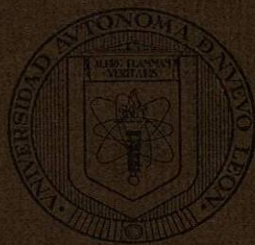


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE AGRONOMIA



COMPACTACION DEL SUELO AGRICOLA

SEMINARIO
(OPCION IIA)

Que para obtener el título de
Ingeniero Agrícola

PRESENTA

Horacio Rodríguez Jaramillo

Febrero de 1987.

T
S598
P
C.1

T
S598
RE 9210
E. I



1080063032

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE AGRONOMIA

Depto. de Ingeniería Agrícola



COMPACTACION DEL SUELO AGRICOLA

S E M I N A R I O

(OPCION III- A)

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO AGRICOLA

P R E S E N T A

HORACIO RODRIGUEZ JARAMILLO

MARIN, N.L.

FEBRERO DE 1987

007045

T
5598
R6



040.631
FA3
1987
C.5

I N D I C E

	Página	
1.	INTRODUCCION	1
2.	REVISION DE LITERATURA	3
2.1.	Generalidades.	3
2.1.1.	Estudio de la compactación.	5
2.1.2.	¿Qué es la compactación?	6
2.2.	Factores que intervienen en el grado de compactación.	7
2.2.1.	Materia Orgánica.	7
2.2.2.	Tipo de suelo.	8
2.2.3.	Humedad.	9
2.3.	Causas de la compactación.	11
2.3.1.	Tráfico de vehículos.	13
2.3.2.	Implementos de labranza.	17
2.4.	Pisos de arado.	19
2.4.1.	Clasificación de los pisos de arado.	22
2.4.1.1.	Pisos de arado (vertedera y discos).	22
2.4.1.2.	Pisos de rastra de discos.	23
2.4.1.3.	Pisos de tránsito.	24
2.5.	Efectos de la compactación.	25
2.5.1.	Disminución de los espacios porosos.	25
2.5.2.	Infiltración deficiente del agua.	27
2.5.3.	Influencia negativa en los microorganismos.	28
2.5.4.	Obstáculo físico para el desarrollo de las raíces.	29
2.6.	Cómo reducir la compactación.	33
2.6.1.	Congelamiento y deshielo.	33
2.6.2.	Cal, estiércol y fertilizantes.	34
2.6.3.	Drenaje.	35
2.6.4.	Sistemas de labranza.	36
2.6.5.	Agricultura por tráfico controlado.	38
3.	DISCUSION Y CONCLUSIONES.	41
4.	RESUMEN	43
5.	BIBLIOGRAFIA	49

1. INTRODUCCION

Los latinoamericanos estamos conscientes que nuestro suelo, agua y combustibles fósiles son recursos no-renovables. En años pasados, los reportes de recursos escasearon, teniendo auxilio al promover una conservación ética dentro de América. Agricultores y científicos agrícolas están experimentando con métodos de alternativa para la producción de cultivos, que puedan proveer un justo retorno a la inversión financiera en partidas de capital y operando gastos, mientras se conocen los desafíos de la conservación de recursos y se aumenta la producción de alimentos.

Por otra parte, el aumento mundial de la demanda de alimentos y combustibles, hace necesario un cambio en las prácticas de labranza para ayudar a producir cultivos con el menor gasto de energía, y al mismo tiempo, ayudar a reducir las pérdidas de suelo por reducción de la labranza y aumento de la cubierta de residuos. Los sistemas de labranza reducida (reducción de las prácticas de labranza y aumento de la cubierta vegetal), fueron introducidos en Europa hacia finales de los 60's, debido a los problemas de rendimiento que ocurrieron a causa de la formación de capas compactadas en el suelo, donde los sistemas de labranza convencional fueron practicados (Spoor, 1983; citado por Chaplin et al., 1986).

La compactación del suelo por la maquinaria de labranza, siempre ha sido un parámetro de consideración de los agricultores observadores y de los científicos de suelos. De hecho, muchas investigaciones han sido dirigidas para averiguar su extensión y los medios para reducirla. El interés fue expresado igualmente, cuando la preparación del campo agrícola era hecho en gran parte con caballos y mulas.

Se debe entender que la compactación no es, en la mayoría de los casos, una operación deliberada, pero que frecuentemente resulta de algunas de las operaciones de labranza (aradura, cultivo, aperjado y cosechado). El diseño moderno, la selección y uso de peso, así como equipo más poderoso (tractores de mayor potencia e implementos más pesados), son también incrementos a dicho problema. Si las causas anteriores se combinan con los efectos dañinos de la

inoportuna manipulación del suelo, se puede aumentar la compactación a niveles indeseables en muchos suelos agrícolas.

El proceso de compactación, es definido como la reducción en volumen para una masa dada de suelo. Este proceso es progresivamente serio causante de muchos problemas. Puede causar dureza excesiva del suelo, reducción de la permeabilidad del suelo al agua (aumento del escurrimiento), reducción del flujo de aire (poca aereación), e impide el crecimiento y penetración normal de las raíces. Esto provoca, muchas veces, pérdidas en el rendimiento de los cultivos.

Intentos por minimizar las pérdidas causadas por la compactación, tienen que implicar una comprensión del problema por recolección y análisis de datos en diferentes condiciones y tipos de suelos. Esta información puede conducir a las técnicas requeridas para predecir el comportamiento de la compactación en el campo, - - usando las mismas pruebas índice para cada condición y suelo particular en cuestión.

Este trabajo, hace una pequeña reseña de los experimentos e investigaciones que existen de la compactación del suelo agrícola. Aunque no es mucha la información, se da una leve introducción - - acerca de lo que es la compactación, se discuten sus dos concepciones más comunes, se tratan algunas de sus causas y efectos (secundarios e indirectos) y como reducir, en cierta medida, sus daños.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Generalidades.

