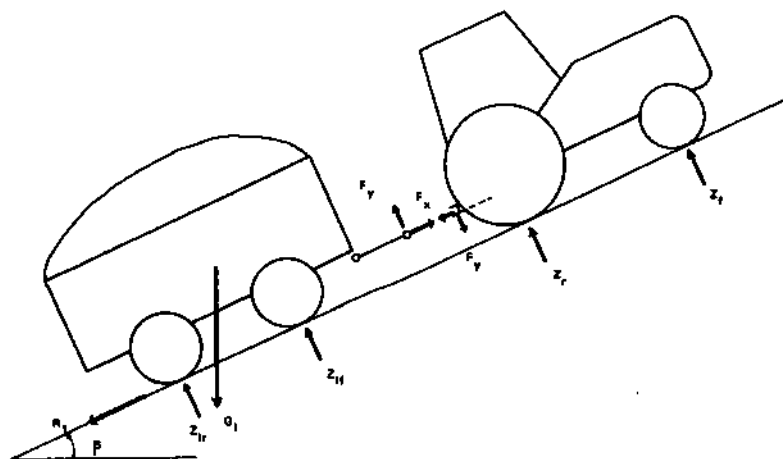


Fig. 188. Fuerzas que actúan al tirar un remolque balanceado de cuatro ruedas por una pendiente (*F.W. Pettit, Spalding, Inglaterra*).

simple de la estática únicamente puede proveer tres ecuaciones distintas, pero existen cuatro cantidades desconocidas:

$$F_x \quad F_y \quad Z_{lr} \quad Z_{lf}$$

Para evitar estas complicaciones se utilizará la situación demostrada en la Fig. 189 e indicará solamente algunos puntos generales. Se observa que la fuerza de arrastre paralela al terreno F_x es igual que en el caso anterior:

$$F_x = G_l \operatorname{sen} \beta + R_l \quad (2a)$$

La fuerza resultante del soporte del remolque, $Z_l = (Z_{lr} + Z_{lf})$ actúa por una posición entre los dos ejes. Al subir la pendiente el peso hace a la fuerza del soporte Z_l actuar más cerca del eje posterior que del eje delantero. Se observa en la Fig. 189 que un remolque con centro de gravedad alto puede originar una situación en que el peso del remolque G_l intercepte la pendiente, atrás de la fuerza de soporte, la que causa al remolque iniciar un volcamiento hacia atrás. La fuerza vertical F_y , en este caso, es negativa y disminuye el peso sobre las ruedas traseras del tractor, lo que provoca una pérdida de tracción en esta situación de mayor necesidad. Se puede solucionar el problema por medio de un mayor espaciamiento entre ejes, pero con esto las llantas sufren un patinaje lateral excesivo durante un viraje. Como consecuencia, los remolques de acoplamiento estrecho normalmente tienen un centro de gravedad bajo, o bien su uso se restringe a terreno firme y de nivel, en donde la tracción y la resistencia al rodado no son factores limitantes.

Como alternativa se puede colocar los dos ejes hacia atrás en el remolque, para crear características similares a las de un remolque no balanceado de dos ruedas, descrito a continuación, con la ventaja adicional de que se reduce la compactación del suelo y la resistencia al rodado.

8.1.3 Remolque no balanceado de dos ruedas

Este sistema tiene la ventaja de transferir peso a las llantas traseras del tractor y de esta manera apoyar la tracción¹⁵ (Fig. 190).

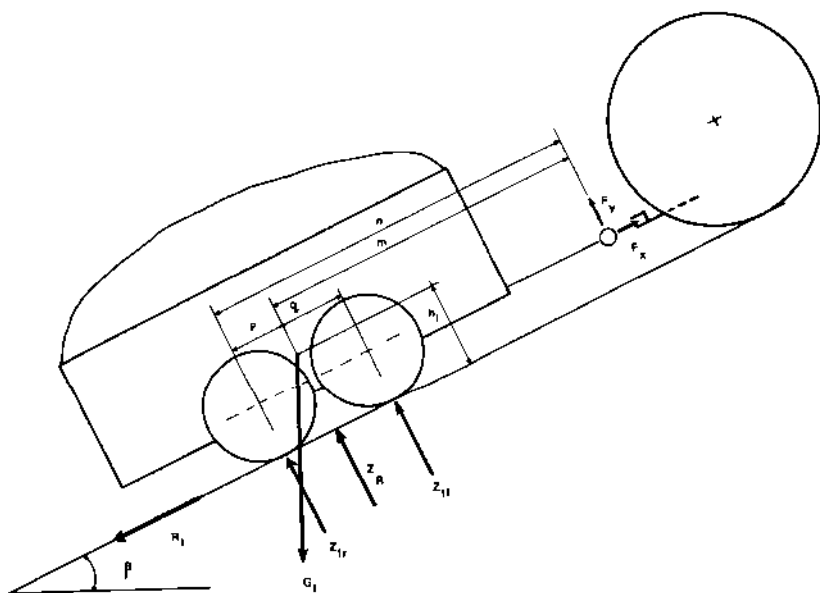


Fig. 189. Fuerza que actúan al tirar un remolque balanceado con ejes de acoplamiento estrecho, por una pendiente (*F.W. Pettit, Spalding, Inglaterra*).

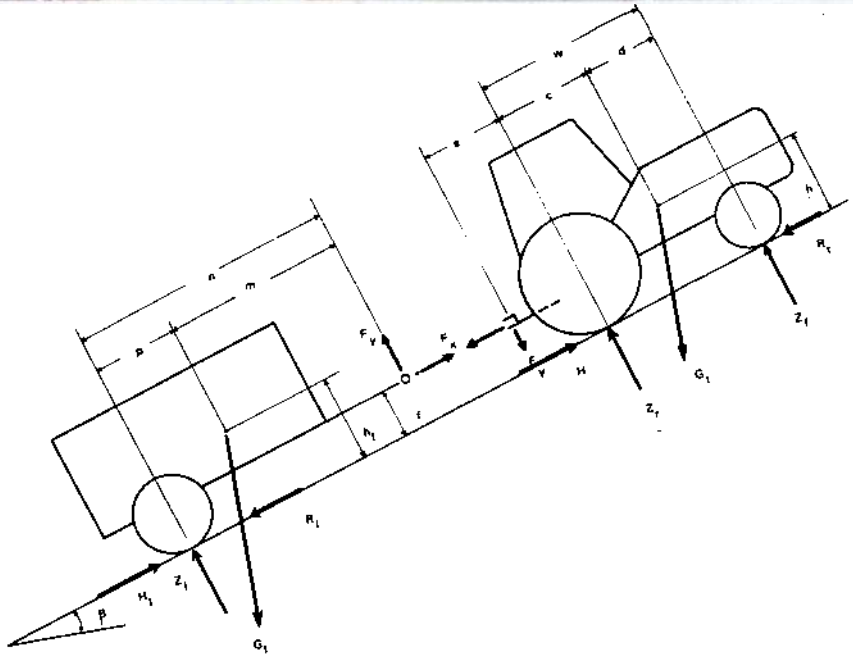


Fig. 190. Fuerzas que actúan al tirar un remolque no-balanceado de dos ruedas por una pendiente (*F.W. Pettit, Spalding, Inglaterra*).

Las fuerzas que actúan paralelas a la pendiente son:

$$F_x = G_1 \operatorname{sen} \beta + R_1 - H_1 \quad (3)$$

Las fuerzas perpendiculares a la pendiente son:

$$F_y + Z_1 = G_1 \operatorname{cos} \beta \quad (4)$$

al considerar los momentos alrededor del punto de acople del remolque, da:

$$Z_1 n = G_1 [m \operatorname{cos} \beta + (h_1 - f) \operatorname{sen} \beta] + [H_1 - R_1] f \quad (5)$$

luego introduce la ecuación (5) en (4):

$$F_y = G_1 \operatorname{cos} \beta \left(1 - \frac{m}{n}\right) - G_1 \operatorname{sen} \beta \frac{(h_1 - f)}{n} - [H_1 - R_1] \frac{f}{n}$$

la misma que se puede reescribir de la siguiente forma:

$$F_y = G_1 \frac{p}{n} \operatorname{cos} \beta - G_1 \frac{(h_1 - f)}{n} \operatorname{sen} \beta - [H_1 - R_1] \frac{f}{n} \quad (6)$$

Debido a que el remolque no es gobernado por la toma de fuerza ($H_1 = 0$), la fuerza de tiro paralela al suelo es como la anterior:

$$F_x = G_1 \operatorname{sen} \beta + R_1 \quad (2b)$$

El valor numérico de esta fuerza es normalmente más alto que en el caso del remolque de cuatro ruedas, ya que la presión bajo las dos ruedas presenta una mayor resistencia al rodado total.

La fuerza vertical sobre la barra de tiro F_y es la siguiente:

$$F_y = G_1 \frac{p}{n} \operatorname{cos} \beta - G_1 \frac{(h_1 - f)}{n} \operatorname{sen} \beta + R_1 \frac{f}{n} \quad (7)$$

Esto da una buena transferencia de peso al tractor en el caso de que el centro de gravedad (h_1) sea bajo. En un diseño típico de un tractor, la relación p/n queda en el rango 0.15 hasta 0.25, lo cual significa que entre el 15 y el 25 % del peso del remolque queda soportado por el tractor al estar estacionado en terreno nivelado.

8.1.4 Remolque no balanceado de dos ruedas con mando por la toma de fuerza

Los remolques con mando por el tractor pueden mejorar bastante la movilidad de la combinación bajo condiciones difíciles del campo, y también pueden ofrecer una ventaja en combinación con tractores pequeños, los cuales tienen malas características de tracción a causa de su poco peso. Por su costo más elevado estos remolques requieren que se les justifique en una aplicación especial, pero en cambio pueden ofrecer una solución más económica, aunque no tan eficiente, que el uso de un tractor de doble transmisión.

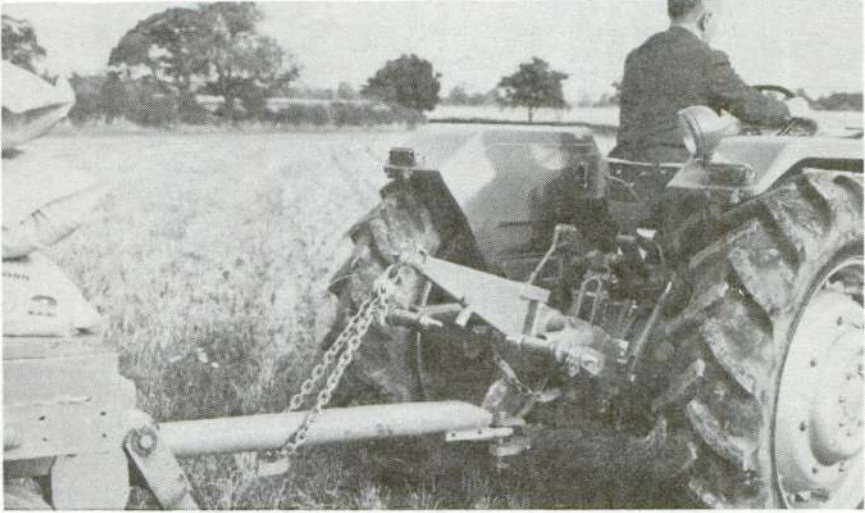
La ecuación (6) demuestra que se disminuye la fuerza vertical F_y por el valor $H_1 \frac{f}{n}$, lo que mejora la estabilidad del tractor ya que se debe tomar en cuenta la esperanza de que el remolque tenga capacidad para llevar carga más pesada. La ecuación (3) muestra que el apoyo a la fuerza de arrastre es H_1 , cuyo valor depende de las características de la transmisión y de las llantas de la combinación³; esto apoya un poco más la estabilidad.

8.2 ACOPLER PARA TRANSFERIR PESO A LAS HERRAMIENTAS DE TIRO

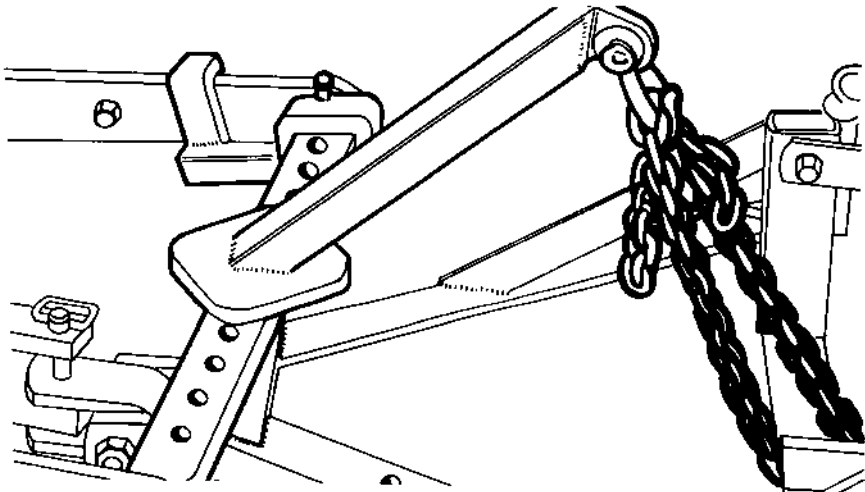
Se ha diseñado varias modificaciones al acople para alcanzar una mejor transferencia de peso en las herramientas de tiro^{1 4}; algunas de ellas requieren un acople especial en el remolque o la herramienta, lo que es desventajoso pues no se les puede acoplar a una barra de tiro convencional, mientras que otros alcanzan la transferencia de peso por medio de una cadena y brazo montados sobre los tres puntos que halan la barra de tiro. Todos los sistemas deben permitir articulación en el plano vertical para terreno ondulado, si bien su diferencia principal está en el sistema de control hidráulico utilizado en el tractor.

8.2.1 Sistema de presión controlada

El sistema de Presión Controlada en los tractores *Massey Ferguson* permite que la presión en el cilindro de levante se mantenga a un nivel constante sin relación con la posición de los brazos inferiores. Se acopla el remolque a la barra de tiro del tractor y la cadena a la barra de tiro del remolque por medio de un brazo en los brazos inferiores (Fig. 191); la palanca de presión controlada gobierna la tensión de la cadena manteniendo una transferencia de peso al tractor durante el tiraje o el frenado del remolque (Fig. 192).



- (a) Sistema de enganche para aprovechar el sistema hidráulico de Presión Controlada. Nótese la bola que conecta la cadena al brazo y que se desacopla al romper el pasador en la barra de tiro, evitando la posibilidad de un volcamiento trasero (*Massey Ferguson*).



- (b) Uso del sistema de tracción controlada de *David Brown* y un enganche especial para la transferencia de peso (ya no se fabrica).

Fig. 191. Sistemas de transferencia de peso para las herramientas de tiro.

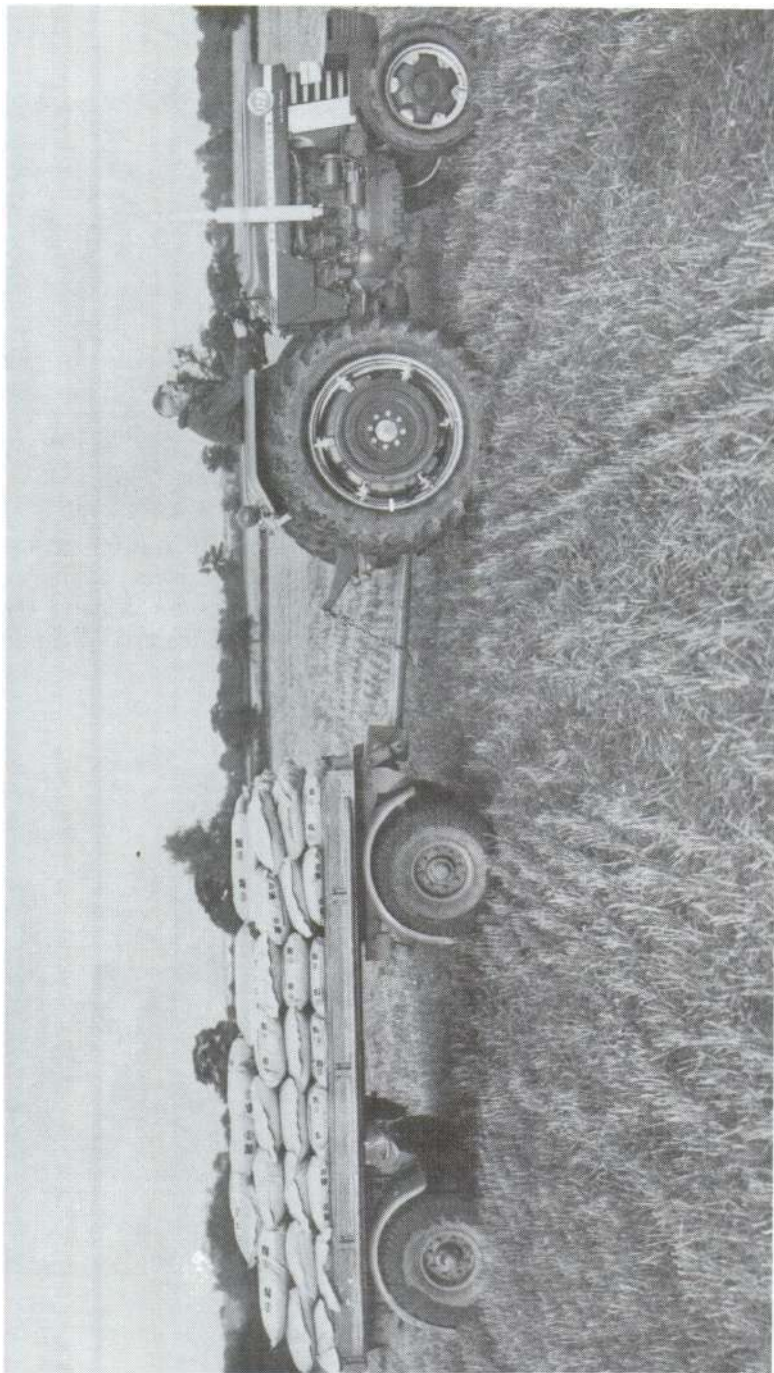


Fig. 192. Utilización del acople especial para aprovechar la transferencia de peso, proporcionada por el sistema de Presión Controlada (*Massey Ferguson, Coventry*).

El sistema de Tracción Controlada de los tractores *David Brown* opera de una manera casi idéntica pero su diferencia principal se encuentra en el diseño interno del sistema hidráulico. En el caso anterior solamente existe un flujo de aceite mayor al cambiar la posición de los brazos inferiores, pero en el sistema de tracción controlada el aceite es forzado por una válvula de restricción variable que mantiene la presión en el cilindro de levante. Como resultado, la potencia hidráulica requerida en este caso es más elevada.

8.2.2 Sistema de fuerza controlada

Los sistemas de fuerza controlada normalmente se aplican a los tractores que sienten la fuerza de arrastre en los brazos inferiores (ej. Fig. 182); el control hidráulico levanta los brazos al aumentar la fuerza de tensión en los mismos (véase numeral 7.4.4). El acople ilustrado en la Fig. 193 utiliza el principio para ocasionar una transferencia de peso al tractor durante el tiraje de remolques pesados.

La desventaja principal de este sistema consiste en que no se puede alcanzar ninguna transferencia de peso al frenar o retroceder el remolque; inclusive es difícil diseñarlo para hacerlo suficientemente sensitivo a las fuerzas de arrastre fluctuantes o a las relativamente bajas, como en el caso de empaquetadoras o de remolques livianos.

8.3 SISTEMAS PARA FRENAR LA COMBINACION DEL TRACTOR-REMOLQUE

Las Figs. 194 y 195 representan las fuerzas principales durante el frenado de remolques balanceados y no balanceados. El coeficiente de resistencia al rodado es ψ (ver Capítulo 9), pero su valor es cero en caso de que las llantas estén remordidas. Los frenos del remolque causan una fuerza F_1 que depende del sistema del frenado en la siguiente forma:

- a. Sin frenos: $F_1 = 0$
- b. Frenos de poder conectado-desconectado: F_1 tiene un valor constante.
- c. Frenos de poder proporcionales acoplados a los frenos del tractor: $F_1 \propto F_t$
- d. Frenos de sobrecarga que actúan en el caso de que la barra de tiro del remolque esté en compresión: $F_1 \propto F_x$

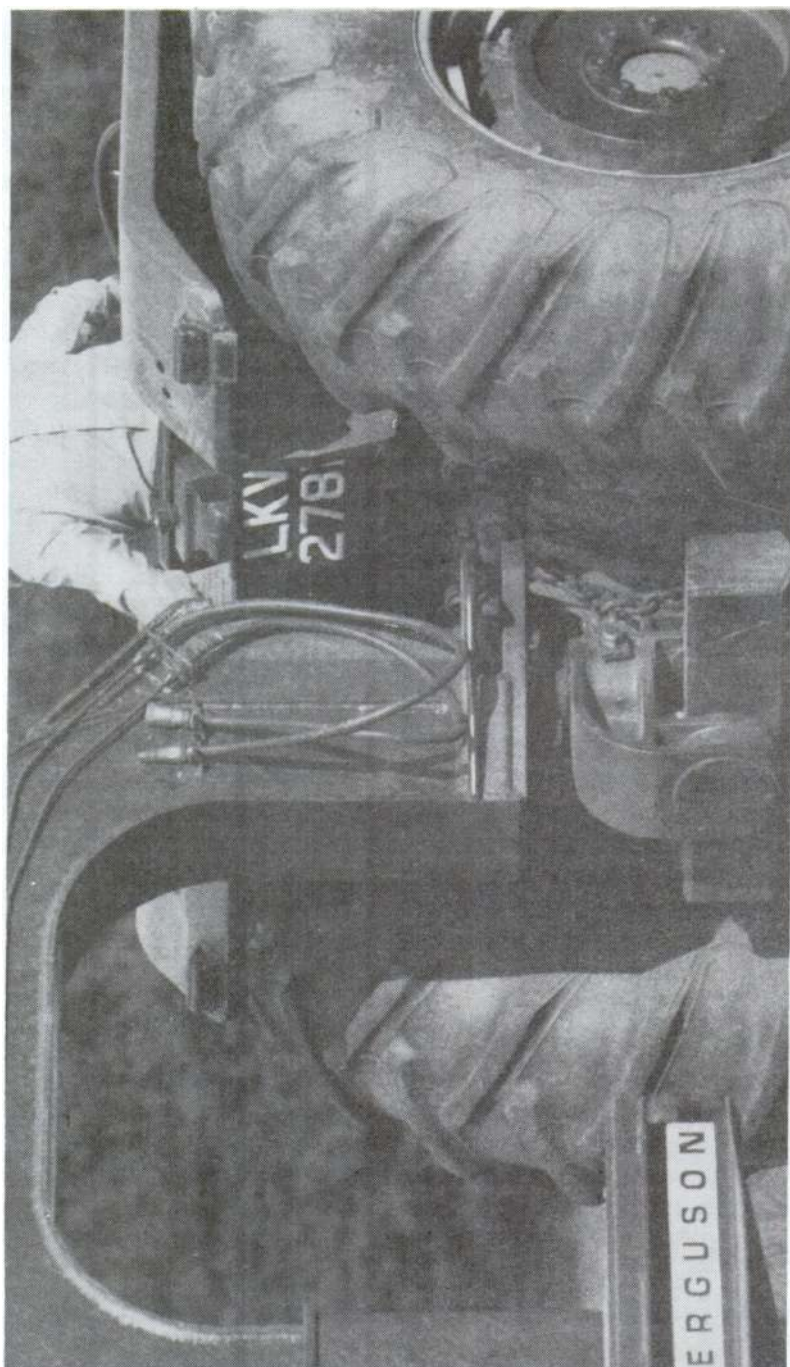
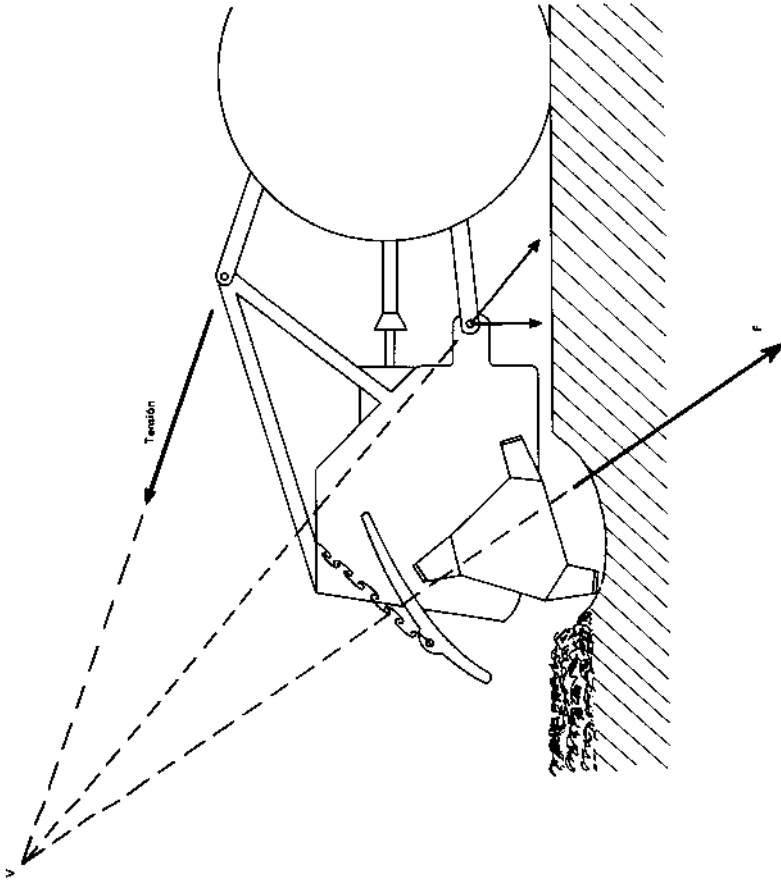


Fig. 193. Acople de remolque especial (Harold Poole Group Ltd, St Helier, Jersey).



(b) Rotavator sin rueda de profundidad soportado sobre los tres puntos del tractor.
Fig. 198. Las fuerzas de acople para el rotavator.

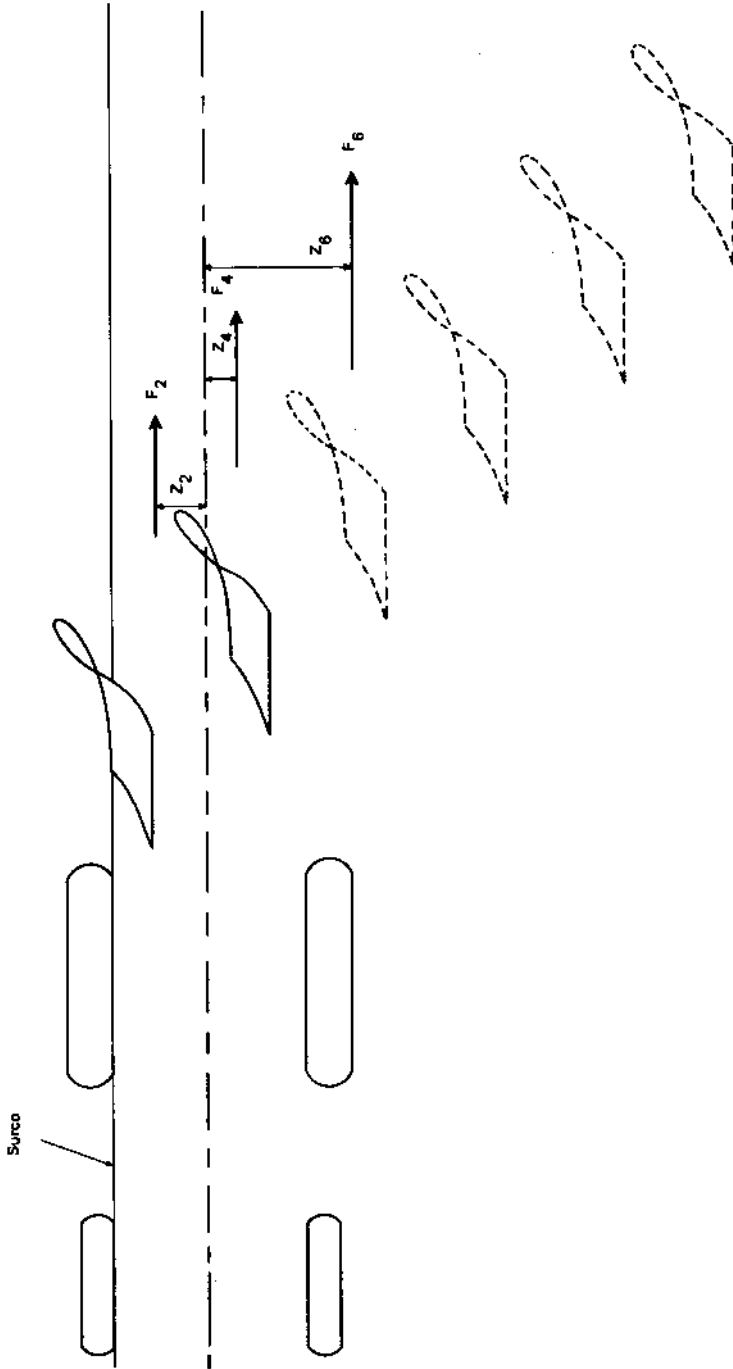


Fig. 199. Efecto de 2, 4 y 6 cuerpos en el arado para un tractor al trabajar en el surco. Se nota la necesidad de hacer trabajar el tractor fuera del surco, con mayor número de cuerpos.