En la labranza del suelo agrícola, falta el estudio, conocimiento y aplicación de las leyes básicas de una mecánica de suelos, que den datos seguros acerca de la influencia de la temperatura, la humedad, la dureza del terreno y la forma de trabajar de los diferentes implementos agrícolas. Es posible que se pueda encontrar una relación entre el rozamiento interno, las fuerzas de cohesión y la resistencia del suelo cultivable, para establecer una medida de comparación. Mientras tanto, hay que conformarse con el conocimiento empírico de la resistencia del suelo en los diferentes procesos de la labranza.

El suelo agrícola, en esencia, se compone de partículas minerales de diversos tamaños y de humus. Por otra parte, está formado de poros que mantienen el aire y la humedad. El volumen de poros no es constante; para un suelo ideal, representa el 50% del volumen total del suelo, con los valores límites de 40% (para suelos compactos) y 60% (para suelos sueltos). Las proporciones de aire y de agua, se consideran para un suelo ideal, de 25% para cada uno. La importancia del movimiento del agua dentro del suelo es enorme, porque para que las plantas formen 1 Kg de materia seca, es necesario de 300 a 400 Kg y hasta 600 Kg de agua.

Según Ortiz-Cañavate (1975), el calor del suelo (o su temperatura), está influido por el tipo de suelo, su humedad y su proporción de aire. El calor específico del suelo agrícola, es aproximadamente del orden de:

$$C_e = 1,200 - 2,000 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad \text{ó} \quad C_e = 0.29 - 0.48 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

El suelo tiene diferentes proporciones de aire y agua, según la profundidad a que se tome la muestra.

En la capa arable, considerada como de 20 cm de profundidad, la proporción de aire es mayor que a profundidades mayores (Figura 1).

El agua, el aire y la temperatura forman el clima del suelo, que puede ser influido mediante la labranza mecánica. Con el esta-

do físico y químico de los coloides del suelo, varían también sus propiedades mecánicas, como son dureza, tempero, compactación, - - adherencia, capacidad de campo, etc. Estas formas de manifestarse varían continuamente con el clima. Por esto, no se puede hablar de el suelo agrícola como de un material inerte, sino más bien, y - - algunos autores lo señalan así, "casi" como un organismo vivo. Esto es porque el suelo se considera como una sustancia que, debido a su extraordinaria multiplicidad (en características, propiedades, etc.), no permite comparación posible con otros materiales estudiados ó utilizados por la técnica.

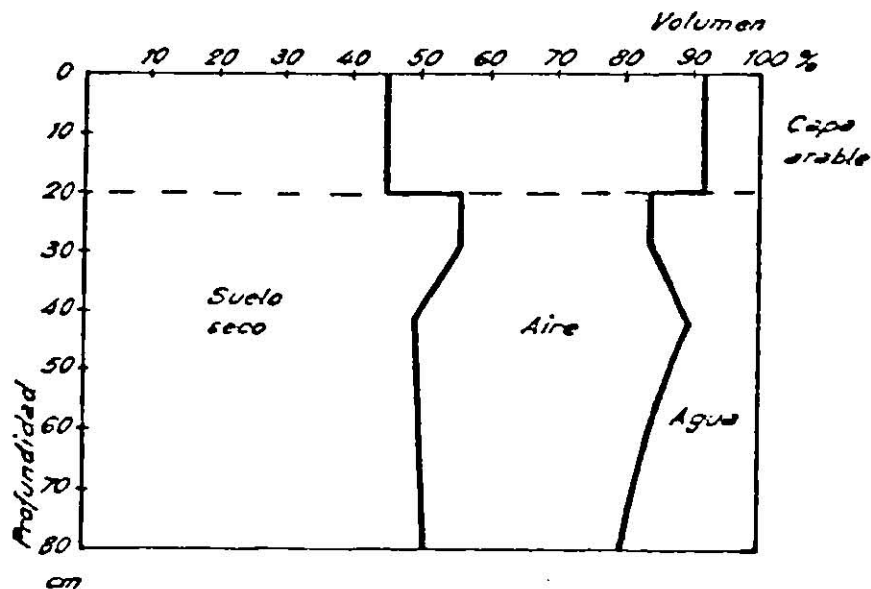


Fig. 1 Proporción de suelo seco, aire y agua a diferentes profundidades en un suelo de estructura media (Ortiz-Cañavate, - 1975).

2.1.1. Estudio de la compactación.

Para comenzar, es necesario aclarar que la compactación se estudia desde dos puntos de vista diferentes. Uno es desde el punto de vista del Ing. Civil, y el otro del Ing. Agrónomo, pero el Ing. Agrícola debe conocer los dos para que según sea el caso, saber estudiarlos y diferenciarlos; aún los ingenieros Civiles y Agrónomos deben conocerlos y no confundirlos. Aunque la compactación en general, se rige por las mismas causas y principios, los objetivos que se persiguen en los dos casos son totalmente contrarios. Así pues, mientras que el Ing. Civil busca "provocar" la compactación, el Ing. Agrónomo busca "eliminarla" en lo posible.

Juárez y Rico (1984), mencionan que para un Ing. Civil, la importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de la capacidad de deformación, que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Se ha probado fehacientemente, para los dos puntos de vista, que el tránsito de vehículos apisona el suelo debajo de la superficie, y que pasadas repetidas aumentan la profundidad de la compactación (Caterpillar, 1969). Toda la industria del movimiento de tierras reconoce este hecho, ya que las especificaciones para compactación, en rellenos para carreteras y diques, dan valores que el contratista interpreta en profundidades de relleno suelto, los cuales puede poner sin peligro antes de compactar, cantidad de pasadas con un peso compactador determinado y sus lbs/pulg² (Kg/cm²), obtenidas por la superficie de contacto de la máquina con el suelo; así también, especifica la gama de contenido de humedad deseable conveniente en el material a ser compactado. En general, las técnicas de compactación del Ing. Civil, se aplican a rellenos artificiales tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. (Juárez y Rico, 1984).

Ya se sabe, en forma general, lo que representa la compactación para el Ing. Civil, pero lo que interesa en este trabajo es el estudio de la compactación desde el punto de vista Agrícola.

Para el Ing. Agrónomo, la compactación es una característica

muy compleja del suelo, que comprende interacciones de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como del clima, las prácticas agronómicas y el cultivo. Por eso, el conocimiento pleno de la compactación ha eludido los esfuerzos por explicarla tanto de agricultores como científicos (Bowen y Kratky, 1985).

Pollock et al. (1986), mencionan que los efectos dañinos de la compactación sobre la estructura, textura y capacidad del suelo, medidos como reducciones en el desarrollo de la planta, en el rendimiento de la cosecha y pérdida de ingresos, tienen lugar en la mayoría de los suelos y a recibido considerable atención de investigadores en el pasado.

Así pues, para el Ing. Agrónomo, la compactación es desagradable pues restringe el movimiento de agua, aire y raíces en el suelo, reduciendo el rendimiento de las cosechas y causando pérdidas de ingresos (John Deere, 1976).

2.1.2. ¿Qué es la compactación?

En términos simples, según Bowen y Kratky (1985), la compactación es la reducción del volumen de una masa de suelo, causada por una fuerza (peso) aplicada al suelo. Esto reduce el volumen de poros del suelo y, consecuentemente, de aire. También hace más difícil la penetración de las raíces.

No es fácil medir con precisión la compactación. La medida de la estructura y la compactación del suelo más ampliamente usada, es la densidad en masa (volumétrica), generalmente expresada como "gramos de suelo por centímetro cúbico" (gr/cm^3). La densidad en masa esta inversamente relacionada con el porcentaje de poros por unidad de volumen de suelo. Cuando más alta es la densidad en masa, menor es el porcentaje de poros y más compactado el suelo.

La resistencia del suelo es una medida de su peso por unidad de área (Kg/cm^2 ó lb/pulg^2), en vez de volumen, y también se usa para calcular la compactación.

Los cambios de la densidad en masa y de la resistencia del suelo, son funciones de su contenido de humedad. Los suelos húmedos se compactan más fácilmente que los secos. Los suelos de una densidad determinada, tienen menos resistencia cuando su contenido

de humedad es alto que cuando es bajo. Sin embargo, la resistencia aumenta con incrementos de la compactación, sea cual fuere su contenido de humedad.

Otras técnicas que se usan para medir la compactación son: - (1) conductividad del suelo al aire, al agua o la radiación nuclear, (2) análisis de la capacidad del suelo para transmitir esfuerzos, y (3) observaciones de la orientación de las partículas del suelo. Estos métodos no son de aplicación universal, cada uno tiene ventajas y desventajas; además, ninguno puede usarse en forma práctica en el campo.

2.2. Factores que intervienen en el grado de compactación.

Según Bowen y Kratky (1985), la compactación del suelo es, a menudo, responsable directa o indirectamente de grandes pérdidas de rendimiento. No obstante, la magnitud de esas pérdidas varía de un año a otro, incluso en el mismo cultivo, por que las reducciones de rendimiento debidas a la compactación excesiva del suelo, dependen de las interrelaciones entre las especies de cultivo, el tipo de suelo y las condiciones climáticas. No es posible establecer una regla general, por la cual, un grado específico de compactación causará una pérdida de rendimiento determinada. De hecho, los efectos dañinos de la compactación, medidos como reducciones de rendimiento y pérdidas de ingresos, han tenido lugar en la mayoría de los suelos.

Enseguida se mencionan algunos de los principales factores que intervienen en el grado de compactación del suelo. Sin embargo, es necesario aclarar que estos y otros factores están íntimamente relacionados unos con otros, pero para facilitar su estudio se discutirán en forma separada.

2.2.1. Materia Orgánica.

Muchos y muy diversos autores sostienen que la materia orgánica no sólo auxilia al suelo en su resistencia a la compactación, sino que mejora, en general, todas sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Ohu et al., 1986). De hecho, los suelos con poca

materia orgánica son duros, terrosos y desmenuzables con dificultad cuando son trabajados con implementos de labranza. En los suelos desérticos, que son pobres en agregados, la cantidad de éstos está correlacionada con las pequeñas cantidades de materia orgánica. Un aumento en el contenido de materia orgánica en estos suelos, estabiliza el pH, aumenta el contenido de ácidos orgánicos, etc., lo que permite mejorar la estructura del suelo, porosidad, infiltración, etc. Gaultney et al. (1982), sostienen que debido a estos y otros tipos de efectos de la materia orgánica sobre el suelo, se puede disminuir la intensidad de las prácticas de cultivo. Es necesario aclarar que los efectos benéficos de la materia orgánica, se deben a la actividad conjunta de los microorganismos, de la fauna y de la vegetación (Baver et al., 1973). Fuller (1975), indica que la compactación en los horizontes subsuperficiales, ocurre debido a que la materia orgánica declina a medida que se profundiza en el suelo.