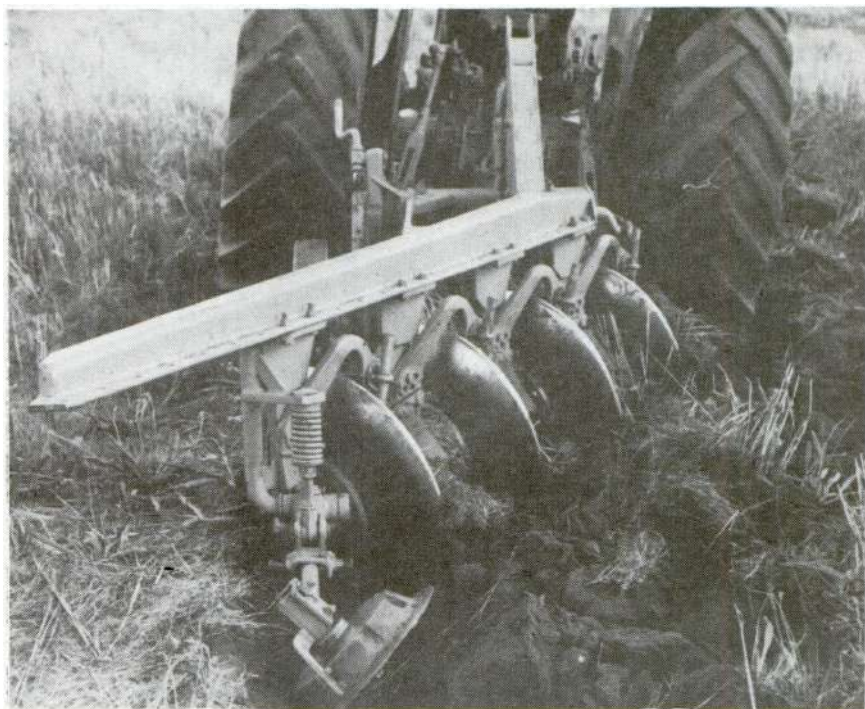
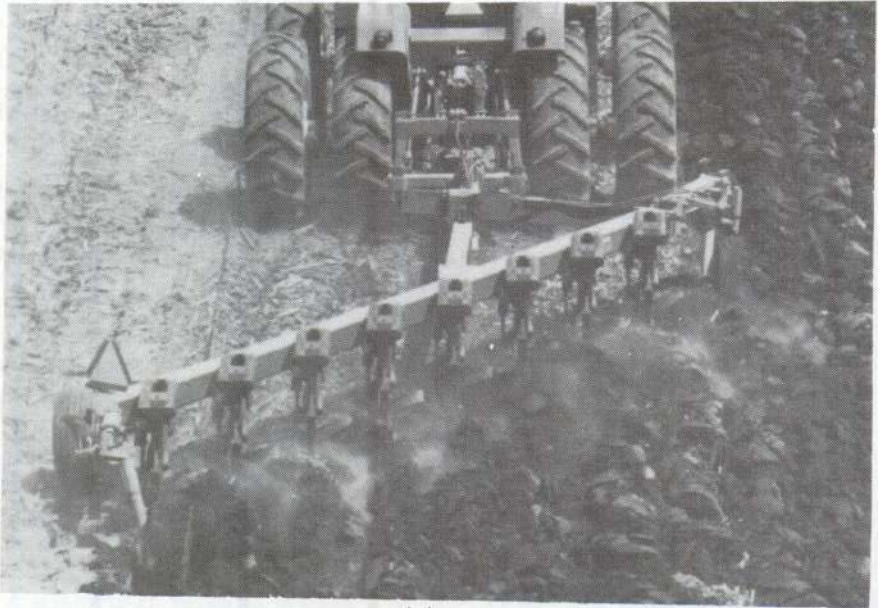


Fig. 200. Acople de un arado de cuatro discos visto desde la parte trasera del tractor.

Existe mucha ventaja al hacer trabajar el tractor sobre un terreno no arado y fuera del surco, puesto que evita la compactación en el fondo de éste y hace factible utilizar llantas más anchas o dobles para apoyar la tracción más elevada requerida. Desafortunadamente esto dicta que la dirección del tractor requiere más concentración por parte del operador, sobre lo que Hilton y Chestney¹¹ han desarrollado un apoyo automático, ilustrado en la Fig. 201.



(a)



(b)

Fig. 201. Dos aspectos del trabajo con un arado ancho fuera del surco. (a) Sistema de control automático para la dirección del tractor, al trabajar fuera del surco (NIAE, Silsoe, Bedford, RU). (b) Arado ancho con una rueda de guía, para resistir la fuerza lateral. El tractor está equipado con llantas dobles para mejorar la tracción y reducir la compactación (*John Deere* – Ponce Yepes, Quito).

8.5.2 Ajuste de la rastra excéntrica de disco

La fuerza de arrastre de la rastra excéntrica de disco está desplazada a una distancia 'a' de la línea central del tractor, lo que causa un momento $F_x a$ que debe ser compensado por las fuerzas laterales en los cuerpos de la rastra (Fig. 202). Estas fuerzas laterales F_{zf} y F_{zr} deben igualarse por el ajuste de nivelación de la rastra en trabajo, para prevenir desplazamientos fuera de la línea de trabajo de la herramienta. Asimismo, se debe igualar los momentos $F_x a$ y $F_z b$ para prevenir un efecto adverso en la maniobrabilidad del tractor; normalmente se ajusta los ángulos de los cuerpos a la distancia 'b' entre ellos, en el caso de la rastra de acople integral, pero es más fácil cambiar el ángulo de la barra de tiro y de esta manera la distancia 'a' en el caso de la rastra de tiro o semi-integral.

8.5.3 Las fuerzas laterales en otro equipo excéntrico

El equipo excéntrico de acople integral, como segadoras, rastriillos, cosechadoras de forraje y otras, tiene un efecto inevitable en la maniobrabilidad del tractor, como se demuestra en la Fig. 203. Las fuerzas laterales en las llantas traseras y delanteras del tractor son iguales, de tal forma que:

$$F_x a = Y x$$

$$Y = F_x \frac{a}{w} \quad (8)$$

En cambio el equipo de tiro normalmente tiene un efecto mucho menor en la maniobrabilidad como se ilustra en la Fig. 204. La fuerza de arrastre F_x que es desplazada causa una fuerza lateral en las llantas de la herramienta F_y .

Los momentos por el punto de intersección de la línea central del tractor y el eje de la herramienta dan:

$$F_x a = F_y l \quad (9)$$

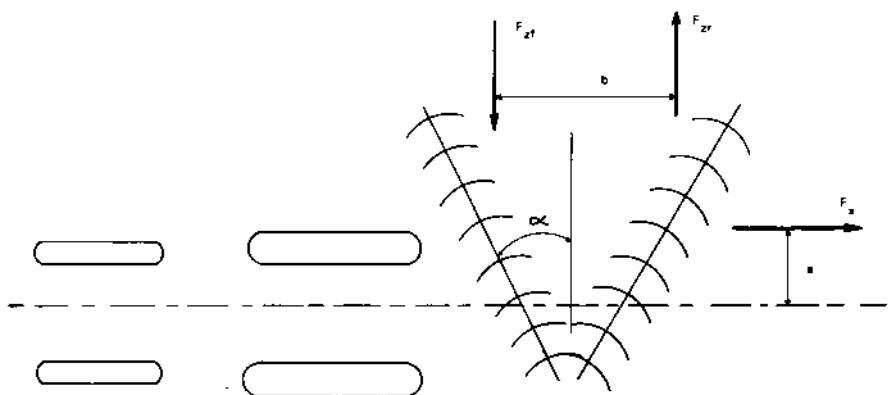


Fig. 202. Fuerzas que actúan en la rastra de disco excéntrico (tipo *offset*).

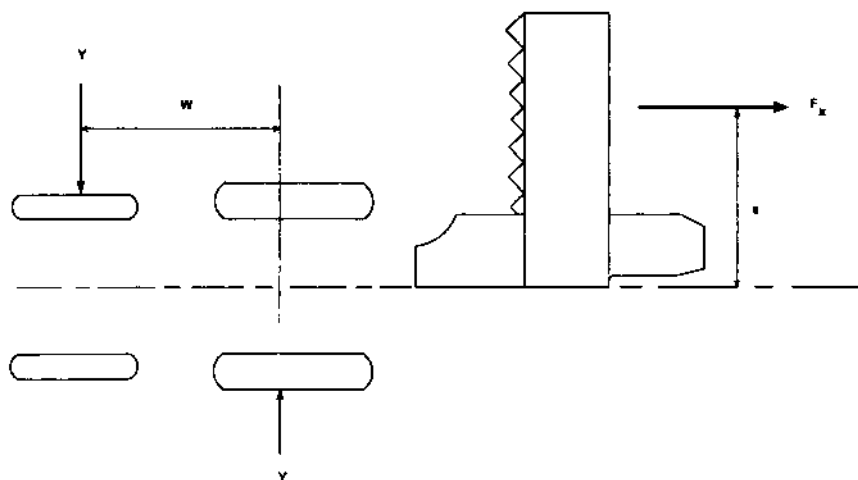


Fig. 203. Fuerzas que actúan para el equipo integral excéntrico de acople, atrás del tractor (por ejemplo, una cosechadora de forraje).

Los momentos por el eje posterior del tractor dan:

$$Y_f = F_y \frac{e}{w}$$

$$Y_f = F_x \frac{a}{l} \cdot \frac{e}{w} \quad (10)$$

Se nota en la Fig. 204 que normalmente la distancia 'e' es mucho menor que 'l'; entonces la fuerza Y_f que afecta la maniobrabilidad del tractor es mucho menor que en el caso anterior (Ecuación 8), para el equipo de acople integral.

El equilibrio lateral de las fuerzas del tractor da la fuerza lateral Y_r de la llanta trasera:

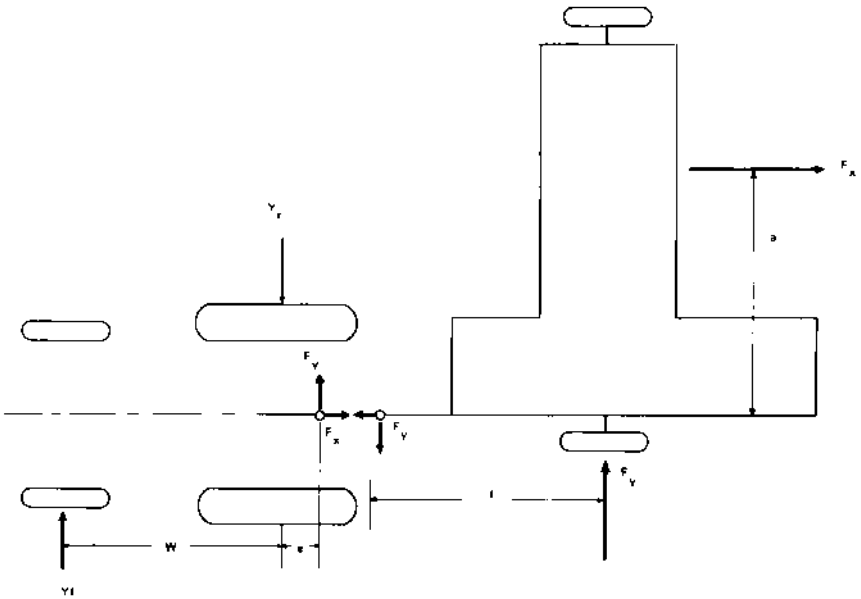


Fig. 204. Fuerzas producidas por una herramienta de tiro desplazada lateralmente (por ejemplo un empaquetador o cosechador de forraje).

$$Y_r = F_y + Y_f$$

$$Y_r = F_x \frac{a}{l} \left(1 + \frac{e}{w} \right) \quad (11)$$

En las dos situaciones las dificultades en la dirección dependen de la magnitud de la fuerza de arrastre F_x y el arreglo geométrico, como se muestra en las Ecuaciones 8 y 10.

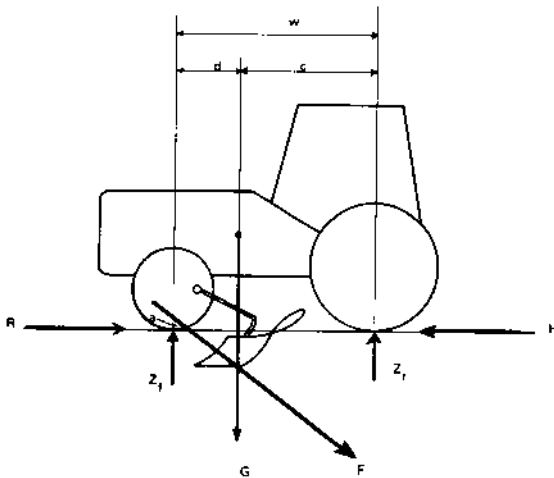


Fig. 205. Acople central de una herramienta.

8.6 ACOPLE DELANTERO O CENTRAL DE LAS HERRAMIENTAS

La ventaja de acoplar equipo hacia delante o centralmente es que permite un control visual más conveniente, así como acoplar equipo adicional trasero (Fig. 208); en cambio su uso con herramientas de labranza presenta algunas desventajas: en primer lugar, al pasar las llantas del tractor por encima del suelo recién cultivado se puede dañar la labor hecha; en segundo lugar, es bastante ineficaz generar tracción en este suelo suelto. Finalmente, puede ocurrir algunos efectos adversos en la maniobrabilidad: como resultado normalmente el uso de un acople delantero o central está restringido a los trabajos livianos efectuados entre los surcos o para operaciones que no son de labranza (aspersores, otros).

8.6.1 Acople central de los equipos

La Fig. 205 presenta una herramienta de labranza acoplada centralmente.

El equilibrio de las fuerzas verticales da:

$$Z_r + Z_f = G + F \operatorname{sen} \theta$$

Los momentos por el punto de contacto de las llantas delanteras dan:

$$Z_r w = G d + F a$$

$$Z_r = G \lambda_d + F \lambda_a \quad (12)$$

$$Z_f + Z_r = G + F \operatorname{sen} \theta$$

entonces: $Z_f = G \left(1 - \frac{d}{w}\right) - F \frac{a}{w} + F \operatorname{sen} \theta$

$$Z_f = G \lambda_c - F \lambda_a + F \operatorname{sen} \theta \quad (13)$$

Estas ecuaciones demuestran que ocurre una pequeña transferencia de peso $F \lambda_a$ hacia las llantas traseras, pero ninguna adición de peso.

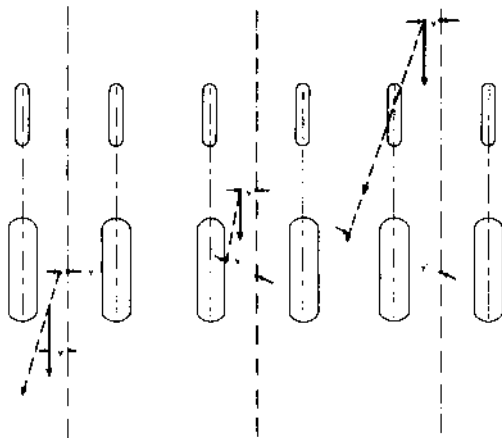


Fig. 206. Efecto de las fuerzas para el equipo de acople posterior, central y delantero sobre la dirección del tractor.



Fig. 207. Acople delantero de una herramienta (F.A. Standen and Sons Ltd, Ely, Cambs, Inglaterra).

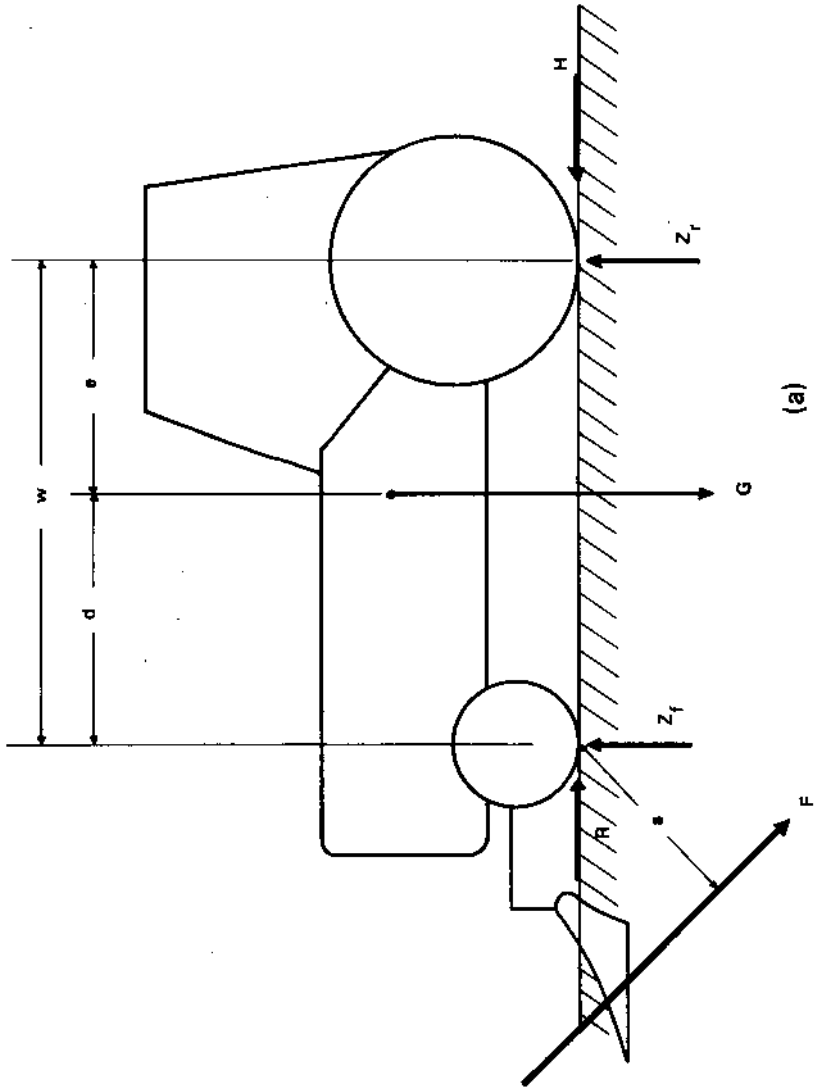




Fig. 207. Acople delantero de una herramienta (F.A. Standen and Sons Ltd, Ely, Cambs, Inglaterra).

También ocurre un momento F_x y que afecta la dirección del tractor debido a la fuerza de arrastre F desplazada a una distancia 'y' de la línea central del tractor (Fig. 206). Normalmente el equipo de labranza con acople trasero o central no tiene restricción lateral (véase numeral 7.5.2) y entonces se desplaza lateralmente para reducir este efecto adverso. Pero en el caso de que tal desplazamiento no pueda ocurrir y el tractor fuera tirado fuera de la línea por el equipo de acople trasero, el momento disminuye rápidamente a un valor $F_x y'$ para los equipos de acople central o delantero y así presenta una situación peor e inestable.

Normalmente es necesario restringir el movimiento lateral del equipo de acople posterior para mantenerlo en su dirección de trabajo y se ve que las herramientas con una fuerza de arrastre elevada presentan problemas serios de maniobrabilidad.

8.6.2 Equipo de acople delantero

La Fig. 207 muestra la situación de las fuerzas para el equipo de acople delantero.

El equilibrio de las fuerzas verticales da:

$$Z_f + Z_r = G + F \text{ sen } \theta$$

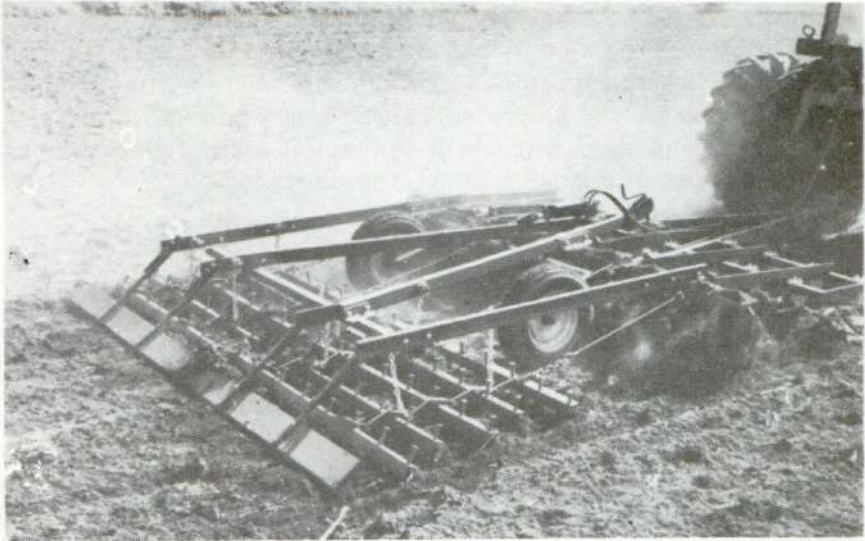
Los momentos por el punto de contacto de la llanta delantera dan:

$$Z_r w = G d - F a$$

$$Z_r = G \lambda_d - F \lambda_a \quad (14)$$

$$Z_f = G \lambda_c + F \lambda_a + F \text{ sen } \theta \quad (15)$$

Estas ecuaciones demuestran una transferencia de peso negativa de $F \lambda_a$ de las llantas traseras hacia las llantas delanteras, lo que significa otra desventaja al acoplar adelante el equipo con una fuerza de arrastre alta; esta transferencia negativa determina que no hay ventaja alguna en soportar la herramienta con un sistema complicado



(a) El uso de varios tipos de dientes en un solo paso con esta herramienta múltiple permite preparar una cama de semilla fina (*John Deere* – Ponce Yepes, Quito).



(b) Puente diseñado para permitir la combinación de varias labores con herramientas convencionales. Trabajan un cultivador de dientes y una sembradora (NIAE, Silsoe, Bedford, Inglaterra).

Fig. 209. Dos posibilidades de un acople múltiple de equipo atrás del tractor.

de control hidráulico que da, por ejemplo, fuerza controlada. Normalmente se le provee con un sistema de posición controlada simple y la herramienta es soportada sobre unas ruedas de profundidad, las mismas que tienen el efecto de reducir esta transferencia de peso negativa. La Fig. 208 ofrece una aplicación multipropósito típica para alcanzar varias operaciones en un solo paso⁵.

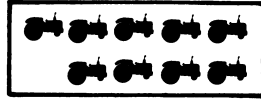
8.7 ACOPLER MULTIPLE

La posibilidad de acoplar equipo hacia adelante o centralmente permite cumplir varias operaciones en un solo paso, como se demostró en la Fig. 208. Otra situación se da al diseñar un acople múltiple, como el puente de la Fig. 209, que permite acoplar dos herramientas atrás del tractor, cumpliendo con ello varias labores en un solo paso⁸.

BIBLIOGRAFIA

1. ANIANSON, G. Drivkarror. Memo No. 243, Uppsala, Sweden, Swedish Inst. of Agric. Engg., 1952. 96 p.
2. BERNACKI, H., HAMAN, J., KANAFOJSKI, Cz. Agricultural machines, theory and construction. Vol. 1 (1967); English translation, Washington, USA, USDA, 1972. 883 p.
3. BLIGHT, D.P. Power driven trailers. J. and Proc. of I. Ag. Engrs. 20(1):16-23. 1964.
4. DWYER, M.J. The braking performance of the tractor-trailer combination. J. Ag. Engg. Res. 15(2):148-162. 1970.
5. GEGO, A. Basic considerations and experiences with the Intrac-system 2 000. The Agric. Engr. 29(3):67-73. 1974.
6. GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook No. 316, Washington, USA, USDA, 1967. 511 p.
7. GRIEG, I. Power brakes for trailer safety. London, Power Farming. 55(5):27-29. 1976; 55(6):65-67. 1976.
8. _____. Bridge that gap — linked implements save time. London, Power Farming. 55(8):40-41. 1976.
9. HENDRICK, J.G. Utilizing rotary tillers with higher horsepower tractors. Paper No. 710682, Society of Automotive Engrs., 1971. 12 p.
10. _____, GILL, W.R. Rotary tiller design parameters, Parts 1-4. Trans. ASAE. 14(4):669-683. 1971; 17(1):4-7. 1974.
11. HILTON, D.J., CHESTNEY, A.A.W. Low cost steering devices for out-of-furrow ploughing. The Agric. Engr. 28(3):102-106. 1973.

12. KANAFOJSKI, Cz., KARWOWSKI, T. Agricultural machines, theory and construction. Vol. 2 (1972); English translation, Washington, USA, USDA, 1976. 1047 p.
13. KOFOED, Ss. Investigations on the performance of the pt-o driven tractor vehicle. Yearbook of the Royal Veterinary and Agricultural College, Copenhagen, Denmark, 1958. pp. 1-25.
14. LONG, M.E. Weight transfer for trailing implements. *Implement and Tractor*. 82(23):22-25. 1967.
15. SAGE, R., RACOTCH, A., WOLF, D. Theoretical considerations in placing the centre of gravity of single-axled trailers. *J. Ag. Engg. Res.* 18(2):159-165. 1973.
16. WIENKE, F. The mathematical determination of the running characteristics of a power driven trailer. *Landtech. Forshung* 5(1):26-29, 1955. English translation, *J. Ag. Engg. Res.* 1(1):101-105. 1956.



LA TEORÍA DE TRACCIÓN Y LOS SISTEMAS DE RODAJE

9.1 LA TRACCIÓN DESARROLLADA BAJO LOS NEUMÁTICOS Y LAS ORUGAS

9.1.1 Generalidades

La teoría de mecánica de suelos ha mostrado (ver Capítulo 1) que la relación entre el esfuerzo máximo de corte τ y el esfuerzo normal σ , está determinada por la ecuación de Coulomb (Fig. 210):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

donde: τ = esfuerzo máximo de corte

σ = esfuerzo normal sobre la superficie

c = cohesión

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo

Normalmente los suelos agrícolas presentan propiedades cohesivas y friccionales; sin embargo, existen suelos que sólo poseen propiedades friccionales, como es el caso de los arenosos, o sólo cohesivas, como es el caso de los suelos arcillosos. Partiendo de esta base

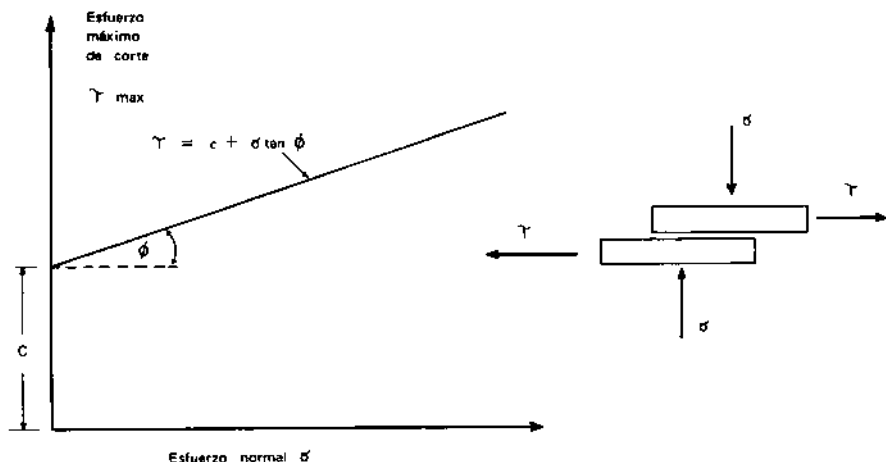


Fig. 210. Comportamiento de un suelo durante falla en cizalla según la ecuación de Coulomb.

Micklethwaite²⁰ desarrolló en 1944 una teoría simplificada que puede ser utilizada como una aproximación de primer orden y que se indica a continuación.

9.1.2 Tracción de una oruga

Considérese una oruga (Fig. 211) cuya superficie total de contacto con el suelo se denomina A , y en la cual el área de contacto de las barras de tracción con el suelo es A_b . Se puede ver entonces que el área de corte será $(A - A_b)$, de modo que el esfuerzo de corte y el esfuerzo normal pueden derivarse de la manera siguiente:

$$\text{Esfuerzo máximo de corte} \quad \tau = \frac{H}{A - A_b}$$

$$\text{Esfuerzo normal} \quad \sigma = \frac{Q}{A - A_b}$$

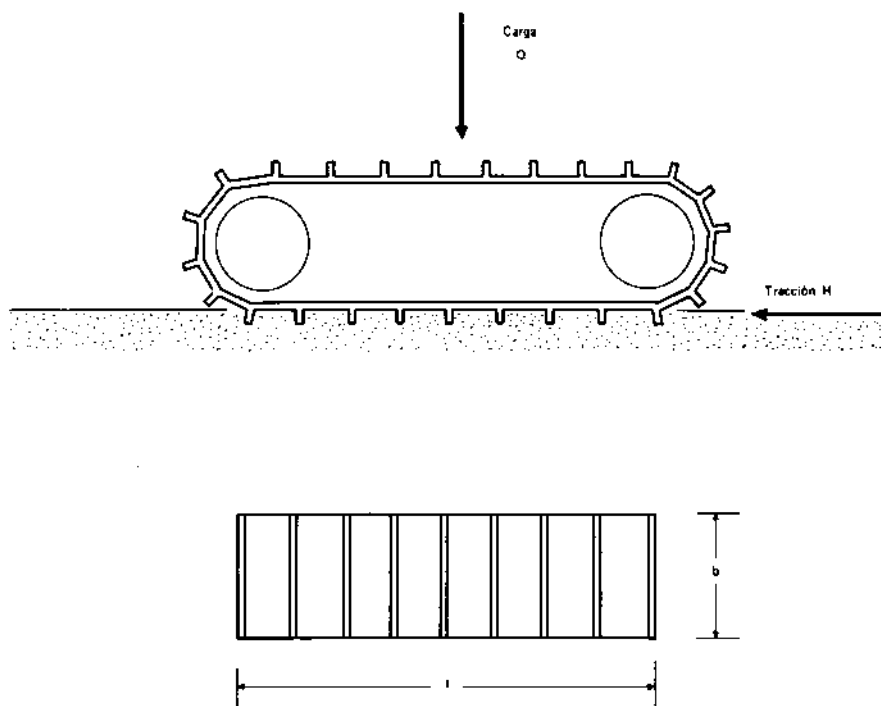


Fig. 211. Desarrollo de tracción en una oruga: área total de contacto $A=bl$; área de las barras en contacto $=A_b$.

Ahora bien, si se incorpora los valores derivados a la ecuación de Coulomb, se calcula el valor máximo de tracción, o sea H máximo.

$$H_{\max} = c(A - A_b) + Q \tan \phi \quad (1)$$

Ya que el área A_b es usualmente pequeña, comparada con el área total de contacto A , conviene, en el caso de los tractores de oruga, simplificar la ecuación de la manera que sigue:

$$H_{\max} = c A + Q \tan \phi \quad (2)$$

Además de lo arriba destacado conviene utilizar la ecuación simplificada ya que no se ha tomado en cuenta los efectos (aunque sea limitados) ocasionados por los costados de la oruga.

Haciendo comparaciones entre tipos distintos de oruga y condiciones de suelos conviene más calcular la relación por H/Q , de lo cual se deriva lo que se conoce como el **Coefficiente de Tracción**, o sea μ . Ahora bien, de la ecuación (2) se deriva:

$$\mu_{\max} = \frac{H_{\max}}{Q} = \left(\frac{cA}{Q} + \tan \phi \right) \quad (3)$$

Se debe notar que no es posible en la práctica alcanzar estos valores máximos de tracción y del coeficiente de tracción por depender ellos de una deformación considerable en el corte del suelo (véase Figs. 1-4); ni con un patinaje del 100 % se los puede alcanzar pero su valor sirve para definir la **Relación de Tracción** α :

$$\alpha = \frac{H}{H_{\max}}$$

la que indica la relación de la tracción actual con la máxima teórica para ciertas condiciones de patinaje (véase 9.1.3).