2.2.2. Tipo de suelo.

Gaultney et al. (1982), indican que los mismos suelos son la mejor consideración cuando la compactación es un problema. De hecho, algunos suelos son inherentemente más compactibles que otros. Esto nos demuestra que el tipo de suelo es un buen indicador de la compactabilidad potencial de un suelo. Así por ejemplo, Bowen y Kratky (1985), mencionan que es más probable lógicamente, que la compactación ocurra en suelos arcillosos ó francos que en suelos arenosos u orgánicos. Gaultney et al. (1982), señalan que generalmente, los suelos bien graduados son los más susceptibles a la compactación, a una densidad y contenido de humedad determinada. Esto es explicado por Marshall (1959), el cual indica que para cualquier método dado de compactación, la más alta densidad volumétrica se alcanza en un suelo que tenga una amplia distribución de partículas, desde gruesas hasta finas (como un suelo graduado, areno-limoso, etc.). En estos casos, las partículas finas tapan los huecos entre las partículas gruesas. Sin embargo, nunca se alcanzará una densidad volumétrica muy alta, en suelos formados solamente de partículas gruesas ó finas.

Por otra parte, Gaultney et al. (1982), indican que suelos - con una alta porosidad (independientemente del tamaño de partículas), son más compresibles que otros. Warkentin (1971), citado por Gaultney et al. (1982), ha determinado que los grandes vacíos disminuyen de tamaño por la compactación. Los suelos limosos son inherentemente susceptibles a la compactación (debido a la heterogeneidad del tamaño de sus partículas), pero la tendencia hacia la compactación decrece a medida que la proporción de la materia orgánica del suelo aumenta. Con respecto a esto último, Baver et al. (1973), indican que la mayoría de las propiedades físicas de un suelo, dependen de la cantidad y la naturaleza de la fracción de arcilla coloidal, y con base en ello, también se puede determinar el grado de compactación posible en un suelo.

Según Freitag (1971), citado por Gaultney et al. (1982), los esfuerzos de la compactación afectan tres características básicas del suelo, éstas son: la porosidad del suelo, la distribución del tamaño del poro y la estructura del suelo. Un cambio en el estado de compactación de un suelo, es causado por fuerzas, las cuales pueden originarse tanto interna como externamente. Las fuerzas internas tales como el secado, dilatación y congelamiento, se originan dentro de la misma masa de suelo, mientras que las fuerzas externas son aplicadas a un suelo limitado por masas ajenas ó a través de ellas (Sowers y Sowers, 1970; citados por Gaultney et al., 1982).

Los suelos actúan plásticamente bajo carga. Cualesquier cambio en el grado de compactación de un suelo, depende del movimiento de las partículas en las fases líquida y sólida. En un suelo granular insaturado, el grado para que las partículas de suelo puedan cambiar sus posiciones relativas por deslizamiento ó rodaje, es el mayor factor que contribuye al cambio de volumen. Para suelos saturados, el factor limitante para el cambio de volumen, es la proporción a que el agua del suelo puede moverse fuera del volumen de suelo comprimido.

2.2.3. Humedad.

Investigaciones hechas por la John Deere (1976), han demos-

trado que la mayoría de los suelos se compactan más severamente si se trabajan cuando están húmedos, y el problema aumenta cuando la humedad aumenta. Según Bowen y Kratky (1985), muchos agricultores labran sus campos tan pronto como han secado lo suficiente para que el equipo pueda trabajar sin quedar atorado en el fango. Sin embargo, esa no es una práctica adecuada. Es en esas condiciones de humedad del suelo que tiene lugar la compactación grave.

Si el suelo se cultiva cuando la humedad es demasiado alta y luego se deja secar, se forman terrones extremadamente duros que más tarde son difíciles de romper (John Deere, 1976). Por lo tanto, si se demora el cultivo hasta que el suelo alcance el nivel apropiado de humedad, se reducirá el potencial de compactación y se facilitará la pulverización. También, es más fácil eliminar las malezas cuando el suelo está más seco.

Según Bowen y Kratky (1985), la compactibilidad de un suelo en condiciones de alta humedad, varía con sus propiedades, es decir, con el tipo de suelo. Sin embargo, los suelos de poca materia orgánica, gran variedad de tamaños de partículas y mal drenaje natural, son más susceptibles a compactarse gravemente.

La compactación máxima en suelos de textura mediana (limosos), tiene lugar cuando su contenido de humedad está en la capacidad de campo (C.C.). Debajo de ese punto la compactación aumenta directamente con el contenido de humedad, y arriba de éste, la compactación disminuye (Bowen y Kratky, 1985).

Debido a todo lo anterior, los campos que contienen mucha humedad al momento de la labranza ó durante el tránsito máximo de vehículos y aperos, sufren compactación y más adelante causan problemas. Por lo tanto, la humedad del suelo es, probablemente, el signo de mayor importancia como parámetro de la compactación dado un suelo específico. Söhne (1953;1958), citado por Marshall (1959) presentó datos mostrando como la porosidad es reducida cuando varias cargas son aplicadas a un suelo limoso en un rango de diferentes contenidos de humedad. También demostró, que a un bajo contenido de humedad, se requiere una mayor presión para reducir la porosidad a un valor dado. Igualmente Harris (1971) y Chancellor (1971) citados por Gaultney et al. (1982), reportaron que para suelos sa-

turados parcialmente, con un alto porcentaje de humedad, la mayor compactación se produjo para una presión dada.

Marshall (1959), menciona que la relación entre el contenido de humedad y la compactación, muestra que, para cada suelo, un - - aumento en el contenido de humedad al inicio, ayuda al "acomodó" y al estrecho aglomerado de las partículas (favoreciendo la compactación). Esto se debe a que el agua actúa como lubricante entre partículas y agregados. Sin embargo, arriba de un cierto contenido de humedad óptimo para una compactación máxima, el agua adicional evita el estrecho aglomerado de las partículas, debido a que ocupa el espacio poroso restante, lo que causa que la compactación disminuya.

Marshall (1959), señala también que el método de compactación Proctor (1933), que es el que comunmente usan los ingenieros de caminos ó civiles, consiste en una muestra estándar de suelo -- probado a varios contenidos de humedad dentro de un cilindro estándar. El método no es ideal para estudios de labranza, dado que la presión es aplicada en forma diferente. Sin embargo, Weaver y Jamison, citados por Marshall (1959), establecieron que la compactación bajo el tractor, está relacionada al contenido de humedad por el tipo de curva provista por el método Proctor.

A este respecto, Marshall (1959), Baver et al. (1973), Bowen y Kratky (1985) y otros investigadores, han concluido de sus pruebas (por el método Proctor), que el contenido de humedad óptimo - para una compactación máxima, es muy cerca del contenido de humedad óptimo deseable para la labranza agrícola.

2.3. Causas de la compactación.

La compactación del suelo puede ser causada por el pisoteo - de los animales, por la consolidación natural (acomodo de las partículas del suelo por la gravedad), y por la compresión mecánica, es decir, las presiones y deformaciones resultantes de la labranza y del tráfico de vehículos (Threadgill, 1982). Al respecto, Baver et al. (1973), Gaultney et al. (1982) y otros investigadores, mencionan que para los suelos en general, los efectos de las fuerzas

mencionadas anteriormente sobre la densidad volumétrica del suelo (compactación), es usualmente pequeña en comparación con el efecto de desecación máxima y contracción que el suelo pudo haber sufrido en su historia. Sin embargo, nuestra exposición se limita solamente a la compactación debida a la compresión mecánica (FUERZAS EXTERNAS MECANICAMENTE APLICADAS), como son la labranza y el tráfico de vehículos sobre el suelo.

Ahora bien, es importante mencionar a Söhne, uno de los investigadores y científicos que más ha contribuido a la comprensión y estudio de la compactación, principalmente a la causada por las fuerzas externas mecánicamente aplicadas al suelo. En el año de -- 1951, en sus investigaciones, reportó el comportamiento mecánico - del suelo bajo las cargas impuestas por el giro de las llantas y - por las prácticas de cultivo, y finalmente (1953), reportó sobre la distribución de la presión en el suelo y la deformación del mismo bajo las llantas del tractor. También discutió la medición de - la porosidad del suelo bajo las llantas con diferentes presiones - de superficie (1958). Estas mediciones mostraron que la compactación del suelo bajo el rodaje de las llantas, siguieron la misma - relación básica para la presión, sobre el área de contacto de la - rueda, como la que se observó durante las pruebas de compactación estáticas y friccionantes en el laboratorio. Soane (1970), citado por Raghavan et al. (1976), discutió las propiedades del suelo y las características de la carga que probablemente estén implicadas en la compactación bajo las ruedas, acentuando la dificultad de la medición de los componentes de una carga aplicada.

Gaultney et al. (1982), indican que muchos de los actuales - métodos de manejo agrícola, los cuales utilizan intensamente técnicas de gran producción, tienden a aumentar el problema de la compactación del suelo. Cuatro prácticas las cuales son culpables del aumento significativo de los problemas de compactación son:

1. Más cultivos de hileras continuas (monocultivos), en -- lugar de la tradicional producción de legumbres y de la rotación de cultivos en hileras.

2. El trabajo más temprano de los suelos mientras la humedad del suelo es alta.
3. El uso de tractores e implementos muy pesados.
4. Y el uso, aunque en menor grado, de animales devastadores sobre el campo cultivado.

Según Caterpillar (1969), es imposible eliminar por completo el problema de la compactación, pero una mejora en el aprovechamiento de máquinas y suelo puede reducirla considerablemente.

Enseguida se discuten las fuerzas externas mecánicamente aplicadas al suelo (tráfico de vehículos e implementos de labranza).

2.3.1. Tráfico de vehículos.

En años recientes, a habido un creciente interés en la inducción de la compactación del suelo por la maquinaria, debido al constante incremento en el tamaño de las máquinas agrícolas, así como del incremento en el uso de prácticas de conservación ó no-labranza (Pollock et al., 1986). La compactación del suelo, inducida por la maquinaria, es el apisonamiento ó firmeza del suelo causada por el paso de las ruedas del equipo agrícola (John Deere, 1976).

Según Baver et al. (1973), Gaultney et al. (1982) y otros investigadores, la mayor parte de la compactación es debido a las llantas neumáticas de los tractores e implementos. Cohron (1971), citado por Gaultney et al. (1982), estableció que las llantas del equipo agrícola infladas a presiones nominales de 69 a 103 kPa (10 a 15 psi), comunmente aplican presiones de 138 a 345 kPa (20 a 50 psi) al suelo. A este respecto, se ha establecido que una pequeña presión de 4 psi (27.6 kPa), puede ser dañina sobre un suelo friable (Voorhees, 1977; citado por Gaultney et al., 1982).

La compactación del suelo es causada básicamente por dos tipos de fuerzas aplicadas por las llantas del equipo agrícola; las fuerzas horizontales creadas por el empuje ó tracción, y las fuerzas verticales producidas por la carga ó peso (Gill y Reaves, 1956; citados por Baver et al., 1973). Al deslizamiento de la rueda debido al esfuerzo tractivo (fuerzas horizontales), se le ha reconoci-

do una gran influencia sobre los suelos. Raghavan y McKyes (1979), establecieron que ruedas operando a menos del 30% de deslizamiento, causan compactación por reducción del tamaño de los vacíos en el suelo. De hecho, el efecto de "frotado" ó "untado" resultante del deslizamiento de la rueda, resulta en daños a los suelos. Baver et al. (1973), indican que se considera que el 10% de la compactación del suelo, es debido a las fuerzas horizontales. Con respecto a -- las fuerzas verticales, Gaultney et al. (1982), señalan que existen dos tipos; las cargas estáticas y las dinámicas, y son las que comprimen el suelo a diferentes profundidades. De hecho, se sabe - que la mayor compactación en la agricultura es causada por las cargas dinámicas, ya que la presión superficial y las fuerzas puras - de deslizamiento, especialmente en combinación, son las principales culpables. Harris (1971), citado por Gaultney et al. (1982), - reportó que a altas proporciones de carga de aproximadamente 40 psi (275.8 kPa), se acumulan cargas dinámicas que reducen la porosidad del suelo más que las cargas estáticas.