9.1.3 Tracción de un neumático

En el caso de los neumáticos, la teoría de tracción es equivalente aun cuando no se puede omitir el área de las barras de tracción A_b , la que se ignora en el caso de la oruga (Fig. 212). Se observa que la superficie de contacto se aproxima a una forma elíptica, de modo que $A \cong 0.78b_l$ aproximadamente, de lo cual se derivan:

La fuerza máxima de tracción H

$$H_{\max} = c (A - A_b) + Q \tan \phi \quad (4)$$

Además el coeficiente de tracción μ

$$\mu_{\max} = \frac{c(A - A_b)}{Q} + \tan \phi \quad (5)$$

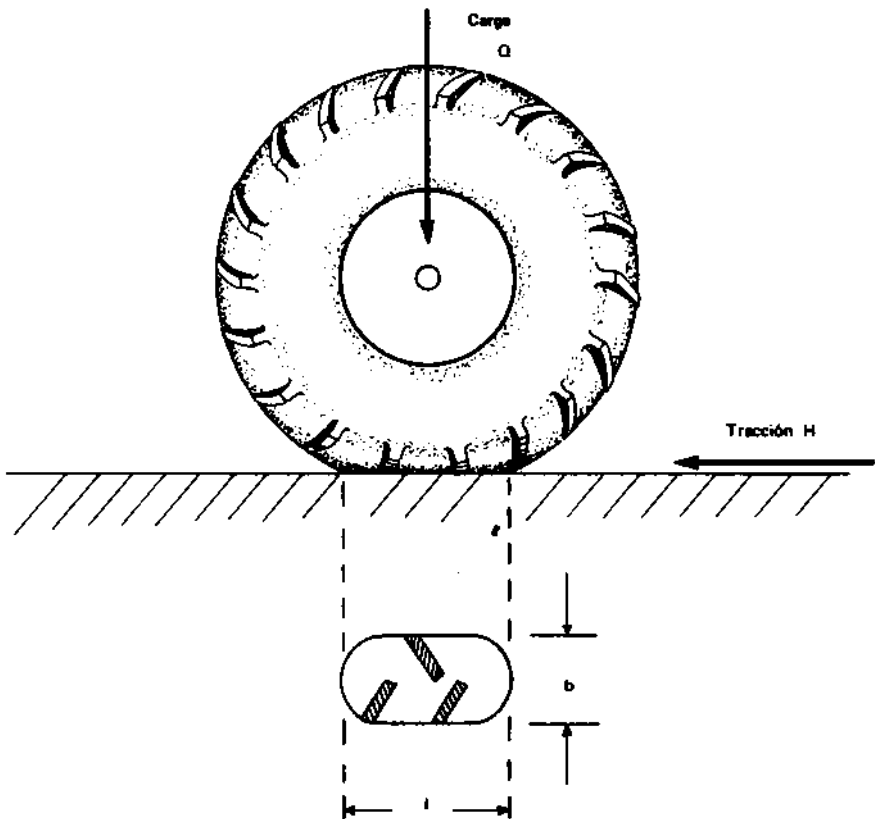


Fig. 212. Desarrollo de tracción en un neumático: área total de contacto $A \simeq 0.78bl$; área de las barras en contacto $= A_b$.

Por ejemplo:

Un tractor está operando en un terreno con suelo que presenta valores de $\phi = 20^\circ$ y $c = 10 \text{ kN/m}^2$. La carga sobre un neumático es 8 kN, el área total de contacto equivale a 1 100 cm^2 , y el área de contacto de las barras de tracción con el suelo equivale a 200 cm^2 . ¿Qué valor tendría el coeficiente de tracción máxima?

De la ecuación (5):

$$\begin{aligned}\mu_{\max} &= 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \frac{(1\,100 - 200) \text{ cm}^2}{8 \text{ kN}} \left[\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right]^2 + \tan 20^\circ \\ &= 0.11 + 0.36\end{aligned}$$

$$\mu_{\max} = 0.47$$

De igual manera que en el numeral 9.3.2, estos valores representan niveles teóricos no alcanzables en la práctica. La predicción no es precisa pero sirve como una base para entender los factores importantes en la evaluación de las características de tracción.

9.2 LA RESISTENCIA AL RODADO

9.2.1 Generalidades

En el caso de las fuerzas que actúan sobre una rueda de tracción, tal como se muestra en la Fig. 213, la deformación o alteración del suelo hace que sus fuerzas produzcan otra fuerza resultante del apoyo, la que pasando por el eje de la rueda se desplaza hacia adelante. Esta fuerza puede ser reemplazada por las fuerzas Z (Fig. 213) y R, tal como se ha demostrado.

La relación entre el tamaño de la rueda, las dimensiones con respecto al suelo y las fuerzas, pueden calcularse de la manera siguiente:

$$\frac{R}{Z} = \frac{k}{r_s}$$

En cambio, se ha observado que en condiciones de equilibrio, $Z = Q$, de modo que:

$$\frac{k}{r_s} = \frac{R}{Q} = \psi \quad (6)$$

pues, ψ se conoce como El Coeficiente de la Resistencia al Rodado.

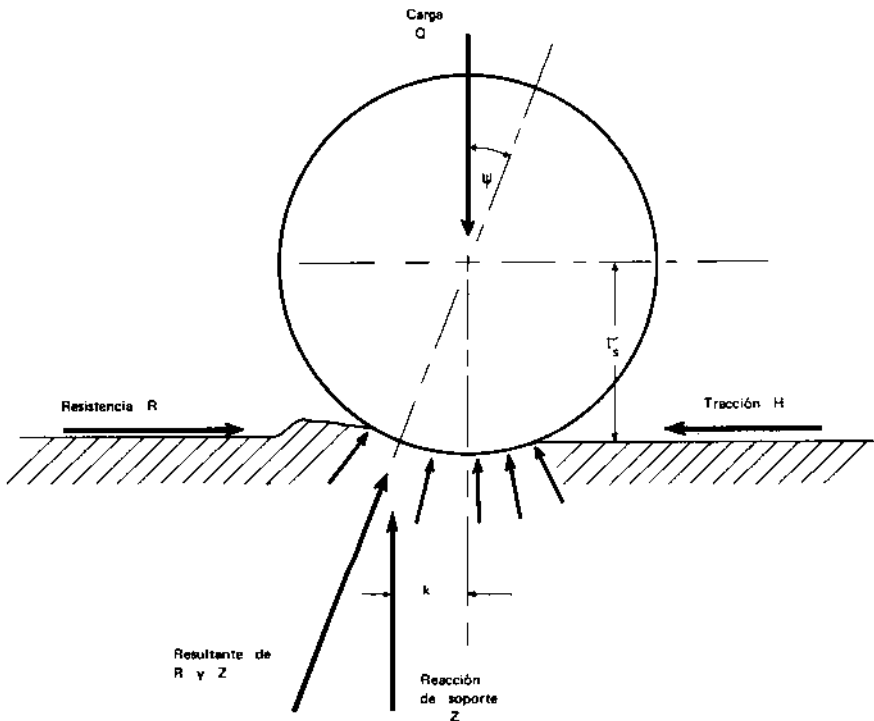


Fig. 213. Disposición de las fuerzas debido a la resistencia al rodado R, la reacción de soporte Z y la carga Q. Se nota un desplazamiento k hacia adelante de la fuerza Z.

De la misma forma que se utiliza el coeficiente μ para comparar las propiedades de tracción de distintos neumáticos y suelos, es posible hacer uso del coeficiente de resistencia al rodado ψ .

Existen varios métodos para calcular la resistencia al rodado, la que depende de las propiedades del suelo y la geometría de la oruga o neumático^{8,16}. La Fig. 217 ofrece un método gráfico para estimar el valor de ψ . También se puede utilizar la fórmula siguiente:

$$\psi = \frac{R}{Q} = \left(\frac{1.2}{C_n} + 0.04 \right) \quad (7)$$

en donde C_n representa una relación sin dimensiones que depende de la medición del Índice del Cono (CI) del suelo⁶ (véase la Sección 1.5.3), el ancho (b_c) y el diámetro (d_c) del neumático sin carga (Fig. 225) y la carga normal sobre la llanta Q :

$$C_n = \frac{CI \times b_c \times d_c}{Q} \quad (8)$$

Algunos valores típicos de C_n para una llanta cargada en forma común y para las diferentes superficies son los siguientes³:

$C_n =$	50	Suelos duros
	30	Suelos firmes
	20	Suelos labrados
	15	Suelos blandos y arenosos

Estos valores deben aplicarse solamente para los suelos que no sufren mucha compactación. Las llantas deben tener una presión que produzca una deflexión (δ) de aproximadamente 20 % de la altura de la sección (h) y sus dimensiones típicas dan una relación ancho de la sección (b_c) al diámetro de la llanta (d_c) de 0.3, y una relación del radio estático de rodado r_s al diámetro de la llanta (d_c) aproximadamente de 0.475 (Fig. 225).

En todos los demás casos se deberá calcular el valor C_n en forma independiente de la ecuación (8).

Por ejemplo:

Estimar el coeficiente ψ y la resistencia al rodado para un tractor con peso total (G_t) de 50 kN al trabajar en un campo con suelo firme que no sufre mucha compactación.

Estimar $C_n = 30$ para suelos firmes

$$\psi = \left(\frac{1.2}{30} + 0.04 \right) \quad (\text{Ecu.7})$$

$$\underline{\psi = 0.08}$$

$$R = Q = G_t \quad \text{en este caso}$$

$$\text{Entonces } \underline{R} = 0.08 \times 50 \text{ kN} = \underline{4 \text{ kN}}$$

9.2.2 Valores del desplazamiento k

Considerando la aplicación de la ecuación (7) en el caso de la Fig. 214, sólo hace falta calcular lo siguiente:

$$k_r = \psi_r \times r_{sr} \quad \text{para las ruedas de tracción}$$

$$k_f = \psi_f \times r_{sf} \quad \text{para las ruedas delanteras}$$

En cambio, una relación promedio entre los radios estáticos de las ruedas delanteras y traseras se calcula por:

$$r_{sf} \simeq 0.55 r_{sr}$$

$$\text{de los cuales: } k_f \simeq 0.55 \psi_f \times r_{sr}$$

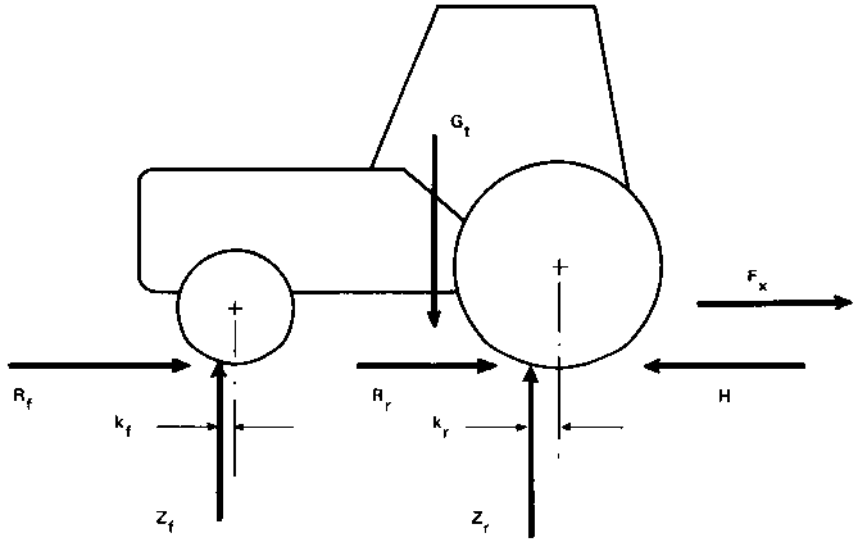


Fig. 214. Disposición de las fuerzas en el tractor debido a la resistencia al rodado en las ruedas delanteras y traseras (Nota $k_f < k_r$).

Resulta más conveniente calcular un valor promedio de k de la manera siguiente (ver Fig. 215):

$$k \cong k_r \cong k_f$$

lo cual significa un valor promedio de k de:

$$k \cong 0.8 \psi r_{sr}$$

Al saber el coeficiente de tracción que le corresponde al tractor en un suelo dado, se recurre a las ecuaciones (6) y (9), las que permiten analizar las fuerzas indicadas en la Fig. 215. Se verá que las fuerzas R_f y R_r son reemplazadas por R , o sea la resistencia al rodado del tractor.

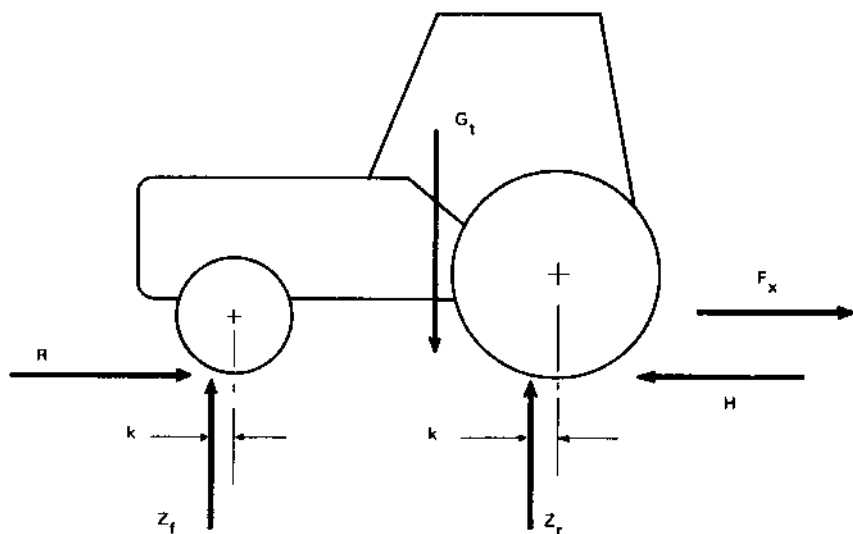


Fig. 215. Simplificación en la disposición de las fuerzas (Fig. 214) debido a la resistencia al rodado y de soporte de las ruedas.

Nota: $k_f < k < k_r$

$$R = R_f + R_r$$

9.2.3 Comparación entre ruedas metálicas y ruedas con neumáticos

Una manera de representar los efectos ocasionados por la resistencia al rodado consiste en calcular la potencia requerida para superarla, o sea la pérdida de potencia, mientras el tractor avanza por una superficie dada. Comparando los neumáticos con las ruedas metálicas armadas de puntas se comprueba que el neumático lleva entre otras la ventaja de producir un menor grado de resistencia al rodado; dicha reducción es el factor principal del mayor rendimiento de los neumáticos. Tal rendimiento superior se ilustra claramente en la Fig. 216, la que además destaca los efectos producidos por los aumentos de velocidad.

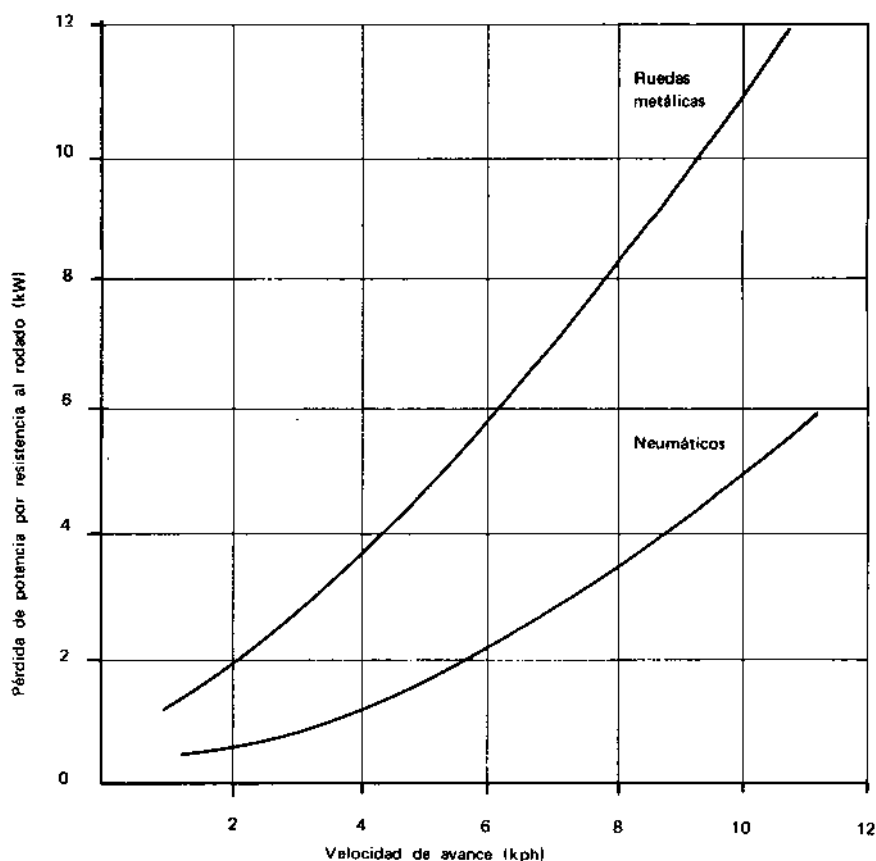


Fig. 216. Una comparación del comportamiento de ruedas metálicas y neumáticos. Los valores dependen de las condiciones de campo y el peso del tractor, pero se nota la ventaja del uso de neumáticos^{3.3}

La Fig. 216 muestra también que las curvas tienden a una recta, lo que constata que la resistencia al rodado permanece aproximadamente constante con los cambios de velocidad y que concuerda con la teoría anteriormente desarrollada.

9.2.4 Influencia del diámetro y el ancho de los neumáticos

En la Fig. 217 se presenta los resultados de pruebas realizadas con 16 neumáticos distintos en condiciones diferentes de suelo; se destaca en cada caso que mientras más grande sea el diámetro mejor será la reducción del coeficiente de resistencia al rodado.

Puesto que el valor del coeficiente debe depender del grado de penetración del neumático, se puede esperar que los resultados anteriormente contemplados se repitan en lo que se refiere al valor del coeficiente relacionado a incrementos del ancho del neumático. No obstante, hay otro factor que interviene en este caso, ya que los incrementos del ancho obligan al neumático a alterar un volumen progresivamente más grande del suelo, lo cual hace que se complique aún más la relación. Sin embargo, se constata que mientras más ancho sea el neumático mayor será la resistencia al rodado, suponiendo desde luego que el área de contacto permanezca constante, es decir que el ancho aumente cuando el diámetro se reduzca y viceversa.

Finalmente, al considerar que la mayoría de los suelos agrícolas tiene propiedades cohesivas se puede esperar un aumento de la tracción a causa de una mayor área de contacto (véase Cuadro No. 11). Por esta razón la tendencia después de 1960 es utilizar llantas más anchas, que también crean menores problemas de compactación (ver Sección 9.4.3).

9.3 EL PATINAJE Y LA TRACCION

9.3.1 Generalidades

Técnicamente el patinaje se define como la reducción de la distancia recorrida, expresada como porcentaje. La ineficiencia producida por este comportamiento se manifiesta claramente por el patinaje excesivo y visible de las ruedas de mando (Fig. 218). Desafortunadamente, esta ineficiencia nunca puede ser eliminada en totalidad.

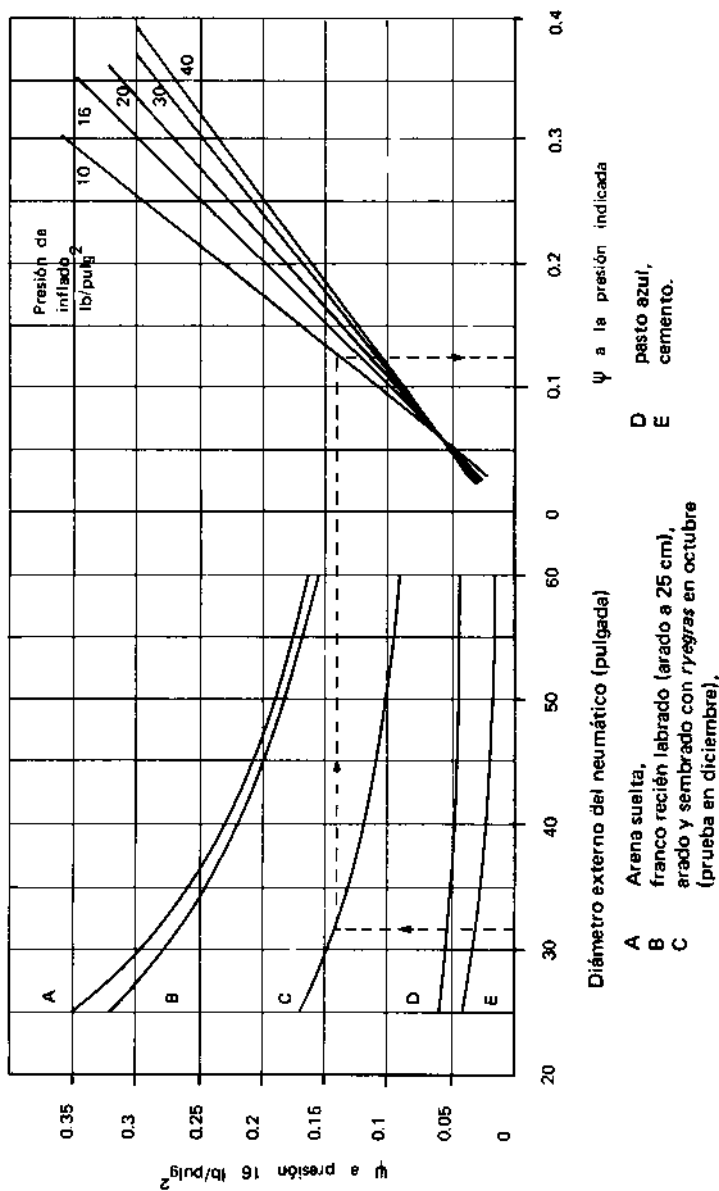


Fig. 217. Efecto del diámetro y presión de inflado de los neumáticos, indicando un método de estimación del coeficiente de la resistencia al rodado (ψ). Ejemplo: un neumático de diámetro externo de 32 pulgadas tiene $\psi = 0.14$ con una presión de inflado de 16 lb/pulg² y $\psi = 0.125$ con una presión de 10 lb/pulg². (Bibliografía complementaria: McKibben, E.G. Hull D.O. Agric Engg June 1940 and McKibben E.G. Davidson J.B. Agric Engg Feb. 1940. In: ASAE. *Machinery management data D 230.2* ASAE Yearbook 1973. p. 318).

El patinaje de las ruedas de mando constituye un inconveniente ya que hace disminuir la velocidad de avance del tractor, con lo que se reduce la potencia efectiva en la barra de tiro, además de que aumenta el plazo requerido para terminar el trabajo, ya que se reduce la eficiencia de la unidad y se acelera el desgaste de los neumáticos de las ruedas de mando.

9.3.2 Determinación del porcentaje de patinaje

El patinaje (s) puede ser expresado como:

$$\text{Patinaje} = \frac{(\text{Pérdida de distancia recorrida})}{(\text{Distancia teórica recorrida por la rueda})}$$

$$\text{Patinaje} = \frac{(\text{Distancia recorrida sin patinaje} - \text{distancia recorrida con patinaje})}{(\text{Distancia recorrida sin patinaje})}$$

$$\text{Entonces } s = \frac{d_n - d}{d_n} = \left(1 - \frac{d}{d_n}\right) \quad (10)$$

$$s = \frac{v_n - v}{v_n} = \left(1 - \frac{v}{v_n}\right) \quad (11)$$

En donde d y v son la distancia recorrida y la velocidad con patinaje, y d_n y v_n son los valores respectivos teóricos, sin patinaje.

Por esta razón en la determinación del patinaje el primer paso consiste en medir la distancia recorrida por un tractor sin que ocurra el patinaje. Los efectos ocasionados por la resistencia al rodado se eliminan de la manera siguiente: primero se mide la distancia que recorre el tractor no cargado a través de un número predeterminado de vueltas en una superficie dura; esta distancia recorrida se llamara d_1 . Segundo, el tractor se remolca en neutral hasta que las ruedas de mando hayan dado el mismo número de vueltas; esta última distancia recorrida se llamará d_2 . Ahora bien, la distancia teórica recorrida sin patinaje, d_n para ese número de vueltas de las ruedas de mando será el promedio de los recorridos d_1 y d_2 , o sea:

$$d_n = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



(b) Patinaje excesivo en 30 %, debido a insuficiente contrapeso en el tractor o demasiada fuerza de arrastre durante el trabajo normal.



(a) Patinaje insuficiente en 3 % debido a demasiado contrapeso o a trabajo muy liviano.



(c) Patinaje óptimo entre 12 % a 15 % durante trabajo normal, debido a la selección correcta de contrapesos en el tractor.

Fig. 218. Reconocimiento del patinaje de las huellas que permite juzgar el contrapeso necesario en el tractor durante el trabajo normal.

Hace falta, entonces, que se mida la distancia recorrida por el tractor que patina, o sea la distancia d . Con el tractor realizando un trabajo se calcula d con base en el mismo número de vueltas de la rueda de mando. El porcentaje de patinaje equivaldrá así a:

$$\% \text{ de patinaje} = s(\%) = \left(1 - \frac{d}{d_n}\right) 100$$

Cuando se desarrolla la tracción un efecto inevitable es una cierta cantidad de patinaje, pero éste puede ser disminuido por ciertas acciones; la Fig. 219 es un gráfico que muestra la disminución del patinaje al aumentar el peso sobre los neumáticos.

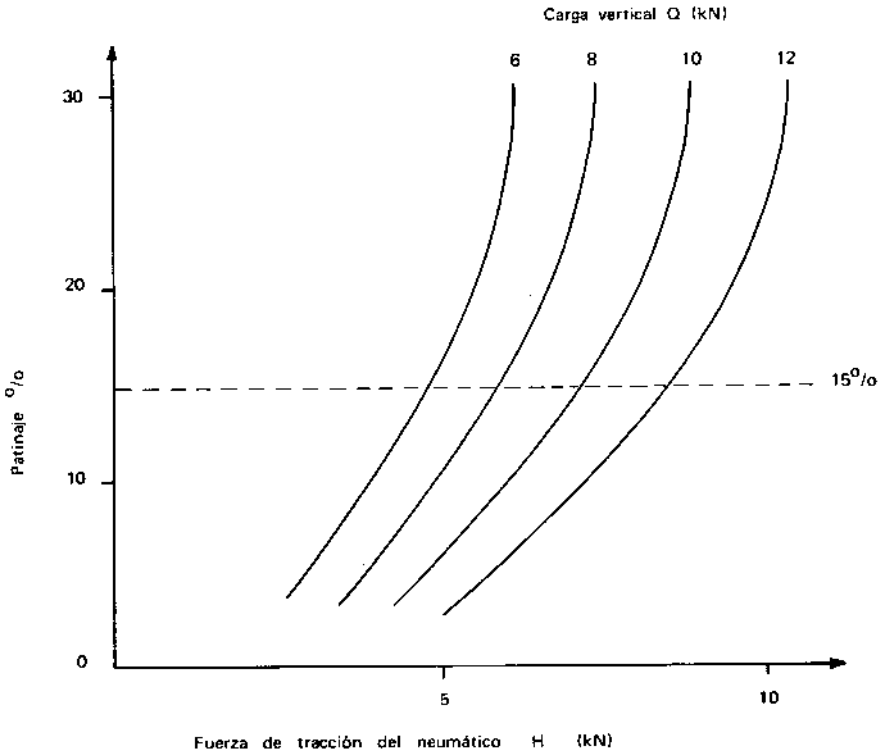


Fig. 219. Relación típica entre el porcentaje de patinaje y la fuerza de tracción H , desarrollada en un neumático para un rango de cargas verticales Q , en un suelo con propiedades friccionales (por ejemplo arenoso o arcilloso seco, otros).

Generalmente es muy poco el aumento de fuerza en la barra de tiro con más de 15 % de patinaje, y la potencia perdida en la barra de tiro es tan alta que se hace inaceptable para un trabajo útil. Se aprecia que es posible aumentar la fuerza F incrementando el peso sobre las ruedas de mando y manteniendo el patinaje a un nivel aceptable; esto se basa en la teoría de tracción ya elaborada. Otro uso del coeficiente de tracción μ es la posibilidad de reemplazar la familia de curvas de la Fig. 219 por una curva única de este coeficiente con respecto a un suelo específico, como se ve en la Fig. 220.

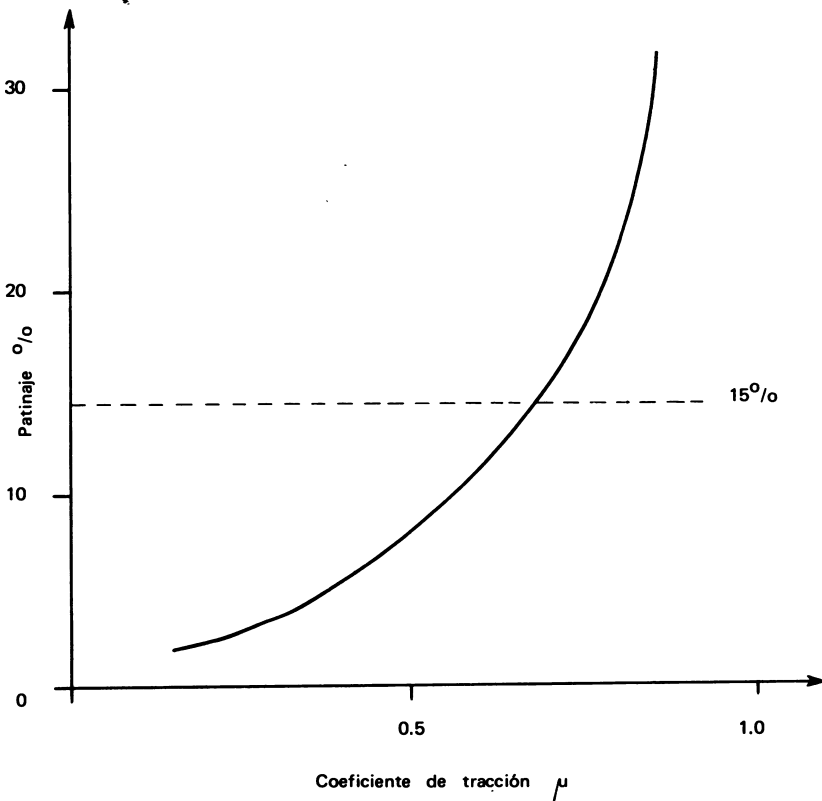


Fig. 220. Relación típica entre el porcentaje de patinaje y el coeficiente de tracción $\mu = H/Q$. Véase también Fig. 219 para un método alternativo de presentación de los resultados.

9.3.3 Efecto de la presión de inflado del neumático en la tracción

Se puede mejorar la tracción en suelos con cohesión aumentando el área de contacto del neumático con el suelo, lo que se logra reduciendo la presión de inflado del neumático; esto también involucra una disminución de la penetración del mismo, provocando una reducción de la resistencia al rodado (Figs. 217 y 221). Lo último sucederá solamente cuando la penetración sea un problema, por

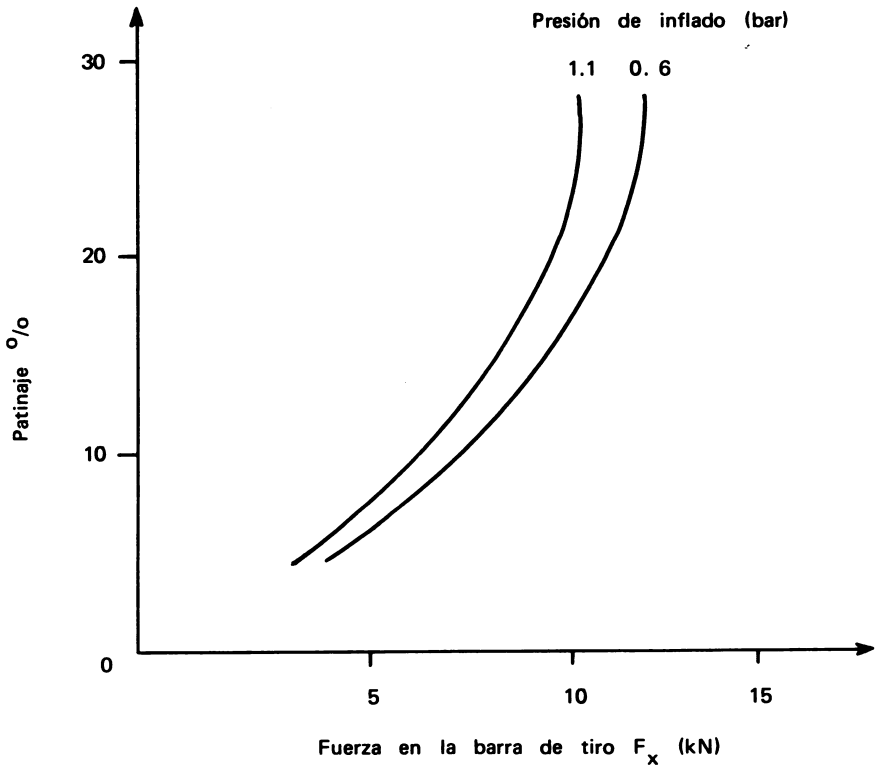


Fig. 221. Efecto de la presión de inflado sobre la fuerza en la barra de tiro, en un suelo suelto. Una reducción en la presión disminuye la resistencia al rodado, aumenta la superficie de contacto y la fuerza en la barra de tiro (adaptado de SAE Trans. Jan. 1938).

ejemplo en los suelos sueltos, pero en el caso de las superficies duras, como el concreto, una reducción de la presión de inflado implica un aumento de la resistencia al rodado, aún en un nivel más bajo, lo que se debe a que las paredes del neumático se deforman más aunque con muy poco cambio en la tracción. Así, el efecto sobre la fuerza en la barra de tiro es lo opuesto al caso de la Fig. 221, y tal como se muestra en la Fig. 222. Además se reduce la vida útil del neumático al laborar con presiones de inflado muy bajas si éste no está diseñado para tal uso. La presión óptima para trabajar en la mayoría de las condiciones agrícolas es entre 0.8 y 1.1 bar (12 y 16 lb/pulg²), pero esto depende mucho de la carga normal sobre el neumático y de su construcción, tema que se discute en el numeral 9.4.2 y que se indica en el Anexo 1.

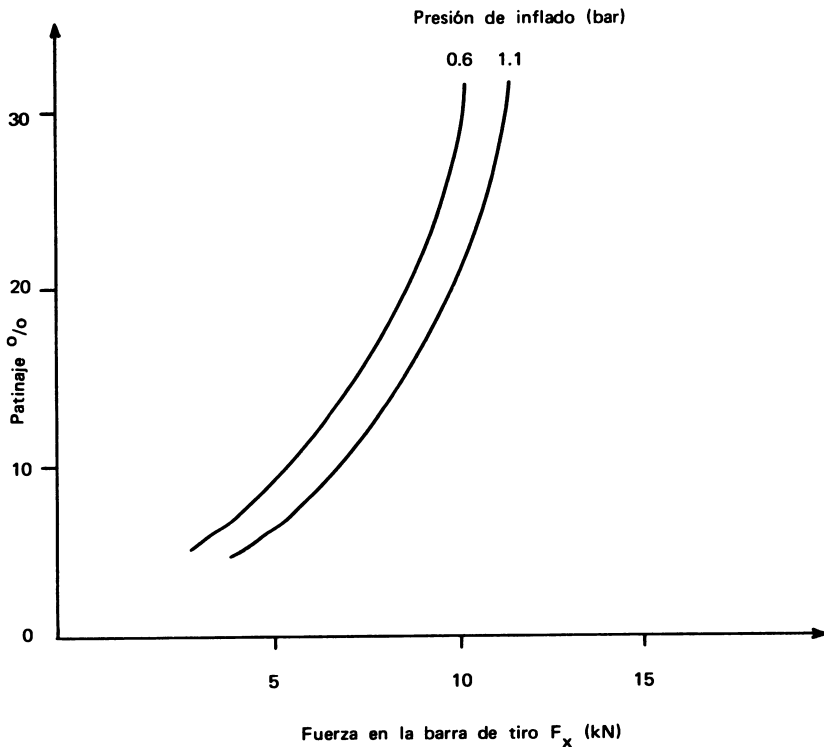


Fig. 222. Efecto de la presión de inflado sobre la fuerza en la barra de tiro en una superficie dura. En este caso una reducción de la presión aumenta la resistencia al rodado, disminuyendo la fuerza en la barra de tiro (adaptado de SAE Trans. Jan. 1938).

9.3.4 La tracción como función del patinaje para un neumático

En el Capítulo 1 y en las Figs. 1-4 se mostró que el esfuerzo de corte τ aumenta en forma de curva hasta un máximo τ_{\max} , de acuerdo con la deformación del suelo. La curva se aproxima a una relación exponencial y se ha propuesto varios métodos^{16,18} para predecir la tracción (H) de acuerdo con el patinaje (s). El método que actualmente se utiliza en Estados Unidos³ tiene su base en la medición de los parámetros del suelo con un penetrómetro⁶ (véase numeral 1.5.3).

Se debe evaluar la misma relación sin dimensiones C_n , tal como se indicó en el numeral 9.2.1; entonces la relación es la siguiente:

$$\mu = \frac{H}{Q} = 0.75 (1 - e^{-0.3 C_n s}) \quad (12)$$

en donde μ = coeficiente de tracción
 H = tracción
 Q = carga normal sobre el neumático
 e = exponencial = 2.178
 C_n = como definido en la Sección 9.2.1, ecuación (8)
 s = patinaje

Por ejemplo:

Un tractor convencional trabaja en un campo arenoso con los contrapesos y presiones recomendados en los neumáticos. Si el patinaje es 12 %, estimar el coeficiente de tracción.

Estimar $C_n = 15$ (Sección 9.2.1)

Evaluar $\mu = 0.75 (1 - e^{-0.3 \times 15 \times 0.12})$ (Ecu.12)
 $= 0.75 (1 - e^{-0.56})$

$$\underline{\mu = 0.32}$$

9.4 LAS CARACTERISTICAS Y LA SELECCION DE LAS LLANTAS PARA LOS TRACTORES AGRICOLAS

9.4.1 Generalidades

El tractor agrícola tiene un uso multipropósito en el campo. Ciertas operaciones, como la preparación del suelo para la siembra, requieren alta tracción, mientras que en otras se aprovecha la toma de fuerza para utilizar la mayor proporción de la potencia del motor y donde las ruedas cumplen una función de transporte, con el objetivo de minimizar la compactación. La selección del sistema de rodaje depende entonces de los trabajos a ser realizados y es el factor principal para determinar la eficiencia de trabajo en el campo y el consumo del combustible necesario.

9.4.2 La selección de las llantas apropiadas

La mayoría de los tractores agrícolas normalmente trabaja sin los accesorios enumerados en la Sección 9.7, por lo que la correcta selección de las llantas es muy importante. Los fabricantes ofrecen un amplio rango de llantas para los distintos usos y clase de terreno (ver Fig. 223). Lo más común para uso agrícola es el tipo R 1, que trae barras de tracción abiertas e inclinadas para apoyar la tracción y la limpieza de la llanta; la densidad de las barras (A_b/A) es alrededor del 30 %.

Ya se ha demostrado el influjo en la tracción del peso sobre la llanta Q , su diámetro, ancho y presión de inflado. Con base en estudios en Inglaterra, Dwyer¹¹ recomienda una presión de inflado entre 0.8 y 1.1 bar (12 a 16 lb/pulg²) y un peso total de unos 100 kg/kW (165 lb/hp) sobre las ruedas motrices para alcanzar una tracción óptima; este peso incluye la masa del tractor, los contrapesos y el efecto de la transferencia y adición de peso (véase la Sección 6.1). Se debe anotar que no todos los tractores están diseñados para llevar tanto peso, el que además podría ocasionar problemas adicionales de compactación.

Para reducir la resistencia al rodado se necesita un diámetro grande con una baja presión de inflado; finalmente, se debe seleccionar la llanta con base en el peso que deberá soportar en el trabajo. El Anexo 1 presenta cuadros de los pesos y las presiones para un rango amplio de llantas de uso agrícola. La Fig. 224 muestra la importancia de proporcionar la presión correcta de inflado de acuerdo con la carga sobre la llanta.



- (a) Aparato especial utilizado en el *National Institute of Agricultural Engineering* para la prueba de neumáticos; permite aplicar distintos grados de patinaje y grabar en forma continua todos los resultados en el campo.



- (b) Amplio rango de llantas para distintos usos y clase de terreno.



(c) Huella después de una prueba de patinaje, aumentado gradualmente de cero (abajo) hasta 100 % (arriba).

Fig. 223. Un rango de distintos tipos de neumáticos y un aparato para probarlos (*National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, Inglaterra*).



(a) Corte en la llanta por descuido en el acople de una herramienta trasera.



(b) Grietas en el exterior de la llanta debido al sobreinflado y desgaste anormal por el uso excesivo en las carreteras.

Fig. 224. Tipos de daños en llantas debido al mal uso.

Por ejemplo:

Se va a utilizar un tractor convencional en condiciones difíciles, por lo cual se necesita seleccionar las llantas delanteras y traseras con un máximo de flotación. El tractor tiene un peso total de 2 200 kg y lleva una herramienta integral (sobre el acople de los tres puntos) con peso de 800 kg.

Solución:

El eje delantero lleva una carga máxima al estar el tractor desacoplado de la herramienta. Esta carga se puede estimar en 1/3 del peso del tractor (véase la Sección 6.3.3).

Por tanto la carga máxima sobre una rueda delantera es igual:

$$1/2 \times 1/3 \times 2\,200 \text{ kg} = 367 \text{ kg}$$

De las tablas en el Anexo 1 se puede seleccionar las siguientes llantas, entre otras:

4.50—19 con presión 2.7 bar (39 lb/pulg²)

5.50—16 con presión 2.25 bar (32 lb/pulg²)

6.00—19 con presión 1.50 bar (22 lb/pulg²)

Por ser ancha, de gran diámetro y con una presión baja, esta última presenta la mejor flotación y una mínima resistencia al rodado.

El eje trasero lleva una carga máxima al transportar la herramienta de 800 kg y al ocurrir una transferencia de peso del eje delantero. En ausencia de otra información se puede estimar el peso mínimo, sobre el eje delantero, en 20 % del peso del tractor recomendado como mínimo para mantener control sobre la dirección (Sección 9.5.1). Entonces el eje delantero lleva

$$0.20 \times 2\,200 \text{ kg} = 440 \text{ kg}$$

Significa que el eje trasero lleva

$$2\,200 \text{ kg} + 800 \text{ kg} - 440 \text{ kg} = 2\,560 \text{ kg}$$

Cada llanta motriz lleva

$$1/2 \times 2 \ 560 \text{ kg} = 1 \ 280 \text{ kg}$$

Igualmente, se puede seleccionar las siguientes llantas de las tablas del Anexo 1:

12.4/11 – 32	con presión	1.5 bar	(22 lb/pulg ²)
12.4/11 – 36	con presión	1.4 bar	(20 lb/pulg ²)
12.4/11 – 38	con presión	1.4 bar	(20 lb/pulg ²)
13.6/12 – 36	con presión	1.1 bar	(16 lb/pulg ²)
14.9/13 – 28	con presión	1.0 bar	(14 lb/pulg ²)

De estas las dos últimas ofrecen buena flotación por su ancho y baja presión de inflado.

9.4.3 Sistema de marcación de las llantas

La Fig. 225 indica las dimensiones principales de una llanta (a) libre y (b) cargada. La relación de la altura de la sección al ancho se llama relación altura/ancho (en inglés *aspect ratio*) y es igual a h/b_c . Normalmente esta relación es aproximadamente 87 % en las llantas modernas, aunque antes de 1960 una relación de 100 % fue la más común. Una llanta típica anterior a 1960 habría sido marcada, por ejemplo, 12 – 38, lo que significa un ancho de sección b_c de 12 pulgadas, montada sobre un aro de 38 pulgadas diámetro y 12 pulgadas de ancho. Después de 1960 era más común montar este tipo de llanta sobre un aro de mayor ancho —probablemente 13 pulgadas— reduciendo así la relación altura/ancho hasta un 87 %. La marcación de esta llanta más ancha pero similar recibe la numeración 13.6/12 – 38, lo que significa un ancho de 13.6 pulgadas en sección montada sobre un aro de diámetro nominal de 38 pulgadas. En los años setenta esta misma llanta se denomina simplemente 13.6 – 38.

Recientemente se ha introducido llantas aún más anchas, por lo cual se incluye también el valor de la relación altura/ancho en caso que ésta difiera del 87 %; por ejemplo: 13.6/78 – 38 significa que es la misma llanta pero con una relación altura/ancho de 78 %. Finalmente, el uso de llantas de construcción radial se designa 13.6 R 38.

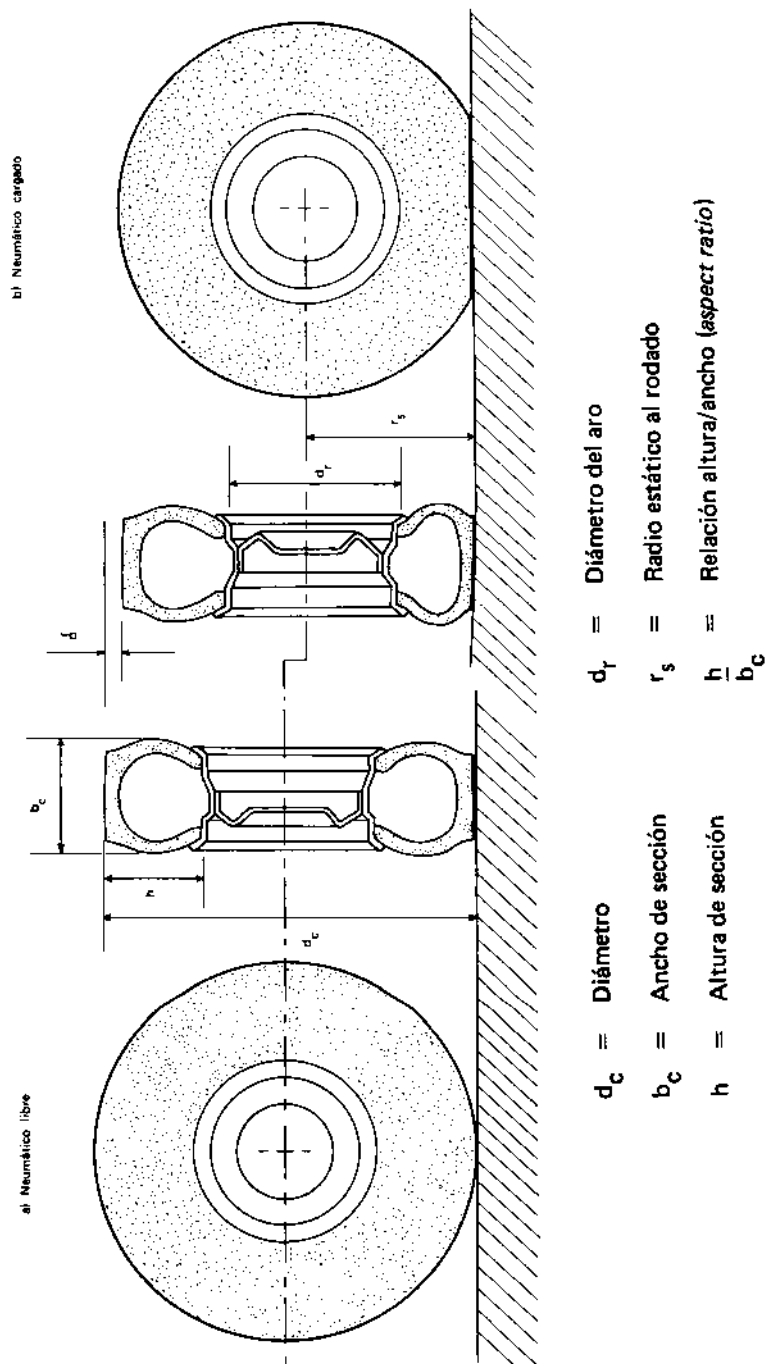


Fig. 225. Definición de las dimensiones principales de un neumático¹⁸.

El radio estático al rodado r_s normalmente va cotizado en los datos del fabricante para una cierta carga y presión de inflado. Alternativamente se puede calcularlo al medir la distancia cubierta por una revolución sin patinaje, o sea $2\pi r_s$ (véase el numeral 9.3.2).

9.4.4 Recomendación sobre las llantas óptimas para los tractores agrícolas

El Cuadro No. 9 presenta un resumen de las recomendaciones sobre llantas óptimas en tractores agrícolas, según los estudios de Dwyer¹¹.

CUADRO No. 9. Llantas óptimas para los tractores.

Potencia (kW) (hp)		Transmisión Simple			Transmisión Doble	
		Llantas óptimas		Llantas normalmente colocadas (Simples)	Llantas óptimas (Simples)	Llantas normalmente colocadas (Simples)
		(Simples)	(Dobles)			
30	40	13.6-36	12.4-28	12.4-28		
45	60	16.9-34	13.6-28	12.4-38		
60	80	20.8-34	16.9-34	16.9-34	13.6-36	13.6-38
75	100				16.9-28	16.9-34
105	140				18.4-34	18.4-34

Con respecto a la selección de la forma de las barras de tracción en la llanta, los estudios realizados sobre los tipos RI (Fig. 223) para uso agrícola no demuestran diferencia mayor en su comportamiento. La altura de la barra puede mejorar la tracción pero también aumenta la resistencia al rodado; no se recomienda barras mayores de 20 mm y normalmente pueden ser menores.

Las llantas de construcción radial pueden ofrecer 5-10 % de mayor tracción, con un patinaje de 20 %, pero solamente en el caso de una baja presión de inflado^{14,30,31} (típicamente 0.8 bar o sea 12 lb/pulg²).

9.5 MEJORAS DE TRACCION POR MEDIO DE CONTRAPESOS Y LASTRE DE AGUA

9.5.1 Recomendación de cantidad de contrapeso

Como ya fue indicado (Sección 9.4.2), Dwyer¹¹ recomienda cargar las ruedas motrices con un total de 100 kg/kW para alcanzar el comportamiento óptimo en las operaciones de alta tracción. Siempre debe consultarse el **Manual del Operador** antes de colocar contrapesos, dado que no todos los tractores están aún diseñados para llevarlos en gran número.

La Fig. 226 ilustra cómo se puede agregar pesos delanteros y traseros al tractor e introducir lastre de agua o una solución de cloruro de calcio a las llantas. Cabe anotar que los contrapesos delanteros sirven para permitir una mayor transferencia de peso (Sección 6.1) al eje trasero durante el trabajo. Una regla básica enseña que se debe mantener 20 % del peso total del tractor sobre el eje delantero durante el trabajo para permitir dirigirlo en forma segura. Al reducir este valor las ruedas delanteras pueden resbalar lateralmente ocasionando una peligrosa pérdida de control.

Finalmente, debe recordarse que la colocación de contrapesos innecesarios para las operaciones de poca tracción (por ejemplo remolcando una sembradora) solamente sirve para aumentar el consumo de combustible y el desgaste de los neumáticos.

9.5.2 Lastre de agua en las llantas

La forma más barata de cargar las ruedas del tractor es introducir agua o una solución de cloruro de calcio en ellas. Este último

tiene como ventaja su mayor peso que el agua pura y poseer un punto más bajo de congelamiento (Cuadro No. 10).

El método normal para introducir el agua consiste en soportar el eje del tractor y colocar la válvula del neumático en su posición superior, luego se puede sacar la válvula e introducir el agua con una manguera; así se llena en un 75 % hasta el nivel de la válvula. Este nivel es suficiente para la mayoría de los casos pero existen ciertas condiciones en que es más aconsejable proveer de 95 a 100 % de lleno.



Fig. 226. Tractor convencional con contrapesos delanteros, traseros y lastre de agua en las ruedas de mando.

El 100 % es recomendable al trabajar con herramientas integrales muy pesadas, para evitar grandes deformaciones en los neumáticos al subir y bajar la herramienta sobre el acople de tres puntos, lo que ocasiona daños en la estructura de las paredes de las llantas. Desafortunadamente se requiere cierto equipo especial para introducir el agua, y éste normalmente se encuentra sólo en las agencias de servicio.

9.5.3 Protección contra las temperaturas bajas

La solución de cloruro de calcio no solamente aumenta el peso de la solución sino que también protege contra las heladas. El Cuadro No. 10 presenta las recomendaciones para la concentración de la solución, con base química en su forma sólida de 70 % CaCl_2 .

CUADRO No. 10. El uso de CaCl_2 en solución para lastre.

Temperatura	Hasta -7°C (20°F)	Hasta -18°C (0°F)	Hasta -25°C (-12°F)	Hasta -45°C (-50°F)
Solución	130 g/litro agua (1.1 lb/US gal)	240 g/litro (2 lb/US gal)	420 g/litro (3.5 lb/US gal)	500 g/litro (4.2 lb/US gal)

9.6 SELECCION DE OTROS SISTEMAS DE RODAJE

9.6.1 El uso de llantas dobles

La doble llanta (Fig. 227) tiene como ventaja duplicar la superficie de contacto, con lo que se provee mejor flotación y tracción en condiciones lodosas o arcillosas, además de reducir la compactación, que puede ser de gran importancia al momento de la siembra; debido a que se aumenta la resistencia al rodado, solamente se recomienda su uso en condiciones especialmente difíciles o en el caso de tractores y herramientas muy pesadas.



- (a) El sistema de acople de las llantas dobles puede ser simple y rapido (*Hestair Farm Equipment, Holbeach, Inglaterra*).



- (b) Uso de llantas dobles para mejorar la flotación de un tractor pequeño, al trabajar en arrozales.

Fig. 227. Ejemplos sobre uso de llantas dobles (véase Figs. 201 y 228).

Es importante apreciar que el tractor debe trabajar fuera del surco, lo que limita el uso de tractores medianos por cuanto no se puede laborar fácilmente con arados de vertedera o de discos. En tal caso normalmente se selecciona herramientas alternativas, como el arado de cincel. Los tractores grandes no tienen estos problemas ya que puede utilizar arados de cinco o más cuerpos, los que exigen trabajar fuera del surco.

9.6.2 Tractores de doble transmisión

La venta de tractores de doble transmisión aumentó tanto en la década del setenta que ocupó el mercado en más o menos un 50 %, junto a los tractores convencionales. En igual forma, su costo se redujo ofreciendo una alternativa muy atractiva para quienes necesitaron buena tracción sin la inversión adicional de un tractor de oruga. Existe información que revela cómo inicialmente los agricultores sólo utilizaban un 60 % de la potencia de estos tractores comparado con el 70-80 % en el caso de los tractores convencionales^{1 9}; la introducción de la 'doble' como opción en los tractores de 45 a 70 kW (60 a 90 hp) seguramente ha cambiado esta situación.

La configuración óptima para un tractor de doble transmisión es mostrada en la Fig. 228, con un 60 % del peso sobre el eje delantero; esto significa que la transferencia de peso debida a la herramienta provee una distribución uniforme de peso sobre las ruedas de tracción. De esta manera la tracción puede alcanzar entre 40 y 60 % más que un tractor convencional de igual peso en condiciones difíciles de campo.

La Fig. 229 presenta un tractor convencional con opción de doble transmisión y con ruedas de dimensión desigual; aunque la configuración no es la óptima, se puede aumentar la tracción entre 20 y 40 % de acuerdo con las condiciones del suelo, lo que puede ser una solución económica en muchos casos. Algunos tractores de este tipo tienen la posibilidad de acoplar la doble con un embrague especial (por ejemplo, electro-mecánico) al encontrar un patinaje excesivo.

Es importante indicar también que la doble transmisión permite reducir el patinaje, con lo que se facilita una mejor eficiencia en el consumo de combustible. A pesar de todas sus ventajas, estudios en Inglaterra^{1 3} revelan que con relación a su capacidad de trabajo en un tiempo dado, los tractores de doble transmisión con llantas delanteras pequeñas demostraban una capacidad de 7 % mayor que los



Fig. 228. Dos distintos modelos de un tractor moderno de alta potencia y diseño óptimo en la distribución del peso, para aprovechar su doble transmisión (*John Deere* - Ponce Yepes, Quito).



Fig. 229. Tractor convencional adaptado para uso con doble transmisión. Aunque su distribución de peso no es óptima, se puede esperar un aumento en la tracción y en el rendimiento.

tractores convencionales y similares, mientras que los de mando en las cuatro ruedas grandes alcanzaban una capacidad de 14 % mayor. Inns y Kilgour¹⁸, al contrario, dan cifras de 17 % y 35 % respectivamente.

9.6.3 Los tractores de oruga

La aplicación de tractores de oruga en operaciones agrícolas de condiciones especialmente difíciles y en terrenos muy accidentados ha tenido éxito durante muchos años. La oruga provee una gran superficie de contacto que permite desarrollar buena tracción en los suelos arcillosos. Un mayor ancho en la oruga aumenta la resistencia al rodado mientras que una oruga muy angosta pierde la flotación, dejando huellas profundas. La Fig. 230 describe un tractor de oruga típico para uso agrícola.

Otro aspecto del diseño es el que se refiere a la posición del centro de gravedad. Una aplicación agrícola requiere la posición adelante para que la transferencia de peso durante el remolque de las herramientas mantenga al tractor nivelado, sin profundizar mucho la parte trasera de las orugas. Para el uso industrial en movimiento de tierra, en cambio, se requiere la posición más hacia atrás para permitir mayor eficiencia en el control de la cuchilla delantera.

Existe mucha discusión sobre las ventajas y desventajas entre los tractores de oruga y los de doble transmisión con doble llanta. La estabilidad en las pendientes fuertes, la maniobrabilidad y la economía de operación son los principales aspectos considerados. Se toma en cuenta, además, la presión de contacto de la oruga seleccionada, según lo que dicte el grado de compactación en los suelos sueltos y de baja resistencia. La Fig. 231 expone un rango típico de orugas ofrecido comercialmente.

9.7 EQUIPO ACCESORIO DE APOYO A LA TRACCION

9.7.1 Generalidades

Además de la posibilidad de seleccionar un sistema de rodaje especial, como se discutió en la Sección 9.6, también existen varios accesorios para tractores convencionales, útiles para prestar apoyo en ciertas circunstancias. Normalmente estos ofrecen una alternativa barata en vez de utilizar un sistema de rodaje completamente diferente.

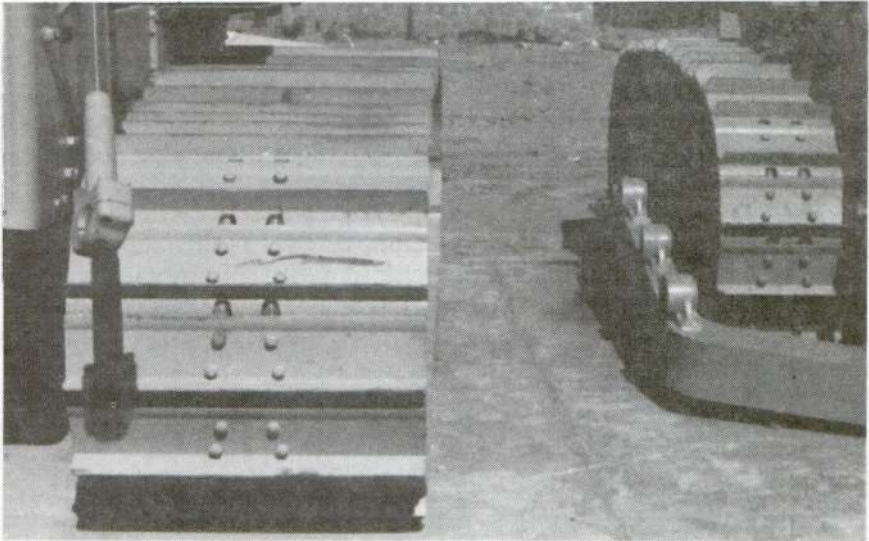


- (a) Un tractor de oruga para uso agrícola. La distribución del peso es más hacia adelante, para facilitar su uso con las herramientas de tiro.



- (b) Un tractor de oruga industrial. La distribución del peso más hacia atrás, para facilitar su trabajo normal de empuje, como lo demuestra este tractor balanceado sobre un tronco.

Fig. 230. Dos ejemplos de tractores de oruga, uno para uso agrícola y otro para uso industrial.



- (a) Comparación de una oruga de baja presión para zonas pantanosas con una oruga normal, colocadas en un mismo modelo de tractor. La primera tiene una dimensión de contacto de 36 x 120 pulgadas y la otra de 20 x 97 pulgadas.



- (b) Orugas triangulares para permitir el patinaje sin enterrarse en el lodo.

Fig. 231. Diferentes tipos de orugas.

9.7.2 Semi-orugas

La semi-oruga representa una alternativa intermedia de llantas y orugas a precio económico, aunque su uso actual ha sido sustituido en gran parte por los tractores convencionales adaptados para doble transmisión (Fig. 229).

El objetivo de la semi-oruga (Fig. 232) es reducir la compactación en los suelos sueltos, por ejemplo durante la siembra, y también mejorar la tracción en suelos de características cohesivas. Anteriormente se les utilizó en trabajos forestales, especialmente en el remolque de la madera.



- (a) La semioruga es normalmente fabricada como accesorio del tractor.

9.7.3 Cadenas y puntas de metal

Es común encontrar una condición de suelo en que la capa superficial es débil pero resistente en profundidad, particularmente en condiciones de alto contenido de humedad. En estos casos resulta útil el sistema de cadenas sujetas alrededor de las llantas de tracción (Fig. 233) o de puntas de metal acopladas a un lado de las llantas de tracción (Fig. 234), ya que corta el suelo a mayor profundidad y donde tiene más resistencia, con lo que se mejora la tracción.



(b) La semioruga provee una mayor flotación y tracción en condiciones difíciles.

Fig. 232. Dos aspectos del uso de la semioruga (*James Jones and Sons Ltd*).

9.7.4 Rueda-jaula

También se les utiliza para dar mayor flotación al tractor cuando se labora en suelos sobresaturados, como es el caso del fangueo de arrozales (Fig. 236). Cabe anotar que esta operación no es recomendable por ser muy peligrosa en cuanto a la alta posibilidad de un volcamiento trasero; como alternativa se recomienda el uso de un cultivador giratorio (*rotavator*) como se observa en la Fig. 237 (véase también el numeral 4.6.1 y la Fig. 68).

El uso de las ruedas-jaulas (limitado sólo a ser utilizadas con neumáticos) sirve en general para reducir la compactación del suelo, por ejemplo en el momento de la siembra (Fig. 235).