Phillips y Young (1973), mencionan que mucha de la compactación ocurre con el primer viaje sobre el campo después del rompimiento ó aflojamiento del suelo. De hecho, el primer paso de una - rueda sobre un suelo suelto, causa entre el 60 y 90% de la compactación total que resulta de cuatro pasos en el mismo sitio. Pasos repetidos en el mismo lugar agravan la compactación (Gaultney et - al., 1982).

Según Caterpillar (1969), y Flegmann y George (1975), gran - parte del tránsito en el terreno, ocurre en los momentos en que la humedad del suelo se encuentra en el punto ideal para permitir la compresión del suelo a una condición de mayor densidad. Esto se - debe a que diversas pruebas realizadas, mostraron que el contenido óptimo de humedad para la compactación máxima, se encuentra cerca del contenido de humedad deseable para la labranza agrícola (Marshall, 1959; Baver et al., 1973; Bowen y Kratky, 1985). El grado de compactación del suelo y la profundidad a que ocurre, dependen considerablemente de la presión por centímetro cuadrado ejercida - por la superficie de contacto de la llanta con el suelo y de la - cantidad de pasadas hechas en el mismo camino (Caterpillar, 1969).

Al respecto, Raghavan et al. (1976), John Deere (1976), y Bowen y Kratky (1985), afirman que el peso total de los equipos agrícolas, que implica la presión ejercida por la superficie de contacto de las llantas, es el principal factor en el grado de compactación debida al tránsito. Los equipos livianos, naturalmente, causan menos compactación que los vehículos pesados en condiciones similares. Ahora bien, las cargas de eje de los vehículos agrícolas modernos, pueden ser entre 10 y 20 toneladas, peso capaz de compactar cualquier suelo a profundidades de 60 a 75 cm, dependiendo del tipo de suelo y otras condiciones.

Como regla general, la compactación del suelo se limita a los 20 a 25 cm superficiales, si el peso sobre cada eje del vehículo no pasa de 5 toneladas. No obstante, esta condición no se cumple fácilmente. Por ejemplo, una cosechadora combinada vacía, con cabezal para seis hileras, probablemente tiene peso de 10 toneladas sobre el eje delantero. Algunas distribuidoras de fertilizante pueden llevar hasta 14 toneladas en el eje posterior, lo cual es 4 toneladas más de lo permitido en muchas carreteras pavimentadas (Bowen y Kratky, 1985). Por lo anterior, los tractores pesados e implementos grandes pueden causar compactación severa en los suelos.

Ahora bien, en algunos sistemas agrícolas tanto como el 90% de la superficie del suelo puede cubrirse con huellas de ruedas entre aradura y cultivo. Para entonces, muchos de los suelos pueden estar apisonados hasta el 90% de su densidad antes del arado (John Deere, 1976). Lo anterior se atribuye al hecho de que durante un cultivo, al momento que las llantas de los tractores, implementos, vagones, camiones, tanques nodriza ó de alimento, aspersoras de fertilizantes, combinadas y otra maquinaria de producción pasa sobre casi toda la superficie del terreno del campo, el resultado neto sobre el suelo es la compactación (Gaultney et al., 1982).

Así pues, durante la mayoría de las operaciones agrícolas y forestales, una porción significativa del lugar se expone a un solo ó a veces múltiples pasos de vehículos. La compactación que puede resultar de ésta sola ó múltiple carga depende de diversos factores. Al respecto, Baver et al. (1973), concluyeron que las

presiones debidas a las cargas aplicadas através de las llantas de el equipo agrícola, se transmiten a mayor profundidad entre más - húmedo esté el suelo, el inicial aflojamiento del mismo y las pasa das sucesivas del equipo sobre el suelo. Por su parte, Danfors - - (1977), citado por Gaultney et al. (1982), concluyó que la presión de superficie específica de la llanta y el peso total del vehículo, son de decisiva importancia en la determinación de la extensión de la compactación.

De lo anterior, Pollock et al. (1986), concluyeron que los - factores principales que intervienen en la extensión de los efec - tos de la compactación debido al tráfico de vehículos son: el ni - vel de humedad del suelo, número de pasos del equipo, aflojamiento inicial del suelo, peso total del vehículo y la presión de superfi - cie específica (presión de contacto) de las llantas.

En base a lo anterior y con el fin de reducir la compacta - ción del suelo, se han incorporado varias características de dise - ño a los equipos agrícolas modernos. Por ejemplo, las llantas do - bles, los ejes en tándem y la tracción en las cuatro ruedas, dis - tribuyen el peso del vehículo en una superficie mayor y, por lo - tanto, causan menos compactación debido al peso menor. Desafortuna - damente en el caso de la tracción, su solución no es una alternati - va práctica. (Raghavan et al., 1976; John Deere, 1976; Gaultney et al, 1982; y Bowen y Kratky, 1985).