9.7.5 Bloqueo del diferencial (traba)

Todos los tractores modernos vienen normalmente equipados con un bloqueador del diferencial que ayuda en condiciones difíciles, especialmente al trabajar en un surco donde puede ser desigual la tracción de las ruedas de mando. Algunos tractores de doble transmisión traen un bloqueador automático en el eje delantero, además del bloqueador convencional en el eje trasero.

9.7.6 Comparación del comportamiento de los varios sistemas de apoyo a la tracción

Han sido realizados varios estudios sobre el comportamiento de los distintos apoyos a la tracción, entre los cuales los principales son los de Bailey⁷, Southwell^{2,8}, Dwyer^{10,11} y Gee Clough¹⁵. El Cuadro No. 11 presenta un resumen de los resultados de Southwell, si bien ningún ajuste ha sido realizado en cuanto a la diferencia de peso de los tractores por causa de los contrapesos. Aunque todos los accesorios bajo estudio habían aumentado indudablemente la resistencia al rodado, se nota ventajas menores o mayores en la fuerza a la barra de tiro.



Fig. 233. Detalle y uso de cadenas en las llantas de tracción de los tractores (*James Jones and Sons Ltd*).

CUADRO No. 11. Aumento relativo de fuerza en la barra de tiro para algunos sistemas de apoyo a la tracción²⁸.

Forma de mejorar la tracción	Franco arenoso (labrado, seco y suelto)		Franco (labrado y húmedo)		Franco (rastrajo húmedo con malezas)		Franco (rastrajo de alfalfa con capa congelada)		Arcilloso (rastrajo de heno)		Promedio % de aumento relativo a las llantas con aire	
	F _{max}	F con $\phi=15\%$	F _{max}	F con $\phi=15\%$	F _{max}	F con $\phi=15\%$	F _{max}	F con $\phi=15\%$	F _{max}	F con $\phi=15\%$	F _{max}	F con $\phi=15\%$
Llantas con aire (13.6-28)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
Llantas con aire (13.6-28) y cadenas	1.00	0.92	1.07	1.06	1.09	1.09	1.17	1.00	1.06	1.09	7	3
Llantas con puntas de metal	1.36	1.51	1.44	1.56	1.51	1.78	1.50	1.76	2.54	2.86	67	89
Llantas semi-orugas	1.88	1.80	1.92	1.38	1.85	2.00	2.05	2.30	1.94	2.36	93	117
Llantas dobles con aire (13.6-28)	1.20	1.05			1.38	1.24	1.39	1.35	1.66	1.41	41	26
Llantas anchas con aire (14.9-28)	1.04	0.97	1.15	1.27	1.07	1.06	1.22	1.05	1.26	1.14	15	8
Llantas con líquido (13.6-28)	1.40	1.61	1.41	1.59	1.43	1.35	1.55	1.60	1.68	1.52	49	53
Llantas dobles con líquido (13.6-28)	2.12	2.36	2.37	2.75	1.93	2.15	2.33	2.54	2.46	2.28	124	141

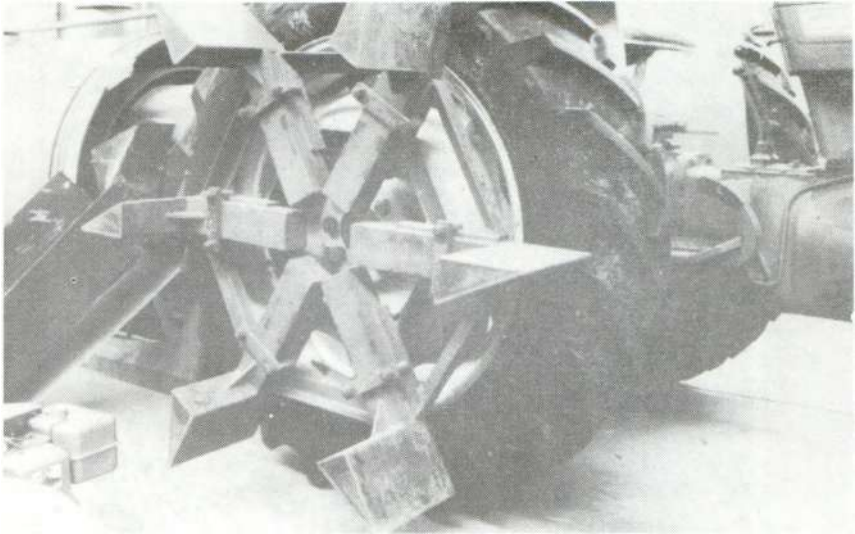


Fig. 234. Utilización de puntas metálicas extensibles al lado de la llanta, para apoyar la tracción donde existe una capa inferior del suelo más resistente (*R P Wainwright, NIAE, Silsoe, Inglaterra*).

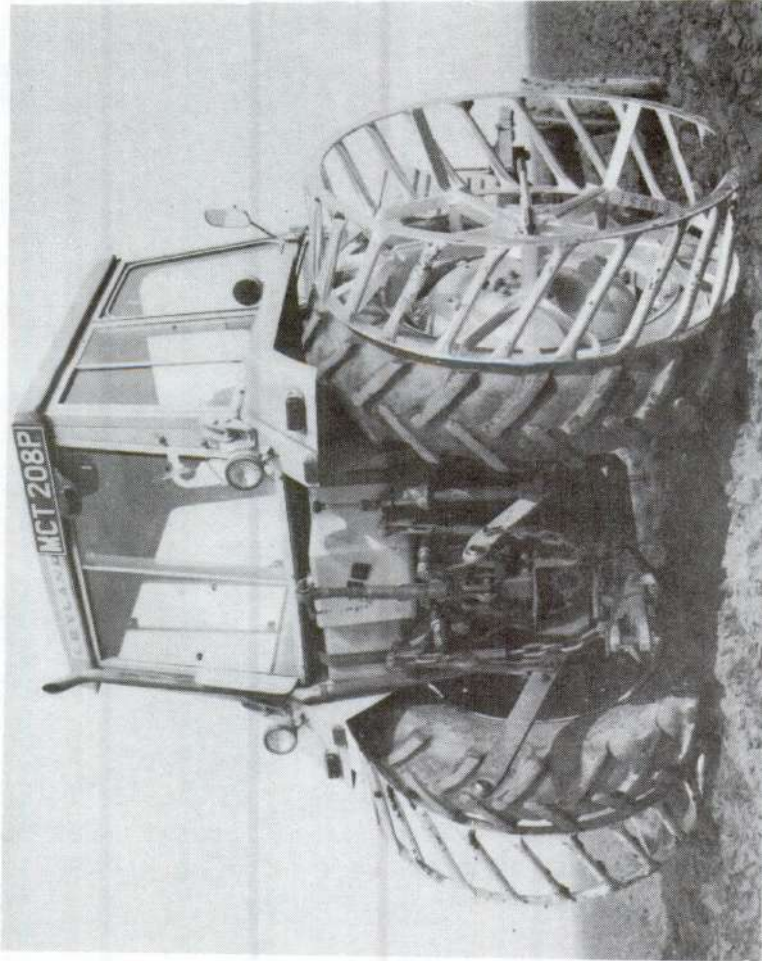


Fig. 235. Ruedas de jaula que permiten reducir la compactación en las operaciones críticas de la siembra (Hestair Farm Equipment).

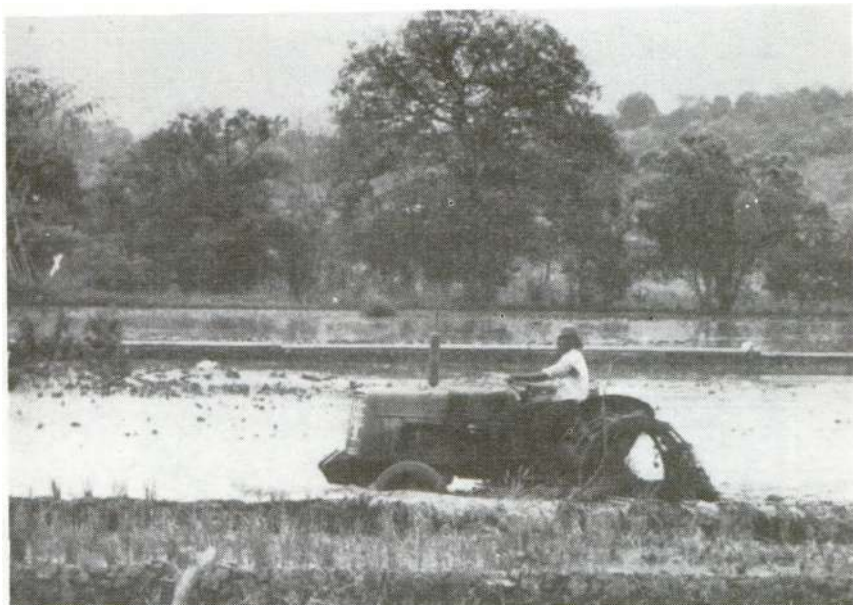


Fig. 236. Dos aspectos del uso de ruedas de jaula para el fangueo. Debido al grave peligro de un volcamiento trasero, se recomienda el empleo de un cultivador giratorio (véase Fig. 237).

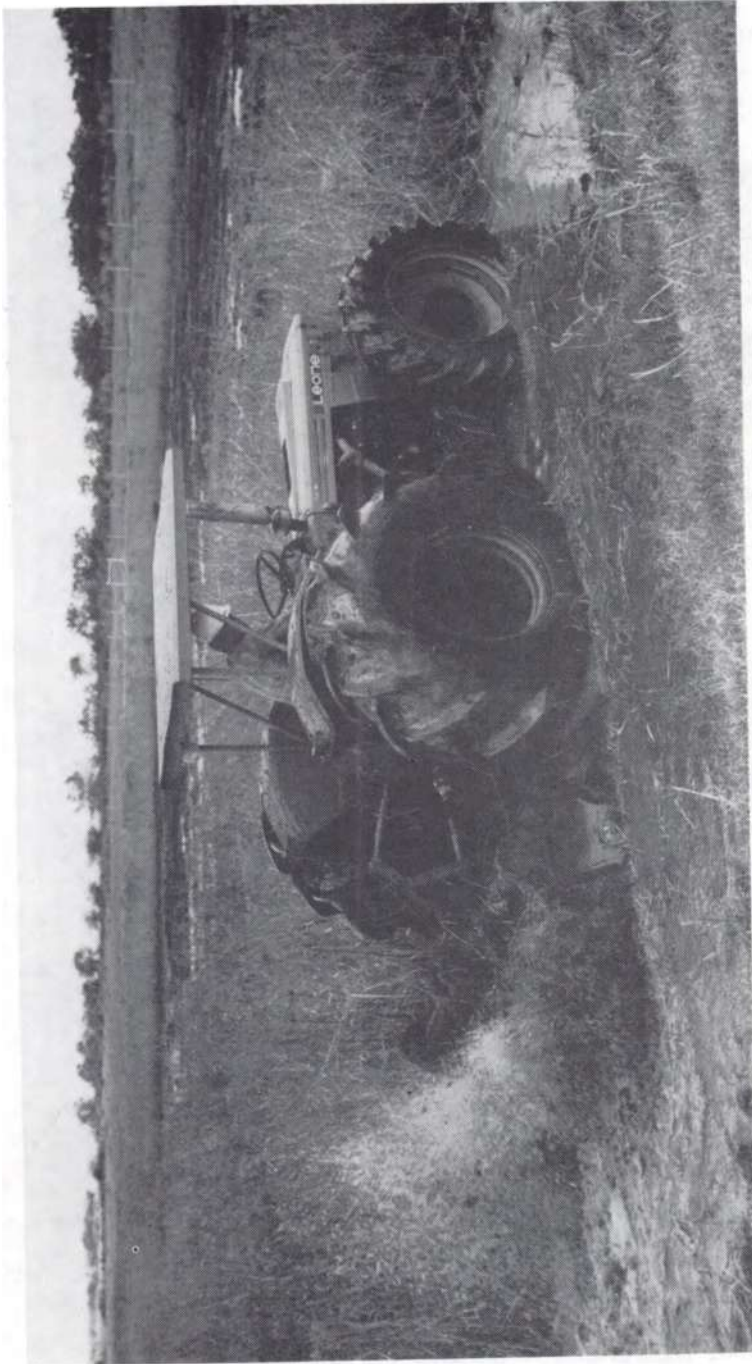


Fig. 237. La utilización de un cultivador giratorio durante el fangueo de arrozales permite un control eficiente de las malezas y brinda estabilidad al tractor (*Lloyd Johnson*).

BIBLIOGRAFIA

1. ANON. Radial tractor tyres. London, Power Farming, 48(1):58. 1972.
2. ANSLOW, B.J., WARRILOW, E.L. Tractor tyres. London, I. Mech. E., 1962. 26 p.
3. ASAE. Agricultural machinery management data. ASAE Data No. 230.3, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. pp. 243-250.
4. _____. Agricultural tractor tire loadings, torque factors and inflation pressures. Standard No. 295.2, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. pp. 216-217.
5. _____. Liquid ballast table for drive tires of agricultural machines. Standard No. 346.1, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. pp. 218-219.
6. _____. Soil cone penetrometer. Standard No. 313.1, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. 265 p.
7. BAILEY, P.R. Comparative performance of some traction aids. J. Ag. Engg. Res. 1(1):12-22. 1956.
8. BEKKER, M.G. Off-the-road locomotion. Michigan, USA, University of Michigan Press, 1960. 220 p.
9. _____. Theory of land locomotion. Michigan, USA, University of Michigan Press, 1962. 552 p.
10. DWYER, M.J., COMELY, D.R., EVERNDEN, D.W. The field performance of some tractor tyres related to soil mechanical properties. J. Ag. Engg. Res. 19(1):35-50. 1974.

11. DWYER, M.J. Some aspects of tyre design and their effect on agricultural tractor performance. Paper No. 6204/75, London, UK, I. Mech. E., October 1975.
12. _____, EVERNDEN, D.W., McALLISTER, M. Handbook of agricultural tyre performance (2nd edition). NIAE Report No. 18. Silsoe, Bedford, UK, NIAE, 1976. 18 p.
13. _____, PEARSON, G. A field comparison of the tractive problems of two- and four-wheel drive tractors. J. Ag. Engg. Res. 21(1):77-85. 1976.
14. ELLIS, R.W. Agricultural tire design requirements and selection conditions. ASAE Distinguished Lecture Series – Tractor Design No. 3. St. Joseph, Michigan, USA, ASAE, December 1977. 10 p.
15. GEE-CLOUGH, D. Ground drive equipment and aids to extend trafficability limits and minimize soil structural damage. The Agric. Eng. 32(4):99-102. 1977.
16. GILL, W.R., VANDEN BERG, G.E. Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook No. 316, Washington, USA, USDA, 1967. 511 p.
17. I.Ag.E. Tyres – Data Manual. Data No. 1030-1039. Silsoe, Bedford, UK, The Instn. of Agric. Engrs., 1979. 10 p.
18. INNS, F.M., KILGOUR, J. Agricultural tyres. London, UK, Dunlop Ltd., 1978. 70 p.
19. M.A.F.F. Wheeled and tracklaying tractors. A joint ADAS/NIAE study of utilization, performance and tyre and track costs 1969-70. Farm Mechanisation Studies No. 21. London, UK, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. 1972. 42 p.
20. MICKLETHWAITE, E.W.E. Soil mechanics in relation to fighting vehicles. Chertsey, UK, Military College of Science, 1944. 20 p.

21. N.A.A.S. The use of large horsepower wheeled tractors. Technical Report No. 17. London, UK, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1968. 35 p.
22. ———. The selection, care and use of agricultural tyres. Mechanisation Booklet No. 2130. London, UK, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1980. 24 p.
23. OSBORNE, L.E. Ground-drive systems for high-powered tractors. Paper 7, Conference on Agricultural and Allied Industrial Tractors, London, UK, I. Mech. E., October 1970. 10 p.
24. ———. A field comparison of the performance of two— and four-wheel drive and tracklaying tractors. *J. Ag. Engg. Res.* 16(1):46-61. 1971.
25. REECE, A.R. Two or four wheel drive? London, UK, Farm Machine Design Engg. 2:24-26. 1968.
26. SENKOWSKI, A. Traction problems of agricultural tractors. *J. and Proc. I. Agric. Engrs.* 19(3):83-91. 1963.
27. SOHNE, W. Four wheel drive or rear-wheel drive for high power farm tractors. *J. of Terramech.* 5(3):9-28. 1968.
28. SOUTHWELL, P.H. An investigation of traction and traction aids. *Trans. ASAE* 7(2):190-193. 1964.
29. ———. An investigation of four-wheel drive and tandem tractor arrangement. *Trans. ASAE* 10(2):284. 1967.
30. TAPP, D.R.F. Large four wheel drive tractors. *The Agric. Engr.* 33(4):95-100. 1978.
31. TAYLOR, J.H., BURT, E.C., BAILEY, A.C. Radial tire performance in firm and soft soils. *Trans. ASAE* 19(6):1062-1064. 1976.
32. TIPPER, B.D. Tyres. London, UK, Power Farming. 59(2):82. 1980.

ANEXO 1.

Carga y presión de inflado de las llantas para uso agrícola

(Ref. I. Ag. E. *Data manual*. Institution of Agricultural Engineers, Silsoe, Bedford, UK, 1979).

NOTAS:

1. Número de lonas significa la resistencia de la llanta debido a la carga y la presión; dados los avances en materiales y métodos de fabricación, no necesariamente especifica el número preciso de lonas, sino su resistencia.
2. $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} = 100 \text{ kN/m}^2 = 14.4 \text{ lb/pulg}^2 \simeq 1 \text{ kg/cm}^2$.
3. Se debe calcular la carga de la llanta para incluir los tanques o tolvas llenos.
4. Al utilizar las llantas en los tractores, con las herramientas integrales, solamente para propósitos agrícolas a las velocidades menores de 6 km/h, se puede aumentar las cargas por llanta hasta 30 %, al incrementar la presión 0.3 bar (4 lb/pulg²).
5. Para velocidades menores de 30 km/h, se puede aumentar las cargas hasta 20 % sin cambiar la presión de inflado.
6. Para velocidades menores de 25 km/h, se puede aumentar las cargas hasta 7 % sin cambiar la presión de inflado.

A1.1 Llantas del tractor/herramienta para uso en las herramientas automotrices o con mando por las llantas; velocidad máxima 30 km/hora.

Tamaño de la llanta	Número de lonas (Nota 1)	Presión de inflado – bar (lb/pulg ²) (Nota 2)									
		1.00 (14)	1.25 (18)	1.50 (22)	1.75 (25)	2.00 (28)	2.25 (32)	2.50 (36)	2.75 (40)	3.00 (44)	3.25 (46)
		Carga por llanta, kg									
3.00 – 8	2		81	90	97	104					
4.00 – 8	2		140	155							
	4				175	185	200	215	225		
4.00 – 12	2		192	210							
	4				231	250	270	288	300		
4.00 – 16	2			260							
6.00 – 12	2	250									
	4		289	321	348	374					
6.00 – 16	4		445	485	530	570					
	6						610	650	685		
7.50 – 16	6		625	700	765	830	890				
7.50 – 20	4			775							
	8				818	880	953	1061	1084	1148	1220
12.5 – 18				1505	1602	1730	1880	2010			

ANEXO 1 (Cont.)

A1.2 Llantas direccionales del tractor – velocidad máxima 30km/hora.

Tamaño de la llanta	Número de lonas (Nota 1)	Presión de inflado – bar (lb/pulg ²) (Nota 2)									
		1.50 (22)	1.75 (25)	2.00 (28)	2.25 (32)	2.50 (36)	2.70 (39)	2.95 (43)	3.25 (46)	3.50 (50)	3.75 (53)
		Carga por llanta (kg)									
4.00 – 12	2	145	160								
4.00 – 15	4	170	190	205	225	245	260	280			
4.00 – 19	4	200	225	245	270	295	315	340			
4.50 – 19	6	240	265	290	320	345	370	395	415	440	460
5.00 – 15	4	210	235	260	290	315	340				
5.50 – 16	4	305	335	365	395	425					
	6						455	485	515	545	
6.00 – 16	4	380	395	425	460	490					
	6						525	555	585	620	
6.00 – 19	4	385	425	465	505	545					
	6						585	625	665	705	
	8	495	545	595							
7.50 – 16	6				645	695	745				
	8							800	835	885	
7.50 – 18	6	535	590	645	700	755	810				

ANEXO 1 (Cont.)

A1.3 Llantas de tracción del tractor; velocidad máxima 30 km/hora.

Tamaño de la llanta	Número de lonas (Nota 1)	Presión de inflado – bar (lb/pulg ²) (Nota 2)									
		1.00 (14)	1.10 (16)	1.25 (18)	1.40 (20)	1.50 (22)	1.65 (24)	1.80 (26)	2.00 (28)	2.10 (30)	2.25 (32)
		Carga por llanta kg									
8.3/8–24	4	481	522	558	594	625					
9.5/9–24	4	603	649	698	740						
	6					782	822	860	900	935	
11.2/10–24	4	730	789	845							
	6				903	950	990	1030	1075		
11.2/10–28	4	776	839	900							
	6				962	1007	1051	1097	1140		
12.4/11–28	4	930	1005								
	6			1080	1148	1211	1275				
12.4/11–32	4	994	1070								
	6			1150	1225	1290	1360				
12.4/11–36	4	1048	1135								
	6			1220	1301	1370	1445				
12.4/11–38	6	1080	1165	1247	1329	1406	1480				
13.6/12–28	4	1100									
	6		1188	1275	1352	1435					
13.6/12–36	6	1240	1340	1440	1538	1630					
	6	1275	1374	1474	1569	1660					
14.9/13–24	6	1224	1322	1420	1510						
	8					1597	1680	1760			
14.9/13–26	6	1270	1375	1465	1560						
	8					1655	1740	1820			
14.9/13–28	6	1310	1420	1520	1610						
	8					1710	1795	1880			
14.9/13–30	6	1355	1465	1570	1665						
16.9/14–30	6		1770	1895							
	8				2025	2130	2245				
	10							2365	2460	2555	
16.9/14–34	6		1880	2015							
	8				2140	2265	2380				
18.4/15–26	8		1985	2130	2265						
	10					2395	2520	2640			
18.4/15–30	6	1965	2120								
	8			2268	2415						
	10					2554	2685	2815			
	12								2940	3040	3190
18.4/15–34	6	2090	2250								
	8			2409	2565						

ANEXO 2.

Requerimiento de fuerza, energía y potencia de las herramientas

(Ref. Kepner, R.A., Bainer, R., Barger, E.L. *Principles of Farm Machinery*, 3rd edition, 1978 AVI Publishing Co, Po Box 831, Westport, Conn. 068880, USA. pp. 506-507).

Máquina (Nombre Americano)	Máquina (Nombre Español)	Rango Típico de Requerimientos	Referencia bibliográfica
<i>Tillage:</i> <i>Moldboard or disk plow</i>	Labranza: Arado de vertedera o discos:	2.1-4.1, 3.4-6.2, 5.5-9.7 N/cm ² (Nota 1).	1
<i>Lister (in firm soil).</i>	Surcadora (en suelo firme).	1.8-3.6 kN por cuerpo.	1
<i>Vertical-disk plow (one way disk).</i>	Disco cultivador (de disco unidireccional).	2.6-5.8 kN/m.	1
<i>Disk harrow.</i>	Rastra de discos.	0.7-1.5 kN/m	1
<i>Single-acting.</i>	Rastra de discos de acción simple.		
<i>Tandem (light-duty)</i>	<i>Tandem</i> (liviano)	1.5-2.9 kN/m	1
<i>Offset o heavy tan- dem</i>	Excéntrica o <i>tan- dem</i> pesada.	3.6-5.8 kN/m	2,6 (cap. 7)
<i>Subsoiler</i>	Subsoladora	120-190, 190-280 N/cm de profundidad (Nota 2).	1
<i>Chisel plow or chisel type field cultivator</i>	Arado cincel o culti- vador de campo con cinceles.	0.23-0.69 kN/m por cm de profundidad.	4,5
<i>Field cultivator with sweeps 8 to 13 cm depth</i>	Cultivador de campo con rejas en "A", B a 13 cm de profundi- dad.	1.5-4.4 kN/m	4,5
<i>Powered rotary tiller, conventional 8 to 10 cm bite (Note 3)</i>	Cultivador rotativo convencional (<i>rotava- tor</i>) 8 a 10 cm mor- dedura (Nota 3).	10-17, 17-24, 21-28 equiv. N/cm ² (Nota 4) Alternativamente 12-24 kW/m	1,6 (cap. 9) 2
<i>Spring-tooth harrow</i>	Rastra de resortes	1.1-2.9 kN/m	1,2
<i>Spike-tooth harrow</i>	Rastra de púas	0.3-0.9 kN/m	1
<i>Rod weeder</i>	Desmalezador de ba- rra	0.9-1.8 kN/m	1
<i>Roller or packer</i>	Rodillo o compactador	0.3-2.2 kN/m	2
<i>Rotary hoe</i>	Azada giratoria		
<i>Row crop cultivator</i>	Cultivador entre hile- ras.	0.4-1.5 kN/m	2
<i>Shallow</i>	Poco profundo	0.6-1.2 kN/m	1
<i>Deep</i>	Profundo	0.11-0.23 kN/m por cm de profundidad.	1

ANEXO 2. (Cont.)

Máquina (Nombre Americano)	Máquina (Nombre Español)	Rango Típico de Requerimientos	Referencia bibliográfica
<i>Planting:</i>	Siembra		
<i>Row crop planter (drilling only seed)</i>	Sembradora de hilera (sólo semilla)	0.45-08 kN por hilera	1
<i>Row crop planter (drilling seed, fertil- izer, herbicide)</i>	Sembradora de hilera (semilla, fertilizante, herbicida)	1.1-2.0 kN por hilera	3
<i>Grain drill</i>	Sembradora de grano.	0.4-15 kN/m	2
<i>Harvesting:</i>	Cosecha		
<i>Mower</i>	Segadora de barra	1.0-2.0 kW/m en la TDF (Nota 5)	6 (cap. 14)
<i>Hay baler</i>	Empacadora de heno	0.8-2.1 kWh/ton (Nota 6)	6 (cap. 15)
<i>Field cuber, self pro- pelled</i>	Elaborador de cubos automotriz	16-15 kWh/ton	8 (cap. 15)
<i>Flail type field chop- per</i>	Cosechadora de forra- je		
<i>Without recutter</i>	Sin picador	1.1-2.1 kWh/ton (Nota 6)	1
<i>With flywheel-type recutter</i>	Con picador de tipo volante	1.6-3.3 kWh/ton (Nota 6)	6 (cap. 16)
<i>Shear-bar-type field chopper (Nota 7)</i>	Cosechadora de forra- je con cilindro corta- dor (Nota 7)		
<i>Corn silage, 13 mm theor. cut</i>	Ensilaje de maíz, corte teórico de 13 mm	0.7-1.6 kWh/ton (Nota 6)	1,6 (cap. 16)
<i>Green grass/legume silage</i>	Ensilaje de pasto o leguminosa	0.8-2.1 kWh/ton (Nota 6)	6 (cap. 16)
<i>Low-moisture grass/legume silage</i>	Ensilaje de pasto o leguminosa de baja humedad	1.6-4.1 kWh/ton (Nota 6)	8 (cap. 16)
<i>Self propelled com- bine in grain</i>	Combinada automo- triz de grano.	3.3-4.9 kWh/ton de materia no granulada Alternativamente 0.3 kW/cm de ancho del cilindro.	6 (cap. 17)
		9-15 kW	2
<i>Corn picker, 2 - row</i>	Cosechadora de ma- zorca de 2 hileras		2

NOTAS:

- 1) Fuerza por unidad de área de sección del surco para suelo liviano, mediano y pesado, respectivamente.
- 2) Para un suelo franco arenoso y franco mediano o franco arcilloso, respectivamente.
- 3) La mordedura (*bite length*) se define como la distancia trasladada hacia adelante por cada corte. Se debe anotar que normalmente se hace 2 ó 3 cortes por revolución (véase numeral 3.7.2).
- 4) Expresado como fuerza de arrastre por área de corte, pero en realidad todo es potencia por el eje de toma de fuerza. Los rangos son para suelos liviano, medianos y pesados respectivamente. Al aumentar la mordedura hasta 15 cm, se disminuye los valores en 20 a 25 %
- 5) La fuerza debida al arrastre de la barra no está incluida.
- 6) La resistencia al rodado no está incluida.
- 7) Los valores son más bajos para alta velocidad de alimentación, baja velocidad de la cortadora en la barra y cortes largos de la materia.

BIBLIOGRAFIA

1. ASAE. Costs and use, farm machinery. ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1963. pp. 227-233.
2. _____. Agricultural machinery management data. ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1976. pp. 322-329.
3. _____. Agricultural machinery management data. ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1982. pp. 213-220.
4. DOWDING, E., FERGUSON, J.A., BECKER, C.F. A comparison of four summerfallow tillage methods based on seasonal-tillage energy requirements, moisture conservation and crop yield. Trans. ASAE 10(1):1. 1967.
5. PROMERSBERGER, W.J., PRATT, G.L. Power requirements of tillage implements. North Dakota Agric. Exptl. Sta. Bull. No. 415, 1958. 20 p.
6. KEPNER, R.A., BAINER, R., BARGER, E.L. Principles of farm machinery. 3rd edition. Westport, Conn., USA, Avi, 1978. 527 p.

ANEXO 3.

Velocidad de trabajo y eficiencia de campo para varias herramientas. (Datos de Estados Unidos).

(Ref. Kepner, R.A., Bainer, R., Barger, E.L. *Principles of Farm Machinery*, 3rd edition, 1978, AVI Publishing Co. PO Box 831, Westport, Conn. 06880, USA 527 p.).

Máquina	Velocidad de trabajo km/h	Eficiencia de campo típico*
Labranza:		
Cultivador de Campo	5.5 - 9	0.7 - 0.9
Cultivador entre hileras		
Primera labor	2.5 - 5	0.7 - 0.9
Labores subsiguientes	4 - 9	0.7 - 0.9
Rastra de discos	5.5 - 10	0.7 - 0.9
Arado de vertedera o discos	5.5 - 9	0.7 - 0.9
Rodillo o compactador	5 - 10	0.7 - 0.9
Azada giratoria	8 - 18	0.7 - 0.9
Rastra de púas	5.5 - 9	0.7 - 0.9
Rastra de resortes	5.5 - 9	0.7 - 0.9
Siembra:		
Distribuidora	6.5 - 10	0.55 - 0.75 +*
Sembradora de granos	4 - 9	0.6 - 0.8 +*
Sembradora de hilera		
Maíz, algodón, soya	5.5 - 10	0.5 - 0.8 +
Legumbres y la mayoría de los otros cultivos	4 - 7	0.5 - 0.8 +
Cosecha:		
Combinada automotriz en cereales y maíz (Puede bajar a 1 km/h)	3 - 5.5	0.65 - 0.8 *
Cosechadora de mazorcas	3 - 6.5	0.6 - 0.75
Cosechadora de algodón (tipo de bobinas)	2.5 - 5.5	0.6 - 0.75
Cosechadora de algodón (tipo de arrancador)	3 - 6.5	0.6 - 0.75
Cosechadora de forraje (tipo cilindro cortador)	3 - 7	0.5 - 0.75
Empacadora de heno	3 - 8	0.7 - 0.9
Segadora	5.5 - 9	0.8 - 0.9
Segadora/acondicionadora	5.5 - 8	0.8 - 0.9 +
Rastrillo	5.5 - 11	0.8 - 0.9 +
Hileradora automotriz	5.5 - 9	0.75 - 0.85
Varios:		
Distribuidora de fertilizantes	5 - 8	0.5 - 0.75 +*
Picadora de rastrojo	5 - 10	0.8 - 0.9 +
Aspersor	5 - 8	0.5 - 0.75 +*

* Ref. 1.

+ Estimado por los autores

* Depende mucho del sistema de rellenar las tolvas o en descargar los tanques.

BIBLIOGRAFIA

1. ASAE. Agricultural machinery management data. ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE. 1976. pp. 322-329.
2. BOWERS, W. Modern concepts of farm machinery management. Champaign, Ill., USA, Stipes Publishing Co., 1970.
3. FAIRBANKS, G.E., LARSON, G.H., CHUNG, D. Cost of using farm machinery. Trans. ASAE 14(1):98-101. 1971.
4. HUNT, D. Farm power and machinery management. 6th edition. Ames, Iowa, USA, Iowa State University Press, 1973. 324 p.

ANEXO 4.

Guía aproximada de vida útil de la maquinaria relacionada con el uso anual para gran Bretaña.

Ref. Culpin, C. *Profitable farm mechanization*, 3rd edition, 1975, Grenada Publishing Ltd, PO Box 9, Frogmore, St Albans, Herts, UK. 320 p.).

Maquinaria	Uso anual (horas)					
	25	50	100	200	300	
Grupo 1: Arado, cultivador, rastra de púas, azada, rodillo, surcadora, sembradora de papa simple, limpiadora de grano.	12+	12+	12+	12	10	
Grupo 2: Rastra de discos, sembradora de cereales, amarradora, secadora de granos, molino y mezclador de alimentos.	12+	12+	12	10	8	
Grupo 3: Combinada automotriz, empacadora de heno, cultivador giratorio (<i>rotavator</i>), cargador hidráulico.	12+	12+	12	9	7	
Grupo 4: Segadora, cosechadora de forraje, rastrillo, acondicionadora de heno, sembradora de papas semiautomática, transplantadora, sembradora de precisión, despoblador mecánico de raíces, cortadora de cercas vivas.	12+	12	11	8	6	
Grupo 5: Distribuidora de fertilizantes, sembradora/abonadora, esparciadora de estiércol, cavadora de papas, aspersor, cortador/hilerador de arveja.	10	10	9	8	7	
Varios: Cosechadora de remolacha azucarera	11	10	9	6	5	
Cosechadora de papa	—	8	7	5	—	
Equipo de ordeño mecánico	—	—	—	12	10	
	Uso anual (horas)					
	500	750	1000	1500	2000	2500
Tractores	12+	12+	10	7	6	5
Motores eléctricos	12+	12+	12+	12+	12	12

ANEXO 5.

Estimación del costo anual de repuestos y reparación como porcentaje del costo inicial de acuerdo con las horas de uso (cifras de Gran Bretaña).

Ref. Culpin C. *Profitable farm mechanization*, 3rd edition, 1975, Granada Publishing Ltd, PO Box 9, Frogmore, St Albans, Herts, UK. 320 p.).

NOTA: Se debe ajustar las cifras al considerar que una máquina de elevado costo tiene buena durabilidad y prestigio o que lleva un costo reducido por tener una vida corta y poca durabilidad.

Maquinaria	Uso anual (horas)				Para cada 100 horas adicionales SUMAR
	500	750	1000	1500	
Tractores	% 5	% 6.7	% 8	% 10.5	% 0.5
Herramientas	Uso anual (horas)				Para cada 100 horas adicionales SUMAR
	50	100	150	200	
Cosecha:	%	%	%	%	%
Combinada automotriz y de tiro con motor individual.	1.5	2.5	3.5	4.5	2
Combinada de tiro con mando por eje TDF, cosechadora de forraje con picadora, empacadora de heno, cosechadora de papas y remolacha azucarera.	3	5	6	7	2
Otros:					
Grupo 1:					
Arado, cultivadora, segadora, amarradora, cortador/hilerador de arveja — todo en suelos normales.	4.5	8	11	14	6
Grupo 2:					
Cultivador giratorio (<i>rotavator</i>), segadora, amarradora, cortador/hilerador de arveja.	4	7	9.5	12	5
Grupo 3:					
Rastra de discos, distribuidora de fertilizantes, esparcidora de estiércol, sembradora/abonadora para cereales, sembradora/abonadora de papas, aspersor, cortadora de cercas vivas.	3	5.5	7.5	9.5	4
Grupo 4:					
Rastrillo, acondicionadora de heno, sembradora de precisión, cosechadora de forraje sin picadora, sembradora de papa semiautomática, transplantadora, despobladora de plantas.	2.5	4.5	6.5	8.5	4
Grupo 5:					
Sembradora de cereales, equipo de ordeño mecánico, sembradora de papas simple.	2	4	5.5	7	3
Grupo 6:					
Secadora de granos, limpiadora de grano, rodillo, molino de martillo, mezcladora de alimentos y trilladora.	1.5	2	2.5	3	0.5

ANEXO 6.

Un método simple para la conversión de unidades y dimensiones ha sido desarrollado por Walshaw¹, que facilita la eliminación de los errores de cálculo.

Considerar la relación: $100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$

Entonces: $\frac{100 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 1$

Este factor de conversión tiene valor de unidad, lo que significa que se puede multiplicar cualquier cantidad con el factor sin cambiar su valor, aunque sí cambiando sus unidades.

Por ejemplo: $144 \text{ cm} = 144 \text{ cm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 1.44 \text{ m}$

Es muy común en los formularios de ingeniería agrícola encontrar varias unidades pero el método indicado facilita los cálculos sin necesitar recordar más que unas pocas conversiones, tal como se incluyen en el Anexo 7.

Ejemplo: ¿Cuál es la potencia en kW desarrollada en la barra de tiro de un tractor halando una fuerza de 2 100 kg con una velocidad de 5 km/h?

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= \text{Fuerza} \times \text{velocidad} \\ &= 2\,100 \text{ kg} \times 5 \text{ km/h} \end{aligned}$$

Aunque ésta es una solución correcta, las unidades no son las más convenientes, si bien se puede cambiar de la manera indicada anteriormente:

$$\text{Potencia} = 2\,100 \text{ kg} \times 5 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{1\,000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3\,600 \text{ seg}}$$

Se observa que las unidades ya están cambiadas hasta las unidades básicas del Sistema Internacional indicado en el Anexo 7.

$$\text{Potencia} = \frac{2\,100 \times 5 \times 9.81 \times 1\,000}{3\,600} \quad \frac{\text{Nm}}{\text{seg}}$$

Finalmente, se considera la definición del vatio (W) o la unidad de potencia así:

$$\text{Potencia} = 28\,612.5 \quad \frac{\text{Nm}}{\text{seg}} \quad \frac{1\, \text{W}}{1\, \text{Nm/seg}} \quad \frac{1\, \text{kW}}{1\,000\, \text{W}}$$

$$\underline{\text{Potencia} = 28.6125\, \text{kW}}$$

Solamente es necesario recordar unas conversiones simples y entrar las relaciones por arriba y abajo dentro de cada paréntesis, tal como está indicado.

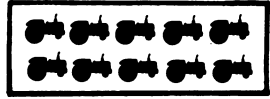
BIBLIOGRAFIA

1. WALSHAW, A.C. Engineering units and worked examples. London, UK, Blackie, 1964. 84 p.

ANEXO 7.

**Unidades métricas y sus conversiones
(El Sistema Internacional)**

Dimensión	Unidad preferida en Ingeniería Agrícola	Otras unidades para Ingeniería Agrícola	Algunas conversiones Simples
Largo	metro (m)	milímetro (mm) kilómetro (km)	1 pulg = 25.4 mm 1 pie = 0.305 m 1 milla = 1.61 km
Area	metro ² (m ²)	milímetro ² (mm ²) centímetro ² (cm ²) hectárea (ha)	1 ha = 10 000 m ² 1 ha = 2.47 acre
Volumen	metro ³ (m ³)	litro (l)	1 m ³ = 10 000 litros 1 gal (US) = 3.785 l 1 gal (Imp) = 4.54 l 1 l = 36.4 bushel
Masa	gramo (g) kilogramo (kg)	tonelada métrica (tm)	1 tm = 1 000 kg 1 lb = 0.454 kg 1 oz = 28.4 g
Densidad	g/cm ³		
Fuerza	Newton (N)	kN kgf (la 'f' significa fuerza, pero muchas veces es olvidada).	1 kgf = 9.81 N 1 tmf = 1 000 kgf 1 lbf = 4.45 N
Presión o esfuerzo	Pascal (Pa) = 1 N/m ²	kN/m ² bar	1 bar = 100 kPa 1 bar = 14.5 lbf/pulg ² 1 lbf/pulg ² = 6.89 kN/m ²
Energía	Joule (J) = 1 Nm	kNm	1 pie-lbf = 1.36 J
Torque	Nm	kNm	1 lbf-pie = 1.36 Nm
Potencia	Vatio (W) = 1 Nm/seg kilovatio (kW) = 1 kNm/seg		1 hp = 0.746 kW



COMPORTAMIENTO DEL TRACTOR EN EL CAMPO

10.1 LA POTENCIA DEL TRACTOR

10.1.1 Generalidades

El tractor agrícola constituye una fuente de potencia móvil para la realización de varias operaciones de campo. Los tractores antiguos utilizaban la barra de tiro y con frecuencia una polea para operar, por medio de una banda, maquinaria estacionaria. El tractor moderno típico lleva sus herramientas sobre los tres puntos y aplica su potencia por medio de la tracción en las llantas y por el eje de toma de fuerza. Además, se requiere cierta potencia al operar un sistema hidráulico complejo para el control de las herramientas y con frecuencia para la dirección, los frenos o servicios auxiliares.

A causa de la variación en las condiciones del medio, las antiguas pruebas de campo ya no sirven como base de comparación de rendimiento entre los tractores; es necesario aplicar algún sistema mucho más comparable, por lo que se ha desarrollado pruebas internacionales en Nebraska, EE.UU., y Europa con las cua-



Fig. 238. Realización de una prueba de fuerza y potencia en la barra de tiro, sobre una pista especial. El vehículo de carga lleva instrumentos para grabar en forma continua la información (NIAE, Silsoe, Bedford, RU).

les definir con alta precisión las condiciones reales durante la prueba. Esto significa también que sus resultados pueden servir como referencia para otra situación en cualquier lugar del mundo (Figs. 238 y 239).

Estas pruebas cubren un rango amplio de las características de rendimiento del tractor agrícola, y sus detalles pueden ser estudiados en la Bibliografía respectiva, en la que se incluye pruebas de tracción, del eje de toma de fuerza, del sistema hidráulico, las dimensiones y características, el consumo de combustible, el ruido y la resistencia de la estructura de seguridad, entre otros. Los resultados, entonces, forman una base de comparación del rendimiento de las distintas marcas y modelos^{1,4,6,14,15,18,19}. Es importante observar que las condiciones de estas distintas pruebas difieren ligeramente entre ellas, lo que puede ocasionar una variación de hasta 5 % en los resultados para el mismo motor o tractor.



Fig. 239. Prueba internacional de la potencia en el eje de toma de fuerza (NIAE, Silsoe, Bedford, RU).

10.1.2 La potencia al volante (P_e)

Dado que el motor nunca se extrae del tractor como fuente de potencia aparte, normalmente no se hace pruebas, fuera de la fábrica, del motor a su volante. A pesar de esta observación los fabricantes a veces citan la potencia del motor al volante como información adicional; técnicamente esto indica la potencia medida en el eje cigüeñal sin sus accesorios, en el caso de BS Au 141a:1971⁶, o con todos los accesorios del motor puestos como generador, radiador, ventilador, etc. en las pruebas de DIN 70020^{8,18} y SAE J 270¹⁹. La información también puede servir como indicador de la potencia total disponible en el motor para hacer funcionar todos sus mecanismos y accesorios. Para el efecto del análisis que sigue se llama potencia al volante a la potencia efectiva del motor P_e .

10.1.3 Rendimiento del tractor en el eje de toma de fuerza

Se puede medir el rendimiento del motor en el eje de toma de fuerza, en forma conveniente, con un dinamómetro, como se muestra en la Fig. 240.

Las características interesantes para un rango de velocidades son las siguientes:

10.1.3.1 Potencia al eje de toma de fuerza (P_o)

Esta potencia P_o está medida en kW o hp ($1\text{kW} = 1.34\text{ hp}$). Equivale al producto de la velocidad del eje de toma de fuerza por el torque desarrollado en el mismo eje:

$$P_o = 2\pi N T_o$$

en donde

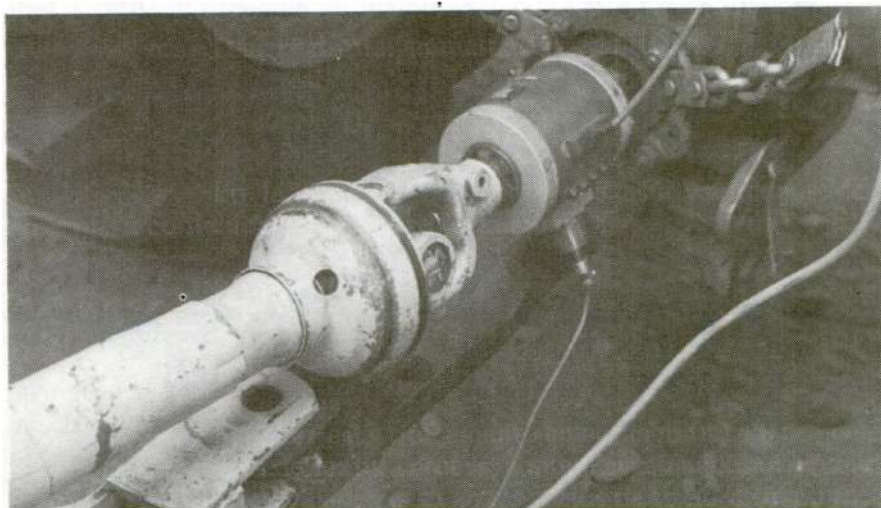
$$P_o = \text{potencia en kW}$$

$$N = \text{velocidad del eje en rev/seg}$$

$$T_o = \text{torque en el eje en kNm}$$



- (a) El eje 'cardan' del tractor bajo prueba, acoplado a un dinamómetro hidráulico que permite la medición directa de la potencia desarrollada. Un generador en el vehículo y el instrumento electrónico sobre el dinamómetro permiten realizar el control por medio del dinamómetro adicional mostrado en (b).



- (b) Un dinamómetro electrónico que permite la medición de la velocidad, torque y potencia en el eje de toma de fuerza del tractor.

Fig. 240. Dos distintos tipos de dinamómetro para medir la potencia, en el eje de toma de fuerza del tractor.

Tres puntos en la característica son de interés para indicar el comportamiento del tractor en el campo; la potencia máxima, el aumento del torque al bajar las revoluciones (véase 10.1.3.2), y la potencia al trabajar el eje de toma de fuerza a 540 rpm o 1 000 rpm de acuerdo al tipo de eje (Fig. 241). Estas dos velocidades son las normales para operar herramientas agrícolas.

10.1.3.2 Equivalencia del torque al cigüeñal (T_{eq})

Aunque se mide directamente el torque en el eje de toma de fuerza T_o , es normal convertir este valor en su equivalente desarrollado en el cigüeñal del motor, con la presunción de que no ocurre ninguna pérdida de potencia.

Entonces:
$$T_{eq} = T_o \frac{N_o}{N_e}$$

en donde (N_o/N_e) es la relación de velocidades del eje de toma de fuerza y el motor (indicado en el catálogo del fabricante).

En esta característica se debe buscar un aumento del torque (en inglés *torque back-up*) de por lo menos 10 % entre el torque con la potencia al máximo y el torque máximo (puntos A y B en la Fig. 241): éste permite halar más fuertemente en las condiciones difíciles de campo sin la necesidad de cambiar la marcha y es preferible que su valor sea entre 20 y 25 %; es conveniente también si el torque máximo se alcanza a una velocidad de entre 60 y 70 % de la velocidad máxima del motor sin carga.

10.1.3.3 Consumo de combustible

Este parámetro es la relación del consumo total con la potencia desarrollada. Se indica en g/kWh y constituye una medición de la eficiencia de la conversión de energía del combustible en trabajo útil.

10.1.3.4 Consumo específico de combustible

El consumo total de combustible se expresa normalmente en kg/hora. Obviamente, bajo cierto ajuste de la palanca del regulador del motor, el consumo aumenta con la velocidad (Fig. 241).

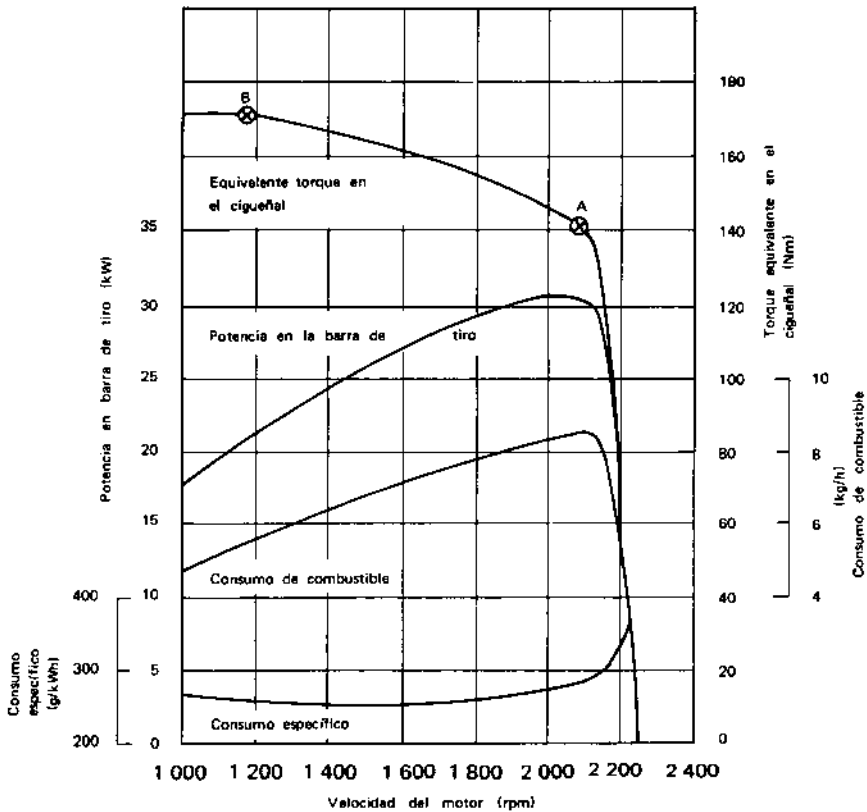


Fig. 241. Resultados típicos de un tractor de 30 kW (400 hp) obtenidos en el NIAE, Inglaterra. Obsérvese la presentación de varias características en el mismo gráfico¹⁻⁶.

Se puede comparar su valor entre diferentes tractores y es importante estudiar su característica en todo el rango de velocidad del motor. En Europa, Mathews¹⁶ estima que una diferencia del 15 % en el consumo específico entre tractores puede ocasionar una diferencia de 2 % en el costo total de operación. Los valores típicos para los tractores modernos de diesel están en el rango de 175 a 250 g/kWh (0.2 a 0.3 l/kWh).

10.1.3.5 Presentación de los resultados de la prueba

La Fig. 241 indica la forma más común de presentar los resultados de una prueba efectuada en el eje de toma de fuerza de un tractor. Los valores cubren un rango amplio de velocidad del motor y todas las curvas se presentan en el mismo gráfico.

10.1.4 El rendimiento del tractor en la barra de tiro

10.1.4.1 Método de prueba

Se recomienda realizar esta prueba sobre una pista especial de concreto o pavimento para poder reproducir sus resultados (Fig. 238); también puede hacerse en el campo, como se indica en la Fig. 242, para estudios de tracción u otros bajo condiciones reales, si bien esto no permite aplicar fácilmente los resultados en otras condiciones.

La Fig. 243 presenta las principales mediciones realizadas. El tractor remolca cierta carga, que incluso puede ser otros tractores trabajando en una marcha más baja. Un dinamómetro como el de la Fig. 244 indica la fuerza F_x en la barra de tiro del tractor bajo prueba; se mide la distancia (d) de traslado en un tiempo (t), según un cierto número de revoluciones (N) de las ruedas del tractor y así se determina la potencia en la barra de tiro P_F

$$P_F \text{ (kW)} = \frac{F_x \text{ (kN)} \cdot d \text{ (m)}}{t \text{ (seg)}}$$

Las unidades de la fuerza F_x se miden en kilonewton (kN), en donde

$$1 \text{ 000 kg} = 9.81 \text{ kN} \quad (\text{véase Anexo 7})$$

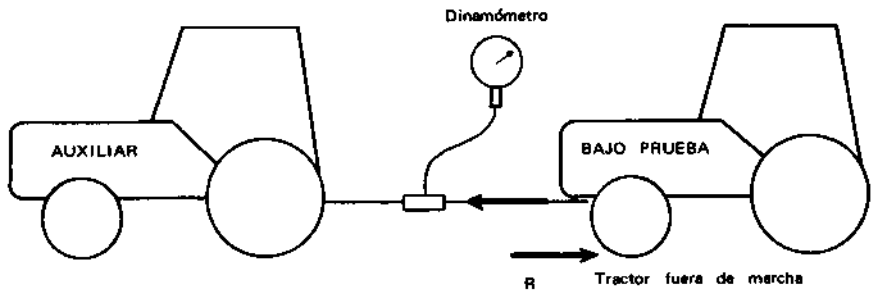


Fig. 242. Realización de una prueba de fuerza en la barra de tiro de un tractor. Los dos últimos tractores sirven para frenar al primero bajo prueba (véase Fig. 243).

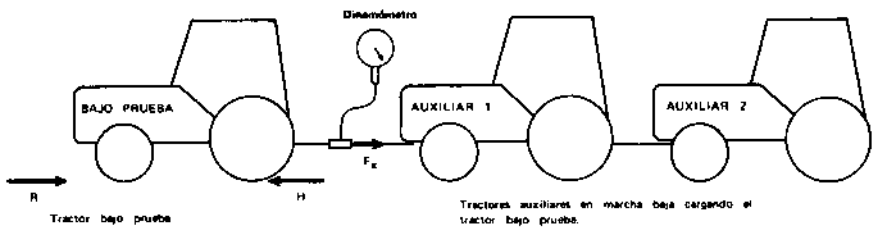
Además, se realiza la medición de la distancia de traslado en las mismas N revoluciones pero sin patinaje, como está indicado ya en la Sección 9.3.2. Así se puede determinar el patinaje ocurrido con esta fuerza en la barra de tiro F_x .

10.1.4.2 Interpretación de los resultados

Las pruebas internacionales requieren un estudio del comportamiento del tractor en todas sus marchas de velocidad. También se debe especificar la naturaleza de la superficie de la pista, el peso y su distribución en el tractor, la marcha utilizada, el tipo de llantas u oruga, naturaleza de los contrapesos y la altura de la barra de tiro.

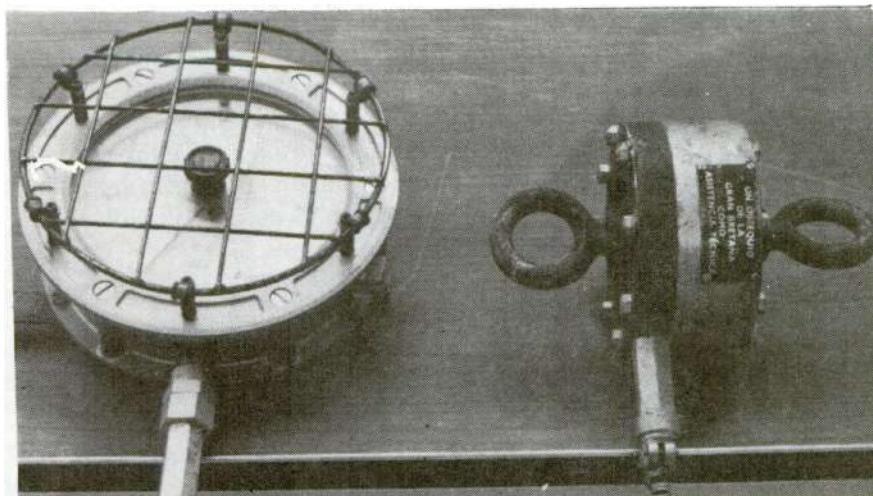


- (a) Medición de la resistencia a rodado (R) del tractor bajo prueba, al remolcarlo fuera de marcha.

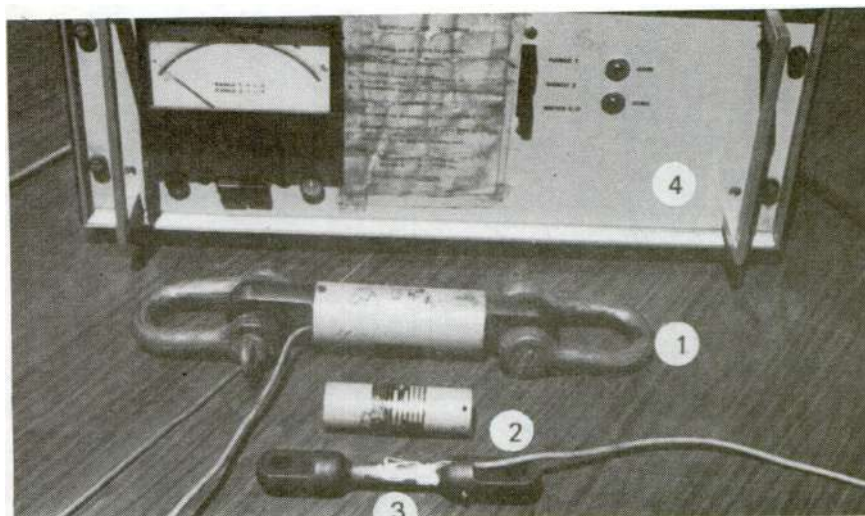


- (b) Tractores auxiliares en marcha baja cargando el tractor bajo prueba.

Fig. 243. Sistema para cargar la barra de tiro del tractor bajo prueba y medir directamente la fuerza F_x . Se determina la fuerza de tracción H de la relación $H = F_x - R$.



- a) Dinamómetro hidráulico que desarrolla una presión en el aceite, debido a la fuerza de tiro. El medidor de presión está conectado a una manguera flexible y provee la lectura.



- b) Dinamómetro electrónico ensamblado (1) y desarmado (2). La fuerza de tiro ocasiona deformación del metal, que es medida por los resistores pegados en la superficie (3). Un cable va al instrumento medidor (4).

Fig. 244. Dos tipos de dinamómetro para medir la fuerza en la barra de tiro.

La Fig. 245 muestra una familia de características de la potencia contra la fuerza en la barra de tiro. Se nota una buena distribución de las marchas de velocidad, lo que permite trabajar con alta potencia en todo el rango de fuerza de arrastre indicado. Normalmente los resultados de la prueba presentan solamente la potencia máxima alcanzada en cada marcha, indicando también la fuerza F_x , el patinaje, velocidad de avance y del motor, el consumo de combustible y las características ambientales al momento de la prueba.

En las Figs. 219 a 221 se indicó cómo pueden ser graficados los resultados del patinaje contra la fuerza en la barra de tiro, por ejemplo en los estudios de tracción.

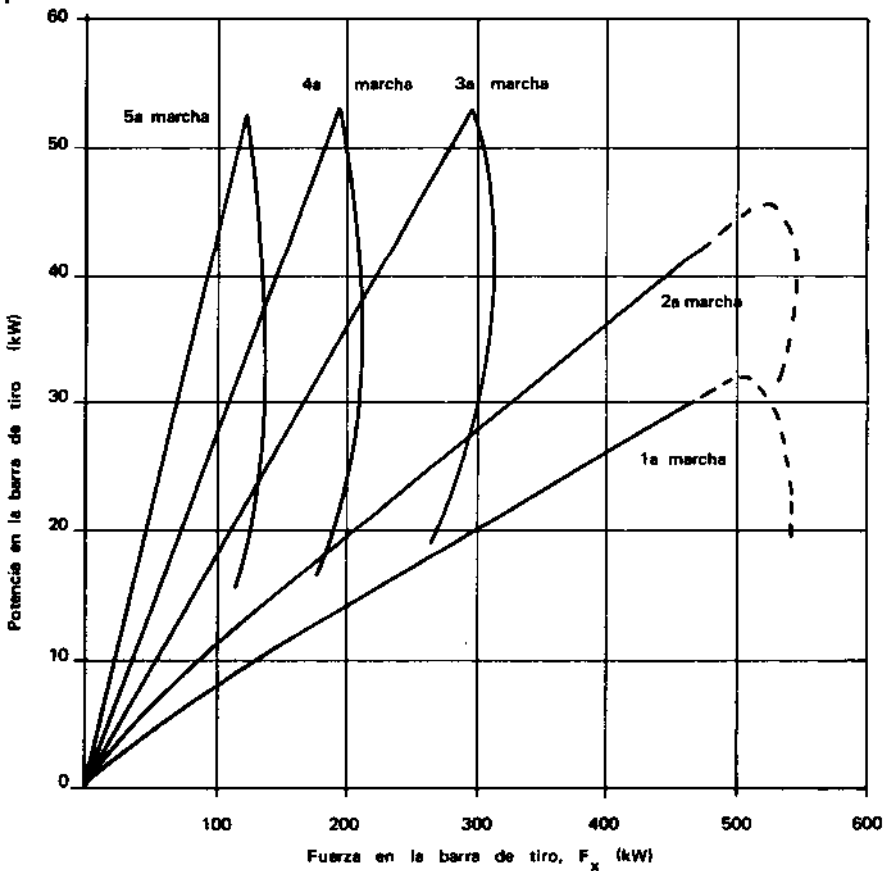


Fig. 245. Resultado típico de la prueba de barra de tiro de un tractor de 60 kW (90 hp), en una pista especial. Se nota una buena distribución de las marchas, cubriendo todo el rango de fuerzas en la barra de tiro.

10.2 LA EFICIENCIA DEL TRACTOR EN EL CAMPO

10.2.1 La potencia del tractor en el trabajo

Se observó que la potencia al volante del motor del tractor agrícola es utilizada y desperdiciada en varias formas. La Fig. 246 indica la potencia útil obtenida en el eje de toma de fuerza P_O y en la barra de tiro P_F del poder de un tractor con una potencia de P_e al volante. Las pérdidas principales de potencia analizadas a continuación se originan principalmente por temperatura ambiental y altura sobre el nivel del mar donde trabaja el tractor, el diseño y la construcción de la transmisión, los efectos de gravedad al subir o bajar las pendientes y el patinaje y resistencia al rodado en el campo. Además, ocurren otras pérdidas no consideradas aquí por ser menores, tales como el ruido, la vibración, el viento.