Sin embargo, algunas de estas características de diseño pue - den aumentar el problema indirectamente. Según Bowen y Kratky(1985) al mejorar la tracción y la flotación, permiten al agricultor tra - bajar suelos muy húmedos. La compactación tiene lugar pese a las - características del equipo para evitarlas, porque éste se usó inde - bidamente. Si no fuera por esas características, los campos dema - siado húmedos no se habrían labrado del todo. Por eso, las máqui - nas modernas deben usarse con el mismo sentido común que los mode - los previos.

Según Caterpillar (1969), Baver et al (1973), Raghavan et al. (1976), John Deere (1976), Gaultney et al. (1982), Bowen y Kratky (1985) y otros investigadores, mencionan que la principal causa de la compactación del subsuelo, es el movimiento de vehículos de rue

das pesados en campos excesivamente húmedos. Con atención cuidadosa en el diseño y la selección de los equipos, así como de una planificación detallada para reducir al mínimo el tránsito por el campo, esta fuente de compactación se puede controlar.

Caterpillar (1969), indica que la mayoría de los estudios relacionados con la carga de vehículos y la compactación del suelo - han sido experimentales, y se conocen a veces como "compactación ó restricciones inducidas del suelo".

2.3.2. Implementos de labranza.

Caterpillar (1969), Baver et al. (1973), Flegmann y George - (1975), Raghavan et al. (1976), John Deere (1976), Gaultney et al. (1982), Bowen y Kratky (1985) y otros investigadores, mencionan - que el tránsito de vehículos y los implementos de labranza, son - los dos factores que más contribuyen a producir un efecto acumulativo en la producción de una resistencia del suelo cada vez mayor (Figura 2). Sin embargo, es necesario entender que bajo condiciones de suelo favorables a la compactación, toda operación de campo contribuye a la compactación, ya sea en la superficie del suelo, - el subsuelo ó en ambos.

Los implementos de labranza han sido considerados, durante - muchos años, como los factores principales de la compactación del suelo. Esto se debe al hecho de que básicamente causan la compactación de las mismas formas que el tránsito de vehículos (através de las llantas, peso de los mismos, etc.), pero a la vez, causan compactación de otras formas más graves. Caterpillar (1969), menciona que una de estas formas es la siguiente: la cuchilla ó borde de - ataque de los implementos (arado, disco, cincel, etc.), a pesar de estar afilada, es mucho más gruesa que el diámetro de las diminutas partículas del suelo através de las cuales se desplaza. Muchas de estas partículas se empujan por delante de esta cuchilla hasta que algunas se mueven verticalmente hacia arriba (superficie) y - hacia abajo del suelo. El lugar de descanso evidente de estas partículas, es en los poros ó vacíos entre las partículas existentes, creando de esta manera una capa más compacta.

Otros autores (Duarte y Jacoby, 1972; y Miranda et al., 1976),

consideran que la excesiva "pulverización" del suelo debida a la labranza normal, provoca la formación de partículas muy finas en la capa labrada suelta. Estas partículas se desplazan al drenarse el exceso de agua através del perfil y someterse a "colado" por el suelo en estado natural, ocupando los poros del mismo y formando una masa más compacta de suelo a diferentes profundidades. Lo mencionado anteriormente son dos de las formas más generales de como los implementos de labranza causan la compactación en el suelo.

Sin embargo, diferentes autores han estudiado las formas específicas de como causan la compactación cada implemento en particular. Por ejemplo: el arado de vertedera causa compactación básicamente en dos formas; una es la fuerza de reacción descendente ó inclinada necesaria para que el arado corte y penetre en el suelo, y la segunda es el efecto de "frotado" ("embarrado" ó "untado") debido al deslizamiento de las partes del arado (costilla, costanera, talón, etc.) por el suelo (Gaultney et al., 1982). Cooper (1971), citado por Gaultney et al. (1982), ha reportado que la rastra de discos (la segunda herramienta más usada en la labranza primaria), compacta el suelo inmediatamente abajo de la profundidad de operación, debido al considerable peso que requiere para poder penetrar el suelo y a la transferencia de dicho peso através de las pequeñas áreas de las hojas de los discos al suelo. Podemos ir nombran-



Fig. 2 Fotografía que muestra los efectos de la compactación debido al tráfico de vehículos y a los implementos de labranza (John Deere, 1976).

do cada implemento de labranza y como causa específicamente la compactación. Pero para todos los implementos en general, se puede decir que se limitan a las formas nombradas anteriormente.

Según Caterpillar (1969), a medida que los suelos se volvían más firmes después de la labranza, investigaciones efectuadas con un penetrómetro confirmaron que la mayor resistencia se encontraba en el suelo inmediatamente debajo de la profundidad de labranza y disminuía un poco más abajo de dicha profundidad. A esta condición se denominó "piso de arado" (este tema se discute en seguida).

Así pues, mientras que el suelo se mezcle y rompa mecánicamente, los implementos de labranza continuarán contribuyendo a la compactación del mismo.

2.4. Pisos de arado.

Brady (1974) y Baver (1971), citados por Gaultney et al. (1982), reportaron que en la mayoría de los suelos dedicados a la agricultura, se han observado capas compactadas en el fondo de la zona de labranza. Al respecto, Miranda et al. (1976), mencionan que el 98% de las tierras dedicadas al cultivo en Latinoamérica, se encuentran afectadas por capas endurecidas en el subsuelo, formadas en su mayoría por el paso de vehículos y por los implementos de labranza.