10.2.2 Efecto de la temperatura ambiental

La temperatura afecta principalmente la densidad del aire inducido a los cilindros del motor y su elevación disminuye la masa del aire entrante. El efecto sobre la potencia desarrollada al volante depende de la relación combustible/aire en el diseño del motor y también su facilidad para la inducción del aire. En Gran Bretaña se recomienda un gráfico⁶ para corregir la potencia y el torque medido en un motor bajo prueba, el que depende de la presión barométrica (entre 710 y 780 mm Hg), la temperatura ambiental (entre 5° y 45°C) y la relación combustible/aire. La norma alemana⁸ recomienda la siguiente ecuación para corregir los resultados en 20°C y 760 mm Hg de presión barométrica:

$$P_{\text{cor}} = P_{\text{med}} \cdot \frac{760}{p} \cdot \sqrt{\frac{273 + T}{273 + 20}}$$

en donde

$$P_{\text{cor}} = \text{Potencia corregida para } 20^{\circ}\text{C y } 760 \text{ mm Hg presión barométrica}$$

$$P_{\text{med}} = \text{Potencia medida a } T^{\circ}\text{C y } p \text{ mm Hg presión barométrica.}$$

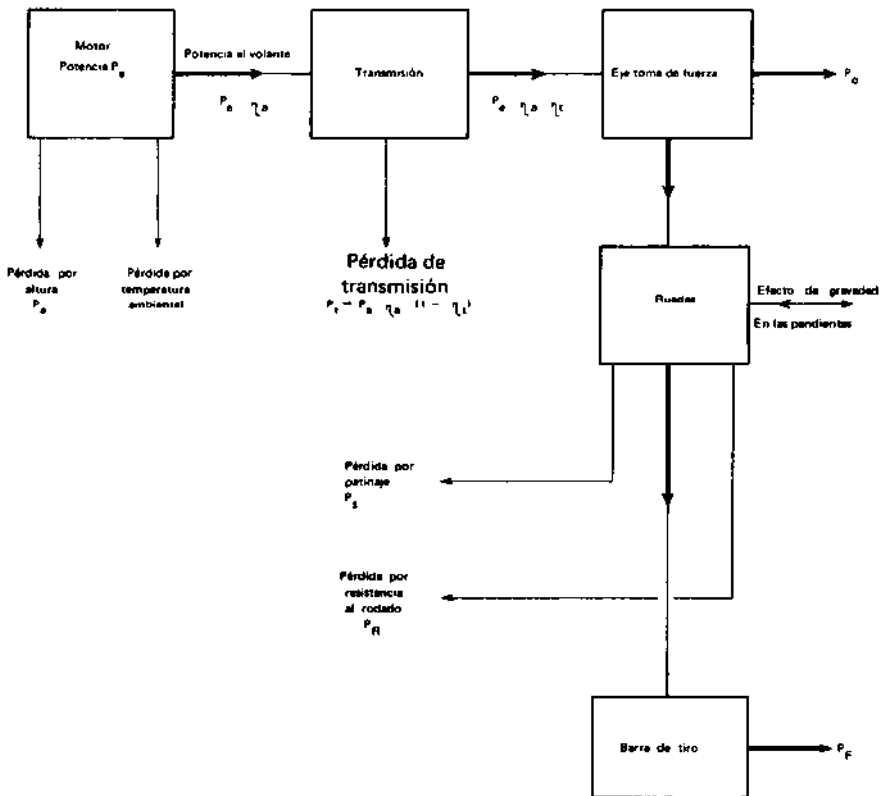


Fig. 246. Diagrama de flujo de potencia de un tractor indicando las pérdidas que afectan el rendimiento en la barra de tiro y en el eje de toma de fuerza.

Judge^{1 2} recomienda una corrección más simple, que también puede servir como regla básica: 1 % por cada aumento en la temperatura ambiental de 5.5°C (10°F) mayor que 15.5°C (60°F).

10.2.3 Efecto de la altura sobre el nivel del mar

La densidad del aire disminuye notablemente con la altura tal como su valor disminuye en un 50 % con una altura de 6 000 m. Existen grandes áreas en Suramérica y Africa en donde es común que los tractores trabajen entre 2 000 y 4 000 m. Los estudios realizados en Ecuador^{2 3, 2 6} indican que la pérdida en alturas menores depende mucho de la relación combustible/aire administrado al motor. Una relación baja no muestra mucho efecto hasta los 500 m, por existir un exceso de aire entrando al motor. En cambio, con una relación alta de unos 60 mm³/1, que es común en los tractores agrícolas, se observa una pérdida de potencia de aproximadamente 1 % por cada 100 m de altura. Esta relación es aproximadamente lineal en el rango estudiado, de 0 hasta 3 700 m. Los estudios también indicaron la posibilidad de compensar en casi su totalidad estas pérdidas al equipar el motor con un sobrealimentador de aire (Fig. 247) que permite inducir más aire poco denso a los cilindros. No se recomendó esta práctica para alturas menores de 1 500 m sin consultar al fabricante del tractor^{2 4, 2 5}.

Según esto, se puede estimar en forma aproximada la pérdida de potencia por altura P_a para los motores con una relación elevada de combustible/aire (*highly rated*) en la siguiente forma:

$$\text{Pérdida por altura } P_a = \frac{P_e h}{10\,000}$$

en donde h = altura en metros

Es conveniente definir la eficiencia de comportamiento del motor en las alturas η_a , en donde:

$$\eta_a = \frac{\text{Potencia al volante en las alturas}}{\text{Potencia al volante a nivel del mar}} \quad (1)$$

$$\text{Entonces } P_a = P_e (1 - \eta_a) \quad (2)$$

en donde $\eta_a = \left(1 - \frac{h}{10\,000}\right)$ (3)

para las circunstancias anteriormente definidas.

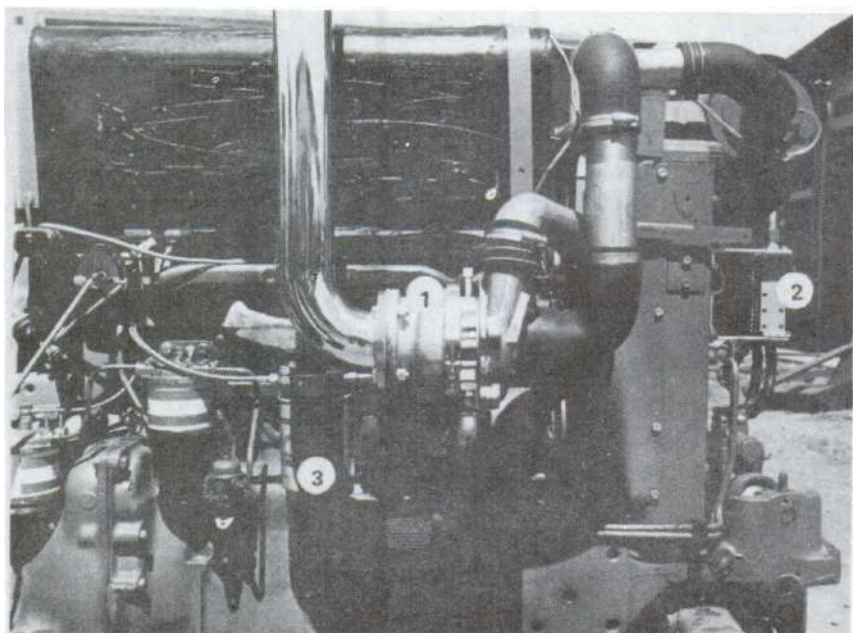


Fig. 247. Un turbocargador colocado en un tractor de 45 kW como accesorio, para uso en la Sierra Andina (3 000 m de altura). Consiste de una turbina mandada por gases en el tubo de escape y montada sobre el mismo eje que lleva un compresor para impulsar el aire que entra en los cilindros (1). El aceite de lubricación, que es el mismo que para el motor, necesita un enfriador (2) y un filtro adicional (3).

10.2.4 La eficiencia de la transmisión

Las pérdidas ocasionadas en la transmisión se deben principalmente a la fricción entre los engranajes y la viscosidad del lubricante.

Se define la eficiencia de la transmisión η_t en los siguientes términos:

$$\eta_t = \frac{\text{Potencia entregada de la transmisión}}{\text{Potencia entregada del motor}} \quad (4)$$

Una transmisión mecánica muestra una eficiencia η_t normal entre 92 % y 96 %, mientras que los sistemas hidrostáticos o hidrocínicos están entre 75 % y 85 %.

La ecuación (1) indica que la potencia entregada del motor a la transmisión es $\eta_a P_e$.

Entonces:

$$\text{Potencia entregada por la transmisión} = P_e \eta_a \eta_t \quad (5)$$

y además:

$$\text{Potencia perdida en la transmisión } P_t = P_e \eta_a (1 - \eta_t) \quad (6)$$

10.2.5 Efecto de gravedad en las pendientes

En la Sección 6.3.1 se analizó las fuerzas que actúan en un tractor al subir con velocidad uniforme una pendiente. La situación es complicada en cuanto la resistencia al rodado (R) y la fuerza de arrastre (F) normalmente cambiará de acuerdo con la pendiente (β) pero el gasto de potencia en la subida se puede aproximar por efectos de gravedad como sigue (Fig. 248):

$$\begin{array}{l} \text{Potencia necesaria para} \\ \text{suprimir efectos de gravedad} \end{array} = G_t v \text{ sen } \beta$$

en donde G_t = peso del tractor

v = velocidad de avance por la pendiente

Obviamente, al bajar una pendiente esta potencia es suministrada a las ruedas del tractor.

10.2.6 La eficiencia del patinaje

El patinaje (s) representa, como se indicó en la Sección 9.3, una reducción en la distancia recorrida y la velocidad teórica del tractor. Puede utilizarse para definir la eficiencia al ocasionar el traslado del tractor, así:

$$\eta_s = 1 - s \quad (7)$$

Debido a que esta eficiencia tiene su base en la potencia entregada a las ruedas del tractor, se puede calcular la pérdida de potencia por patinaje (P_s) como sigue:

$$P_s = (1 - \eta_s) (P_e - P_a - P_t) \quad (8)$$

$$P_s = s (P_e - P_a - P_t) \quad (9)$$

10.2.7 Efecto de la resistencia al rodado

En la Sección 9.2 se describió las características de la resistencia al rodado (R) y se presentó una definición del coeficiente de la resistencia al rodado (ψ):

$$\psi = \frac{R}{Q} \quad (10)$$

en donde Q es la carga normal de la rueda o ruedas sobre la superficie. Normalmente se puede estimar este coeficiente según el estudio de la Fig. 217 o por el método de ASAE⁴ con base en la medición del Índice de Cono en el campo con un penetrómetro⁵ (véase numeral 9.2).

Así, se puede estimar la resistencia al rodado (R)

$$R = Q \psi \quad (11)$$

La Fig. 248 representa una simplificación de las fuerzas externas que actúan sobre el tractor al trabajar en una superficie plana.

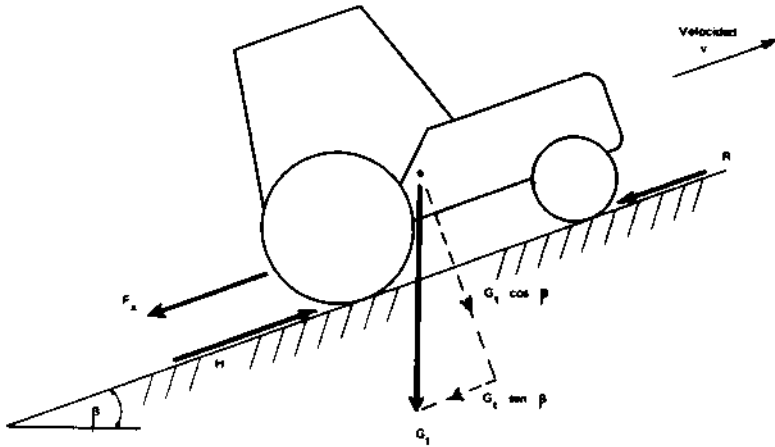


Fig. 248. El efecto en el tractor al subir una pendiente es que requiere una potencia adicional de $G_t v \sin \beta$.

El componente F_x paralelo con la superficie es la fuerza utilizada para halar la herramienta. Se puede definir la eficiencia de la resistencia al rodado η_R en los siguientes términos:

$$\eta_R = \frac{F_x}{H} \quad (12)$$

Entonces en la superficie plana

$$\eta_R = \frac{F_x}{F_x + R} \quad (13)$$

10.2.8 La eficiencia total de tracción

Ya se ha definido las eficiencias principales del tractor debido a la altura (η_a) (Ecu.1), la transmisión (η_t) (Ecu.3), el patinaje (η_s) (Ecu.6) y la resistencia al rodado (η_R) (Ecu.12 y 13). Conviene definir la eficiencia total de tracción (η_F) con base en las demás eficiencias¹¹.

$$\eta_F = \eta_a \eta_t \eta_s \eta_R \quad (14)$$

Este valor η_F indica la eficiencia del tractor al convertir la potencia de su motor en potencia a la barra de tiro, o sea:

$$\eta_F = \frac{P_F}{P_e} \quad (15)$$

10.3 EJEMPLOS DE CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL TRACTOR EN EL CAMPO

10.3.1 Tractor en una pista pavimentada

Un tractor con peso de 40 kN tiene una potencia de 50 kW al volante y trabaja a nivel del mar en una marcha con velocidad teórica de avance de 6 km/h; la eficiencia de la transmisión es de 95 %. La pista pavimentada y plana da un coeficiente de 0.04 de resistencia al rodado, y el patinaje del tractor es 10 %. Calcular las pérdidas de potencia y la eficiencia total de tracción.

Información proporcionada:

$$\begin{array}{ll} G_t = 40 \text{ kN} & \eta_t = 0.95 \\ P_e = 50 \text{ kW} & \psi = 0.04 \\ v_n = 6 \text{ km/h} & s = 0.1 \end{array}$$

Pérdida por altura es cero y entonces

$$\eta_a = 1$$

Pérdida por la transmisión

$$\begin{aligned}
 P_t &= \eta_a (1 - \eta_t) P_e && \text{(Ecu.6)} \\
 &= 1 (1 - 0.95) 50 \\
 \underline{P_t} &= \underline{2.5 \text{ kW}}
 \end{aligned}$$

Velocidad de avance (v) (Sección 9.3.2):

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{v_n - v}{v_n} \\
 v &= v_n (1 - s) \\
 &= 6 (1 - 0.1) \\
 \underline{v} &= \underline{5.4 \text{ km/h}}
 \end{aligned}$$

Eficiencia del patinaje

$$\begin{aligned}
 \eta_s &= 1 - s && \text{(Ecu.7)} \\
 \underline{\eta_s} &= \underline{0.9 = 90 \%}
 \end{aligned}$$

Pérdida de potencia por patinaje

$$\begin{aligned}
 P_s &= s (P_e - P_a - P_t) && \text{(Ecu.9)} \\
 &= 0.1 (50 - 2.5) \\
 \underline{P_s} &= \underline{4.75 \text{ kW}}
 \end{aligned}$$

Resistencia al rodado

$$\psi = \frac{R}{Q} \quad \text{(Ecu.10)}$$

Pero

$$\begin{aligned}
 Q &= G_t = 40 \text{ kN} \\
 R &= 0.04 \times 40 \\
 \underline{R} &= \underline{1.6 \text{ kN}}
 \end{aligned}$$

Pérdida de potencia por la resistencia al rodado

$$P_R = R v$$

$$= 1.6 \text{ kN} \times 5.4 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \left[\frac{1 \text{ h}}{3\,600 \text{ seg}} \right] \left[\frac{1\,000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right] \left[\frac{1 \text{ kW seg}}{1 \text{ kNm}} \right]$$

$$P_R = 2.4 \text{ kW}$$

Potencia a la barra de tiro (Fig. 246)

$$P_F = P_e - P_a - P_t - P_s - P_R$$

$$= 50 - 2.5 - 4.75 - 2.4$$

$$\underline{P_F = 40.35 \text{ kW}}$$

Eficiencia total de tracción

$$\eta_F = \frac{P_F}{P_e} \quad (\text{Ecu. 15})$$

$$= \frac{40.35}{50}$$

$$\underline{\eta_F = 0.807 = 80.7 \%}$$

Fuerza en la barra de tiro

$$F_x = \frac{P_F}{v}$$

$$= \frac{40.35 \text{ kW}}{5.4 \text{ km/h}} \left[\frac{1 \text{ km}}{1\,000 \text{ m}} \right] \left[\frac{3\,600 \text{ seg}}{1 \text{ h}} \right] \left[\frac{1 \text{ kNm/seg}}{1 \text{ kW}} \right]$$

$$\underline{F_x = 26.9 \text{ kN}}$$

Eficiencia de la resistencia al rodado

$$\eta_R = \frac{F_x}{F_x + R} \quad (\text{Ecu.13})$$

$$= \frac{26.9}{26.9 + 1.6}$$

$$\underline{\eta_R = 0.944 = 94.4 \%}$$

Eficiencia total de tracción: se debe anotar que se podría haber obtenido η_R en forma directa de la Ecu.14; en cambio ahora se le utiliza como un chequeo del resultado anterior:

$$\eta_F = \eta_a \eta_t \eta_s \eta_R \quad (\text{Ecu.14})$$

$$= 1 \times 0.95 \times 0.9 \times 0.944$$

$$\underline{\eta_F = 0.807 = 80.7 \%}$$

La Fig. 249 muestra gráficamente estos resultados.

10.3.2 Tractor en trabajo de campo a 3 000 m de altura

Se repetirá el ejemplo anterior pero con el mismo tractor trabajando a una altura de 3 000 m sobre el nivel del mar, en un campo cultivado donde el patinaje es 15 % y el coeficiente de resistencia al rodado es 0.2.

Pérdida por altura

$$\eta_a = \left(1 - \frac{h}{10\,000}\right) \quad (\text{Ecu.3})$$

$$\underline{\eta_a = 0.70 = 70 \%}$$

$$P_a = (1 - \eta_a) P_e \quad (\text{Ecu.2})$$

$$\underline{P_a = 15 \text{ kW}}$$

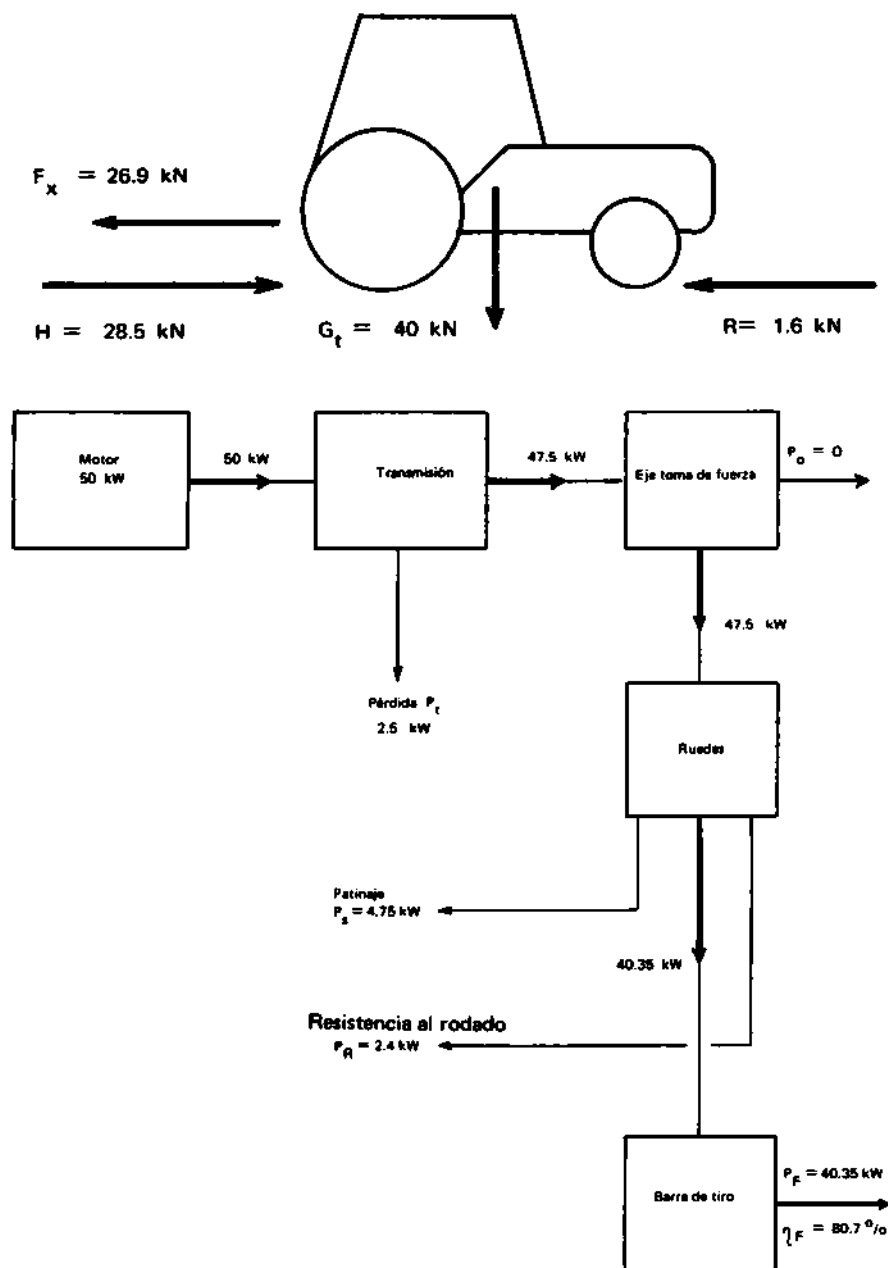


Fig. 249. Diagrama de flujo de potencia y fuerzas en el ejemplo de la sección 10.3.1.

Pérdida por la transmisión

$$P_t = \eta_a (1 - \eta_t) P_e \quad (\text{Ecu.6})$$

$$\underline{P_t = 1.75 \text{ kW}}$$

Velocidad de avance

$$v = v_n (1 - s)$$

$$\underline{v = 5.1 \text{ km/h}}$$

Eficiencia del patinaje

$$\eta_s = 1 - s \quad (\text{Ecu.7})$$

$$\underline{\eta_s = 0.85 = 85 \%}$$

Pérdida de potencia por patinaje

$$P_s = s (P_e - P_a - P_t) \quad (\text{Ecu.9})$$

$$\underline{P_s = 5.0 \text{ kW}}$$

Resistencia al rodado

$$R = \psi Q = \psi G_t \quad (\text{Ecu.10})$$

$$\underline{R = 8 \text{ kN}}$$

Pérdida de potencia por la resistencia al rodado

$$P_R = R v$$

$$\underline{P_R = 11.3 \text{ kW}}$$

Potencia a la barra de tiro

$$P_F = P_e - P_a - P_t - P_s - P_R$$

$$\underline{P_F = 16.95 \text{ kW}}$$

Eficiencia total de la tracción

$$\eta_F = \frac{P_F}{P_e}$$

$$\underline{\eta_F = 0.339 = 33.9 \%}$$

Fuerza en la barra de tiro

$$F_x = \frac{P_F}{v}$$

$$\underline{F_x = 12.0 \text{ kN}}$$

Eficiencia de la resistencia al rodado

$$\eta_R = \frac{F_x}{F_x + R} \quad (\text{Ecu.13})$$

$$\underline{\eta_R = 0.60 = 60 \%}$$

La Fig. 250 presenta gráficamente estos resultados y debe ser comparada con la Fig. 249.

10.3.3 Tractor en trabajo con turbocargador a 3 000 m de altura

Repítase el ejemplo anterior suponiendo que el tractor está provisto con un turbocargador que compensa en casi su totalidad la pérdida de potencia por altura dando una eficiencia $\eta_a = 95 \%$.

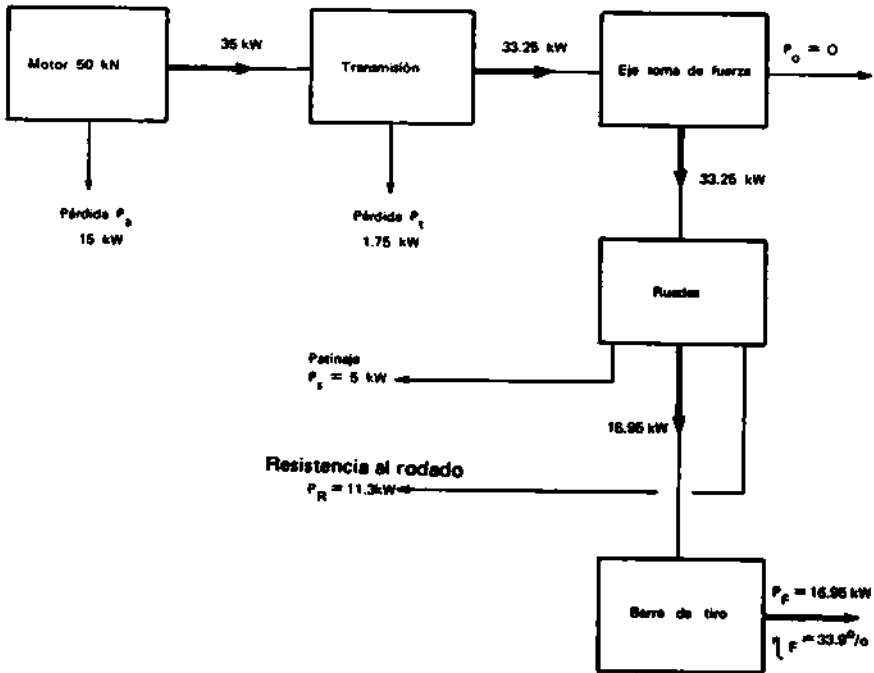
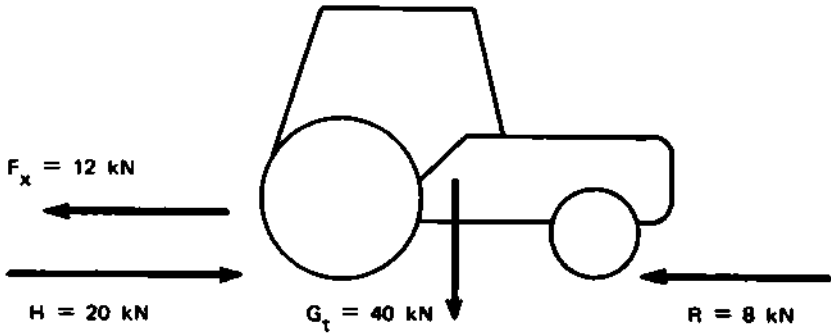


Fig. 250. Diagrama de flujo de potencia y fuerzas en el ejemplo de la sección 10.3.2.

Compruebe que los resultados son los siguientes:

η_a	=	95 %	P_a	=	2.5 kW		
η_t	=	95 %	P_t	=	2.4 kW		
η_s	=	85 %	P_s	=	6.8 kW		
η_R	=	70 %	P_R	=	11.3 kW	R	= 8 kN
η_F	=	54 %	P_F	=	27 kW	F_x	= 19 kN

Este ejemplo demuestra dramáticamente la ventaja de un sistema de sobrealimentación para los tractores que trabajan en las alturas^{2,4,2,5}.

10.4 EL REQUERIMIENTO DE POTENCIA DE LAS HERRAMIENTAS

10.4.1 Generalidades

La potencia requerida para operar diversas herramientas es variable y depende de muchos factores. En los capítulos precedentes se ha discutido los efectos de la textura y humedad del suelo, la naturaleza del material de la herramienta deslizante, sea metálico o plástico, y la velocidad y profundidad de trabajo. A pesar de la posibilidad de predecir la fuerza de arrastre de ciertas herramientas bajo condiciones de campo predeterminadas, una predicción práctica y realista se dificulta por razón de la variabilidad de las condiciones en un campo agrícola. Normalmente se encuentra zonas muy húmedas y mal drenadas, piedras y otros obstáculos que obligan al operador a cambiar la velocidad de trabajo y que requieren del fabricante de las herramientas incorporar mecanismos de seguridad como protección contra dichos obstáculos.

De toda forma, es importante manejar algún método para poder estimar la potencia requerida para operar diversas herramientas en condiciones normales y así permitir seleccionar los tractores y las herramientas en una forma racional; esto también permite un análisis económico del sistema de mecanización seleccionado, como se detalla en el numeral 10.6.

10.4.2 Cálculo del requerimiento de potencia

Existen abundantes informes sobre los requerimientos de potencia de las herramientas, medidas en distintas pruebas de campo. Los resultados antiguos no sirven más que como referencia, dado el desarrollo y mejora en el diseño ocurrido en los últimos años. Posiblemente la mejor solución es consultar la reciente recomendación del *ASAE Yearbook* publicado cada año en esa institución*. El documento No. 230.3⁴ es un ejemplo que presenta la información más reciente con base en pruebas de campo y que considera velocidad de trabajo, accesorios en la herramienta, tipo de suelo, resistencia al rodado, y otros. Alternativamente, el Anexo 2 aglutina las recomendaciones de Kepner, Bainer y Barger¹³ y representa un resumen breve y fácilmente aplicable de las bases de cálculo.

Un ejemplo sobre el requerimiento de potencia es el siguiente:

Estimar el requerimiento de potencia para operar un arado de 4 vertederas en a) un suelo franco-arenoso y b) un suelo arcilloso pesado. Las vertederas tienen un ancho de 30 cm, la profundidad de trabajo es 15 cm y la velocidad de avance es 6 km/h.

$$\text{Area de sección de los surcos} = 4 \times 30 \times 15 \text{ cm}^2$$

$$\text{Area} = 1\,800 \text{ cm}^2$$

Suelo a)

Estimar las fuerzas del Anexo en 4 kN/cm² para un suelo franco-arenoso (un suelo entre liviano y mediano).

$$\text{Fuerza} = 4 \text{ N/cm}^2 \times 1\,800 \text{ cm}^2$$

$$= 7.2 \text{ kN}$$

$$\text{Potencia} = 7.2 \text{ kN} \times 6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \left[\frac{1\,000 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right] \left[\frac{1 \text{ h}}{3\,600 \text{ seg}} \right] \left[\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kNm/seg}} \right]$$

$$\underline{\text{Potencia} = 12 \text{ kW}}$$

(*) ASAE, 2950 Miles Road, St. Joseph, Michigan 49085, Estados Unidos.

Suelo b)

Estimar las fuerzas del Anexo 2 en 9 N/cm^2 para un suelo arcilloso pesado.

$$\begin{aligned} \text{Fuerza} &= 9 \text{ N/cm}^2 \times 1\,8000 \text{ cm}^2 \\ &= 16.2 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{Potencia} = 16.2 \text{ kN} \times 6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \left[\frac{1\,000 \text{ kW h}}{3\,600 \text{ kN km}} \right]$$

$$\underline{\text{Potencia} = 27 \text{ kW}}$$

10.5 LA SELECCION Y EL RENDIMIENTO DE LOS TRACTORES Y SUS HERRAMIENTAS

10.5.1 Aspectos de la selección

La preparación del suelo es normalmente la operación con mayor demanda de potencia de un tractor, por lo que se debe estudiar cuidadosamente estas necesidades y luego considerar con qué otras herramientas puede trabajar el tractor seleccionado. En el numeral 10.4 se indicó cómo determinar el requerimiento de potencia de la herramienta, y en el numeral 10.2 cómo estimar la potencia de un tractor en la barra de tiro y el eje de toma de fuerza. Así, desde el punto de vista técnico la solución parece fácil pero también existen otras consideraciones, por ejemplo la selección de un solo tractor grande con sus herramientas puede presentar una situación insegura en comparación con dos tractores medianos, debido a que una falla mecánica podría paralizar todas las operaciones de campo en la primera situación citada.

Cualquier selección debería también considerar la situación económica, tal como se indica en el numeral 10.6.

10.5.2 Rendimiento en el campo

El rendimiento de varias herramientas en el campo depende de muchos factores pero las encuestas realizadas demuestran los resultados^{1 3} que se indica en el Anexo 3. Se define la eficiencia de campo η_c en los siguientes términos:

$$\eta_c = \frac{\text{Rendimiento actual}}{\text{Rendimiento teórico}} \quad (16)$$

El rendimiento teórico depende de la velocidad de avance (v) y el ancho de trabajo (A):

$$\text{Rendimiento teórico (ha/h)} = \frac{v \text{ (km/h)} \times A \text{ (m)}}{10} \quad (17)$$

Entonces las ecuaciones (16) y (17) permiten estimar el rendimiento actual de la herramienta en el campo.

La eficiencia de campo η_c es influida por la naturaleza del suelo, la topografía, la forma del campo, la densidad y condición del cultivo y la experiencia del operador, siendo factores que se deben considerar al seleccionar un valor del Anexo 3.

Por ejemplo: estimar el rendimiento de una sembradora de cereales de 2.40 m de ancho en terreno ondulado y campos de forma irregular.

Sin mayor detalle, estimar la velocidad de trabajo y la eficiencia con niveles bajos del Anexo 3:

$$v = 5 \text{ km/h}$$

$$\eta_c = 0.7$$

De las ecuaciones (16) y (17)

$$\text{Rendimiento actual} = \frac{5 \text{ (km/h)} \times 2.4 \text{ (m)}}{10} \times 0.7$$

$$\underline{\text{Rendimiento actual} = 0.84 \text{ ha/h}}$$

10.6 LOS COSTOS DE OPERACION

10.6.1 Generalidades

El análisis de los costos de operación es una tarea que depende mucho de las circunstancias en que se encuentra trabajando la maquinaria. La situación en los países en vías de desarrollo típicamente muestra tasas altas de interés, un servicio de repuestos y mantenimiento deficiente y poco adiestramiento y experiencia por parte del operador. Por otro lado, muchos terrenos sólo recientemente han sido mecanizados y es frecuente encontrar obstáculos como piedras y troncos, caminos malos de acceso u otros, que aumentan la posibilidad de fallas mecánicas durante el trabajo. Esto significa que se debe ajustar los cálculos de costos de operación de acuerdo con las condiciones locales.

Las siguientes páginas ofrecen un método simple de evaluación (desarrollado por Schwartz^{20,21}) pero además se aconseja al lector consultar otras fuentes bibliográficas especializadas^{2,4,7,10}.

10.6.2 Costos fijos

Los costos fijos en un sistema de mecanización pueden incluir unos o todos de los siguientes factores:

- a. Depreciación
- b. Interés sobre la inversión
- c. Almacenaje
- d. Seguro
- e. Impuestos

Ellos representan los costos involucrados sin relación al uso de la maquinaria, que pueden ser calculados en la siguiente forma.

10.6.2.1 Depreciación

La depreciación de una máquina se puede estimar en forma más simple con el uso de una relación lineal:

$$\text{Depreciación anual} = \frac{\text{Costo inicial} - \text{valor residual}}{\text{años de vida útil}}$$

$$\text{Depreciación por hora} = \frac{\text{Depreciación anual}}{\text{horas de uso por año}}$$

El Anexo 4 presenta las recomendaciones de Culpin⁷ sobre la vida útil para un rango de maquinaria agrícola en Inglaterra, el que puede ser modificado de acuerdo con las condiciones locales. El valor residual con frecuencia puede ser estimado por un estudio local del mercado de maquinaria de segunda mano o puede tomarse como regla aproximada:

Valor residual de los tractores = 20 % del costo inicial

Valor residual de las herramientas = 10 % del costo inicial

10.6.2.2 Interés sobre la inversión

Este representa el costo al agricultor por no invertir en el mercado local sino en su maquinaria agrícola; se calcula por medio de la tasa de interés local y con base en su inversión promedio:

$$\text{Inversión promedio} = \frac{\text{Costo inicial} + \text{valor residual}}{2}$$

$$\text{Interés por hora} = \frac{\text{Inversión promedio} \times \text{tasa de interés}}{\text{horas de uso por año}}$$

10.6.2.3 Almacenaje, seguro e impuestos

Estos costos dependen mucho de la situación local y del país de estudio. ASAE² recomienda un valor de 2 % del costo inicial en ausencia de otros datos, si bien en circunstancias diferentes se le puede ignorar.

10.6.3 Costos variables

Estos costos dependen de la intensidad del uso que se dé a la maquinaria e incluyen los siguientes rubros:

- a. Reparaciones y mantenimiento
- b. Combustible y lubricantes
- c. Mano de obra

10.6.3.1 Reparaciones y mantenimiento

Algunos autores recomiendan estimar los costos de las reparaciones y el mantenimiento como un porcentaje del costo inicial de la maquinaria; la desventaja de este sistema es que una máquina barata, de poco prestigio, tiene una buena posibilidad de involucrar costos altos de reparación, en comparación con una marca más conocida pero cara. De toda forma, el método es simple y se le puede adaptar las recomendaciones de Culpin⁷ presentadas en el Anexo 5, de acuerdo con las experiencias locales. Lo importante es mantener un registro de costos de las reparaciones dentro de la finca para alcanzar una mejor estimación a través de los años.

10.6.3.2 Combustible y lubricantes

El consumo de combustibles y la necesidad de lubricación se pueden estimar según los manuales de operador para la maquinaria o, como se indicó anteriormente en el numeral 10.1.3.4, en donde se estimó el consumo específico de los motores de diesel, entre 0.2 y 0.3 l/kWh. ASAE^{2,4} presenta varias fórmulas para la computación del consumo.

10.6.3.3 Mano de obra

La mano de obra debe incluir todos los costos extras involucrados, tales como seguridad social, beneficios y otros, calculados con base en el número de días laborales y horas efectivas, fuera de vacaciones, fiestas o permisos de enfermedad.

Además, se debe incluir la consideración de las horas extras, especialmente cuando esto es común, por ejemplo, en la cosecha.

10.6.4 Costos totales de operación

10.6.4.1 Generalidades

El tractor agrícola y un empleado tienen trabajos multipropósitos, por lo que es justificable estimar sus costos con base en el número total de horas de trabajo por año. Las herramientas, en cambio, normalmente tienen un solo uso y su costo de operación por hectárea o por hora depende de la superficie o tiempo de su trabajo específico. Obviamente, los costos por unidad de superficie para una herramienta disminuyen con el aumento de su área de trabajo; por otra

parte, con las superficies grandes es posible que la herramienta seleccionada no pueda terminar el trabajo en el tiempo disponible.

Se puede realizar comparaciones gráficas entre los diferentes sistemas de mecanización disponibles para permitir una mejor base de selección entre ellos; el siguiente ejemplo puede demostrar el método.

10.6.4.2 Ejemplo del cálculo de los costos de operación

El objetivo de este ejemplo es comparar tres sistemas alternativos para cosechar papas y determinar el rango de superficie para justificar cada sistema. La unidad monetaria no tiene mayor importancia pero se refiere a sucres y los costos están analizados con respecto al Ecuador²².

1. Sistema manual:

Se utiliza la mano de obra para cavar la papa y luego llevarla a la bodega o centro de recolección en el campo. No se considera el costo de transporte pero se asume que el trabajador solamente pasa 4 horas/día en la cavada, permitiendo así que también ayude en el transporte de la papa.

$$\text{Rendimiento en cavada}^{22} = 330 \text{ horas-hombre/ha}$$

$$\text{Costo de mano de obra} = \text{S/ } 150/\text{día}$$

$$\text{Tiempo efectivo de trabajo} = 4 \text{ horas}$$

$$\text{Entonces: Costo de mano de obra} = \frac{\text{S/ } 150}{4 \text{ horas}} = \text{S/ } 37.5/\text{hora}$$

$$\text{Costo total de cavada} = \text{S/ } 12\,375/\text{hectárea}$$

Debe notarse que este costo no depende de la superficie cavada ni del número de trabajadores utilizados.

2. Sistema semimecanizado:

Se va a utilizar una cavadora de una hilera, que deja las papas en la superficie para luego ser recogidas a mano ((Fig. 251). En igual

forma que el sistema manual, no se va a considerar los costos de transporte pero se estima que los trabajadores solamente laboran 4 horas/día en la recolección, ayudando el resto del tiempo en el transporte.

Rendimiento de la cavadora^{2 2} = 5 horas-máquina/ha

Rendimiento en la recogida^{2 2} = 100 horas-hombre/ha

Costo de mano de obra = S/ 37.5/hora (véase arriba,
en No. 1)

Costo de tractorista = S/ 100/hora (estimado)



Fig. 251. Una cavadora de papas con cadena elevadora sinfín, que limpia los tubérculos dejándolos en la superficie para su recolección a mano (véase también Fig. 85).

La maquinaria a ser utilizada es la cavadora y un tractor de 35 kW (47 hp). Se asume que el tractor está en uso todo el año en la finca pero obviamente que la cavadora sólo se utiliza para excavar la papa, y entonces su costo depende de la superficie en que trabaja.

2.1 Evaluación del costo del tractor:

Costo inicial	= S/ 400 000 (estimado)
Vida útil	= 10 años con 1 000 horas de uso/año (Anexo 4)
Valor residual	= 20 % costo inicial (véase Sección 10.6.2.1)
Tasa de interés	= 15 % (estimado)

Cálculo de los costos fijos del tractor:

a. Valor residual	= 20 % x S/ 400 000
	= S/ 80 000
Depreciación por año	= $\frac{\text{Costo inicial} - \text{valor residual}}{\text{vida útil}}$
	= $\frac{\text{S/ 400 000} - \text{S/ 80 000}}{10 \text{ años}}$
	= S/ 32 000 por año
Depreciación por hora	= $\frac{\text{Depreciación /año}}{\text{horas de uso/año}}$
	= $\frac{\text{S/ 32 000/año}}{1 000 \text{ horas/año}}$
<u>Depreciación/hora</u>	= <u>S/ 32/hora</u>

$$\begin{aligned}
 \text{b. Inversión promedio} &= \frac{\text{Costo inicial} + \text{valor residual}}{2} \\
 &= \frac{\text{S/ 400 000} + \text{S/ 80 000}}{2} \\
 &= \text{S/ 240 000}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Interés sobre la inversión/año} &= \text{Tasa de interés} \times \text{inversión} \\
 &= 15 \% \times \text{S/ 240 000} \\
 &= \text{S/ 42 000/año}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Interés/hora} &= \frac{\text{Interés/año}}{\text{horas/año}} \\
 \underline{\text{Interés/hora}} &= \underline{\text{S/ 42/hora}}
 \end{aligned}$$

- c. Almacenaje, seguro e impuestos pueden ser estimados en 2 % del costo inicial (véase Sección 10.6.2.3).

$$\begin{aligned}
 \text{Almacenaje, etc.} &= 2 \% \times \text{S/ 400 000} \\
 &= \text{S/ 8 000/año}
 \end{aligned}$$

$$\underline{\text{Almacenaje, etc./hora}} = \underline{\text{S/ 8/hora}}$$

- d. Costos fijos totales/hora = Depreciación + Interés + Almacenaje

$$= \text{S/ 32} + \text{S/ 42} + \text{S/ 8}$$

$$\underline{\text{Costos fijos/hora}} = \underline{\text{S/ 82/hora}}$$

Cálculo de los costos variables del tractor:

a. Reparación y mantenimiento. El Anexo 5 estima este costo en 8 % para un tractor de 1 000 horas de uso por año en Gran Bretaña. En este ejemplo se duplicará o sea 16 %.

$$\text{Reparación y mantenimiento} = \frac{16 \% \times \text{Costo inicial}}{\text{horas/año}}$$

$$\underline{\text{Reparaciones, etc. /hora}} = \text{S/ 64/hora}$$

b. Combustibles y lubricantes. Estimar el consumo específico del tractor en 0.3 l/kWh (véase Sección 10.1.3.4) a un costo de S/12 por litro y los costos de los lubricantes en 10 % de este valor total.

$$\begin{aligned} \text{Costo del combustible} &= 0.3 \frac{\text{l}}{\text{kWh}} \times 35 \text{ kW} \times \frac{\text{S/ 12}}{1} \\ &= \text{S/ 126/hora} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo del lubricante} &= 10 \% \times \text{S/ 126/hora} \\ &= \text{S/ 12.6/hora} \end{aligned}$$

$$\underline{\text{Combustible, etc./hora}} = \text{S/ 138.6/hora}$$

c. $\underline{\text{Costo del tractorista}} = \text{S/ 100/hora (estimado)}$

d. $\text{Costos variables totales/hora} = \text{Reparación} + \text{Combustible} + \text{Tractorista}$
 $= \text{S/ 64} + \text{S/ 138.6} + \text{S/ 100}$

$$\underline{\text{Costos variables/hora}} = \text{S/ 302.6/hora}$$

Costo total/hora	=	Costos fijos + Costos variables
	=	S/ 82 + S/ 302.6
Costo total de operación del tractor	=	S/ 384.6/hora

2.2 Evaluación del costo de la cavadora:

Costo inicial	=	S/ 150 000	(estimado)
Tasa de interés	=	15 %	(estimado)
Valor residual	=	10 % costo inicial	(véase Sección 10.6.2.1)

El cálculo de todos los costos depende ahora del uso que se dé a la cavadora. En el Cuadro No. 12 se indica las horas de uso/año (i) con base en el rendimiento de la máquina en 5 horas-máquina/ha. La vida útil (ii) se ha estimado con base en el Anexo 4, pero acortando los valores para acomodar un uso pesado.

La depreciación anual se calcula (iii) de acuerdo con la vida de la máquina. El interés anual (iv) equivale a la inversión promedio por la tasa de interés 15 %. El almacenaje (v) se basa en 2 % del costo inicial. El total de los costos fijos/hora (vii) es de acuerdo con el costo fijo por año (vi) y las horas de uso por año (i).

La estimación del costo de la reparación como porcentaje del costo inicial (viii) se tomó del Anexo 5 pero doblando las cifras para acomodar un uso pesado; entonces este costo por hora (ix) se basa en el uso anual. El costo de lubricantes (x) se calculó por una engrasada por día de 8 horas, con costo de S/150. Así se evalúa los costos variables totales por hora (xi) y los costos totales de operación por hora (xii) para la cavadora, siendo éste la suma de (vii) y (xi).

2.3 Costos totales del sistema semimecanizado:

El Cuadro No. 12 también presenta el cálculo de los costos totales por hora y por hectárea de la cavada por medio del sistema

CUADRO No. 12. Cálculo de los costos de la cavadora de papas por el sistema semimecanizado.

Nota	Superficie cavada (ha/año)	5	10	20	50	100	200
(i)	Horas de uso/año-cavadora	25	50	100	250	500	1 000
(ii)	Vida útil (años)-cavadora	8	8	7	6	4	2
	Detalle de costos	Costos de la cavadora (s/)					
(iii)	Depreciación anual	16 875	16 875	19 286	22 500	33 750	67 500
(iv)	Interés sobre la inversión anual	12 375	12 375	12 375	12 375	12 375	12 375
(v)	Almacenaje etc., anual	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
(vi)	Costos fijos totales/año	32 250	32 250	36 661	37 875	49 125	82 875
(vii)	Costos fijos totales/hora	1 290	645	367	151	98	83
(viii)	Costo de reparación como % del costo inicial	6 %	6 %	10 %	14 %	26 %	46 %
(ix)	Costo de reparación/hora	360	180	150	84	78	68
(x)	Costo de lubricantes/hora	19	19	19	19	19	19
(xi)	Costos variables totales/hora	379	199	169	103	97	88
		Costos del sistema semimecanizado (S/)					
(xii)	Costo total de operación de la cavadora/hora	1 669	840	536	254	195	171
(xiii)	Costo de mano de obra/hora en recoger papas	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5
(xiv)	Costo del tractor/hora	384.6	384.6	384.6	384.6	384.6	384.6
(xv)	Costo de mano de obra/ha	3 750	3 750	3 750	3 750	3 750	3 750
(xvi)	Costo del tractor/ha	1 923	1 923	1 923	1 923	1 923	1 923
(xvii)	Costo de operación de la cavadora/ha	8 345	4 200	2 680	1 270	975	855
(xviii)	Costo total semimecanizado/ha	14 018	9 873	8 353	6 943	6 648	6 528

semimecanizado. El costo de la mano de obra (xiii) se indicó a principio de esta sección y el costo por hora del tractor (xiv) se analizó arriba, en 2.1. Los costos por hectárea (xv), (xvi) y (xvii) se basan en un rendimiento de 100 horas-hombre/ha y 5 horas-máquina/ha para el tractor y la cavadora. Así se suman los costos totales del sistema semimecanizado (xviii).

3. Sistema mecanizado:

Este sistema proyecta el uso de una cosechadora de papas de una hilera, remolcada por un tractor de 45 kW (60 hp). Cuatro trabajadores hacen una preselección de las papas y las meten en costales a bordo de la cosechadora (Fig. 252). Un tractor de 30 kW (40 hp) trabaja con un remolque para transportar las papas a la bodega; dos trabajadores trabajan con el remolque cargando y descargando las papas.



Fig. 252. Una herramienta que permite la cosecha de una hilera de papas, su selección a mano y finalmente su introducción en costales (*Ransomes, Sims and Jefferies, Ltd*).

CUADRO No. 13. Costos de operación de los tractores y el remolque para el sistema mecanizado.

Detalle	Tractor 45 kW	Tractor 30 kW	Remolque
Costo inicial (S/)	600 000	350 000	60 000
Vida útil (años)	10	10	8*
Uso por año (horas)	1 000	1 000	800*
Valor residual (% costo inicial)	20 %	20 %	10 %*
Valor residual (S/)	120 000	70 000	6 000
Inversión promedio (S/)	360 000	210 000	33 000
Depreciación/hora (S/)	48	28	8.4
Interés/hora (S/)	54	31.5	6.2
Almacenaje etc./hora (S/)	12	7	1.2
Costos fijos totales/hora (S/)	114	66.5	15.8
Costo de reparación como % del costo inicial	16 %	16 %	16 %
Costo de reparación/hora (S/)	96	56	12
Costo de combustible/hora (0.3 l/kWh x S/ 12 /l)	162	108	
Costo de lubricación/hora (S/)	16.2	10.8	6.2*
Costo de tractorista/hora	100	100	
Costo de 2 trabajadores/hora en el remolque (S/)			75
Costos variables totales/hora (S/)	374.2	274.8	93.2
Costo total de operación/hora (S/)	488.2	341.3	109

(*) Véase las estimaciones para el sistema mecanizado en el texto.

(**) Cálculo do en forma similar que para la cavadora (véase el texto).

La cosechadora trabaja a 4 km/hora, lo que representa un rendimiento de 0.4 ha/hora. Esto significa un total de 3 horas por hectárea con presunción de 20 % de tiempo perdido durante el trabajo. Los Cuadros Nos. 13 y 14 están elaborados de forma similar que en el sistema semimecanizado pero con las siguientes consideraciones adicionales:

a. El remolque trabaja 800 horas/año durante una vida de 8 años, sin considerar si es para el transporte de papas o de otros materiales.

b. El valor residual del remolque es de 10 % del costo inicial.

c. La vida útil de la cosechadora está deducida del Anexo 4.

d. El valor de la reparación de la cosechadora se da con base al doble de las cifras del Anexo 5.

e. La lubricación de la cosechadora se estima en el doble del valor correspondiente a la cavadora.

f. La lubricación del remolque representa una engrasada cada 8 horas, con costo de S/50.

CUADRO No. 14. Cálculo de los costos de la cosecha de papas por el sistema mecanizado.

Superficie cosechada** (ha/año)	5	10	20	50	100	200
Horas de uso/año con base de 3 h/ha-cosechadora	15	30	60	150	300	600
Vida útil (años-cosechadora)	8*	7*	6*	5*	4*	3*
Detalle de costos						
Costos de la cosechadora (S/)						
(iii) Depreciación anual	56 250	64 286	75 000	90 000	112 500	150 000
(iv) Interés sobre la inversión anual	41 250	41 250	41 250	41 250	41 250	41 250
(v) Almacenaje etc. anual	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
(vi) Costos fijos totales/año	107 500	115 536	126 250	141 250	163 750	201 250
(vii) Costos fijos totales/hora	7 167	3 851	2 104	942	546	335
Costo de reparación como % del costo inicial	6%*	6%*	8%*	12%*	18%*	30%*
(ix) Costo de reparación/hora	2 000	1 000	667	400	300	250
Costo de lubricante/hora	38*	38*	38*	38*	38*	38*
Costo de 4 trabajadores/hora	150	150	150	150	150	150
(xi) Costos variables totales/hora	2 188	1 188	855	588	488	438
Costos del sistema mecanizado (S/)						
(xii) Costo total de operación de la cosechadora/hora	9 355	5 039	2 959	1 530	1 034	773
Costo del tractor de 45 kW/hora	488	488	488	488	488	488
Costo del tractor de 30 kW/hora	341	341	341	341	341	341
Costo del remolque/hora	109	109	109	109	109	109
Costo total del sistema/hora	10 293	5 977	3 897	2 468	1 972	1 612
Costo total mecanizado/ha con base de 3 horas/ha	30 879	17 931	11 691	7 404	5 916	4 836

(*) Véase las estimaciones para el sistema mecanizado.

4. Comparación de los sistemas

El Cuadro No. 15 y la Fig. 253 presentan los resultados del análisis de costos/ha de cada sistema con base en la superficie cavada por año. Se nota que mientras el sistema manual tiene un costo independiente de la superficie, los costos de mecanización se reducen con mayor superficie. Por ejemplo, se observa que el sistema semimecanizado se justifica con una superficie mayor de 6 hectáreas, mientras que la cosechadora es más económica para una superficie mayor de 60 hectáreas.

Este ejemplo demuestra, por medio de las estimaciones e informaciones proporcionadas en los Anexos, como se puede comparar varios sistemas de mecanización y estudiarlos desde el punto de vista económico.

10.6.5 Determinación de la capacidad óptima de la maquinaria

El método anteriormente elaborado permite estimar la superficie en que se justifica uno u otro sistema de mecanización. Aunque esto normalmente es suficiente para proveer la información necesaria para tomar una decisión, es conveniente también evaluar el tamaño o capacidad óptima de la maquinaria en una finca de superficie conocida. Estos cálculos deben incluir consideración del tiempo disponible para cada operación y un programa de trabajo en la finca. El análisis puede ser complicado al considerar todas las posibilidades pero se refiere el lector a la bibliografía especializada adjunta^{2, 10, 27, 28}. Normalmente se busca la solución por medio de computadoras digitales.

CUADRO No. 15. Comparación de los costos de los sistemas con base en la superficie cavada.

Superficie cosechada (ha/año)	5	10	20	50	100	200
Sistema	Costo en S/ por hectárea					
1. Cavada manual*	<u>12 375</u>	12 375	12 375	12 375	12 375	12 375
2. Cavada semimecanizada**	14 018	<u>9 873</u>	<u>8 353</u>	<u>6 943</u>	6 648	6 528
3. Cosecha mecanizada***	30 879	17 931	11 691	7 404	<u>5 916</u>	<u>4 836</u>

* Véase el texto

** Véase el Cuadro No. 12

*** Véase el Cuadro No. 14

Los valores mínimos de costos han sido subrayados.

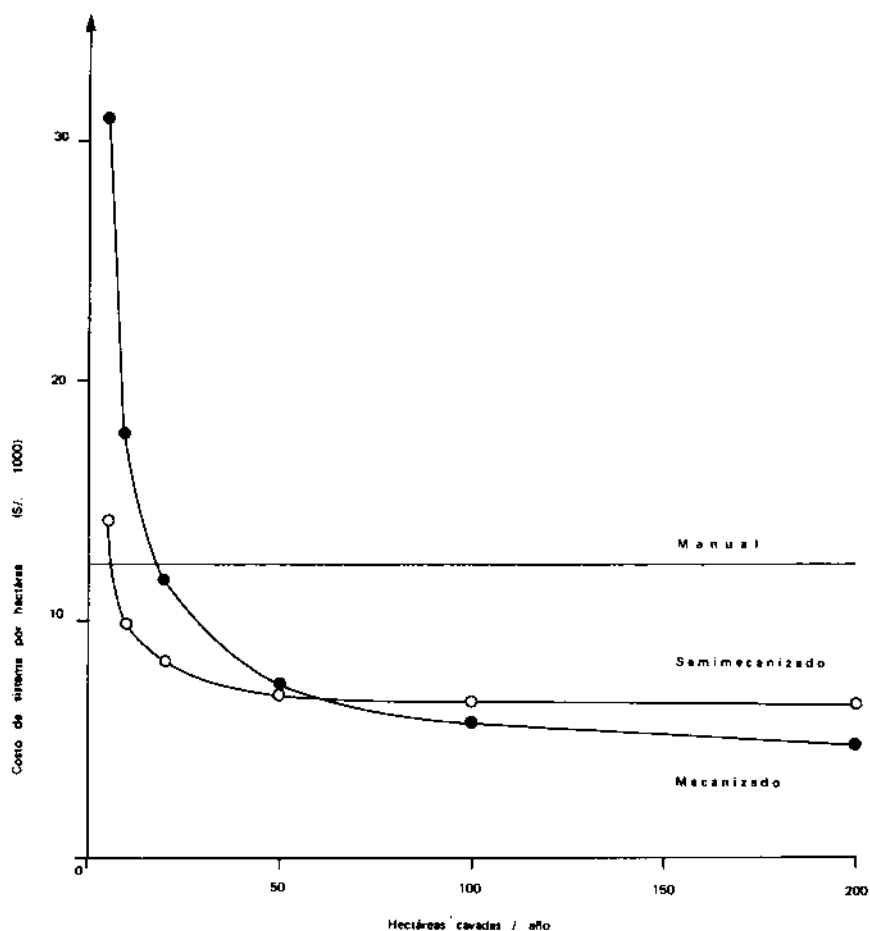


Fig. 253. Costo por hectárea de la cosecha de papa mediante los sistemas manual, semimecanizado y mecanizado (véase sección 10.6.4.2).

BIBLIOGRAFIA

1. ASAE. Agricultural tractor test code. Standard No. 209.4 (SAE J708c), ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. pp. 157-161.
2. _____. Agricultural machinery management. ASAE Engg. Practice No. 391, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. pp. 239-242.
3. _____. Agricultural machinery management data. ASAE Data No. 230.2, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1973. pp. 314-321.
4. _____. Agricultural machinery management data. ASAE Data No. 230.3, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. pp. 243-250.
5. _____. Soil cone penetrometer. Standard No. 313.1, ASAE Yearbook, St Joseph, Michigan, USA, ASAE, 1980. p. 265.
6. BRITISH STANDARD. The performance of diesel engines for road vehicles. BS AU 141a: 1971. London, UK, British Standards Instn., 1971. 20 p.
7. CULPIN, G. Profitable farm mechanisation. 3rd edition. London, UK, Granada, 1975. 320 p.
8. DIN. General definitions in automotive engineering, output, speed, acceleration, miscellaneous. DIN 70020. Berlin, West Germany, DIN, 1957. 2 p.
9. DOMIER, K.W., WILLANS, A.E. Tractive efficiency — maximum or optimum? Trans. ASAE 21(4):650-653. 1978.

10. HUNT, D. Farm power and machinery management. 6th edition. Ames, Iowa, USA, Iowa State University Press, 1973. 324 p.
11. INNS, F.M., KILGOUR, J. Agricultural tyres. London, UK, Dunlop Ltd., 1978. 70 p.
12. JUDGE, A.W. The testing of high speed combustion engines. London, UK, Chapman and Hall, 1955. 494 p.
13. KEPNER, R.A., BAINER, R., BARGER, E.L. Principle of farm machinery. 3rd edition. Westport, Conn., USA, Avi, 1978. 527 p.
14. LILJEDAHL, J.B., CARLETON, W.M., TURNQUIST, P.K., SMITH, D.W. Tractors and their power units. 3rd edition. New York, USA, Wiley, 1979. 420 p.
15. MANBY, T.C.D. Interpretation of tractor test reports by the user. FAO Informal Working Bulletin No. 19. Rome, Italy, FAO, 1960. 39 p.
16. MATHEWS, J. Efficient power application. Paper to the National Power Farming Conference, Bournemouth, UK, 1978. 13 p.
17. _____. The power requirement for tillage in the next decade. *The Agric. Engr.* 34(4):99-104. 1979.
18. OECD. Code for the official testing of agricultural tractors. Paris, France, Organisation for Economic Co-operation and Development, 1970. 66 p.
19. SAE. Standard No. J270. Washington, USA, Society of Automotive Engineers.
20. SCHWARTZ, M. ¿Cuándo se justifica la mecanización? *Publicación Miscelánea No. 17.* Quito, Ecuador, INIAP, 1974. 18 p.
21. _____. El uso del método de flujo de caja en la planificación de investigación agrícola. *Publicación Miscelánea No. 22.* Quito, Ecuador, INIAP, 1974. 22 p.

22. SIMS, B.G., SAMBRANO, J., ORBE, G. Comparación de tres métodos de la cosecha de papa en la sierra ecuatoriana. Bol. Técnico No. 20. Quito, Ecuador, INIAP, 1976. 24 p.
23. _____, VERA, V. Tractor power loss at high altitudes. Span 21(3):126-127. 1978.
24. _____, ASHBURNER, J.E., RODRIGUEZ, L. Turbocargadores para la compensación de pérdida de potencia por altitud en los tractores. Bol. Técnico No. 31. Quito, Ecuador, INIAP, 1979. 21 p.
25. _____, _____, _____. Turbocharging to reduce tractor power loss at high altitudes. The Agric. Engr. 34(4):109-110. 1979.
26. _____, VERA, V. Pérdida de potencia de un tractor al trabajar a diferentes altitudes sobre el nivel del mar. Bol. Técnico No. 24. Quito, Ecuador, INIAP, 1980. 24 p.
27. ZOZ, F.M. Predicting tractor field performance. Trans. ASAE 53(2):249-255. 1972.
28. _____. Factors affecting the width and speed for least cost tillage. The Agric. Engr. 29(3):75-79. 1974.

\$ 930

780 *Antio*