Bowen y Kratky (1985), indican que el peso del tractor y de sus implementos compactan el subsuelo debajo de la zona de labranza, y que dicha compactación es principalmente función del peso sobre el eje del vehículo y no del tamaño de las llantas. Tener esto en cuenta especialmente al utilizar las distribuidoras de fertilizante denominadas "flotadoras" ó de "flotación". También, muchos investigadores y científicos (Caterpillar, 1969; Duarte y Jacoby, 1972; Miranda et al., 1976; etc.), consideran que las partículas más finas en la capa labrada suelta ó formadas debido a la "pulverización" excesiva del suelo, se desplazan al drenarse el exceso de agua através del perfil y se someten a "colado" ó "lixiviación" por el suelo en estado natural, ocupando los espacios porosos disponibles para el aire y el agua, formando una capa ó capas endure-

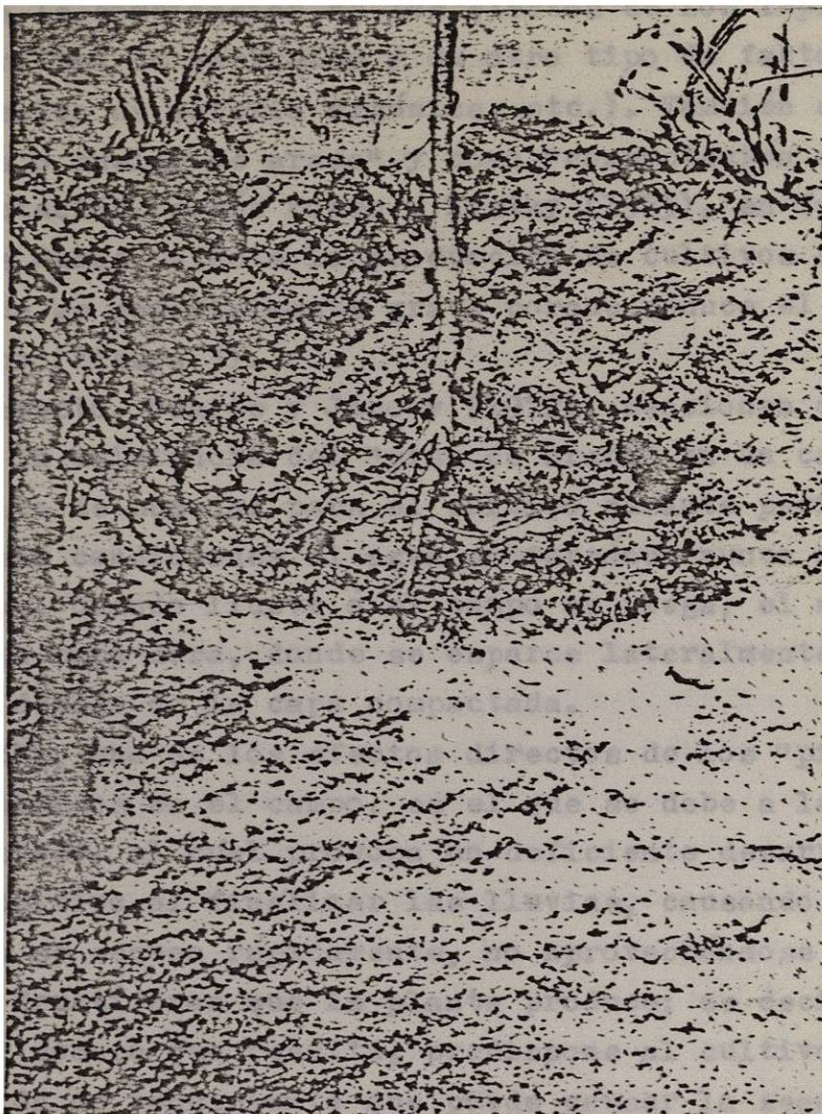


Fig. 3 "Piso de Arado" formado por el peso constante del equipo agrícola (Miranda et al., 1976).

cidas a diferentes profundidades del suelo. Pero como las capas superficiales del suelo son aradas y labradas con regularidad, la compactación sólo se observa debajo de la capa mullida.

Flegmann y George (1975), indican que a estas capas endurecidas del subsuelo se les llama "pisos de arado" en español ó "plow pans" en inglés. De hecho, el término "pan" es usado en inglés al igual que en español, para denotar algunas formas de compactación bajo la superficie del suelo. Diversos autores (Caterpillar, 1969; Duarte y Jacoby, 1972; Baver et al., 1973; Miranda et al., 1976; etc.), coinciden en indicar que los "pisos de arado" se for-

man debido a la combinación de los efectos de los implementos de labranza, tráfico de vehículos y de otro tipo de factores (tipo de suelo, contenido de materia orgánica, etc.). También se les conoce como "suelos ó suelas de arado" y como "compactación del subsuelo". Dicha compactación, según Bowen y Kratky (1985), en forma de capas subterráneas duras, afecta la producción de cultivos en todo el mundo, ya que es especialmente grave porque reduce el drenaje natural del campo (Figura 3).

Al respecto, Duarte y Jacoby (1972), mencionan que la primera señal de la existencia del "piso de arado" en un campo, a menudo es la falta de humedad para el cultivo durante períodos secos, porque en esas condiciones el agua subterránea nunca alcanza niveles adecuados. Cuando llueve ó el campo se riega, el agua penetra sólo hasta la capa dura, donde se esparce lateralmente sin llegar al subsuelo debajo de la capa compactada.

De hecho, uno de los efectos directos de los "pisos de arado" más bien conocidos en el campo, es el que se debe a la gran resistencia del suelo, el cual provoca un deficiente desarrollo de las raíces del cultivo al finalizar las lluvias, causando que muchas plantaciones se sequen rápidamente, no aprovechándose así los últimos órganos fructíferos que la planta produce; es decir, el sistema radicular somero que resulta, predispone al cultivo a los daños y a la pérdida de rendimiento que puede causar la sequía. Esas capas subterráneas duras ("pisos de arado"), pueden disminuir el rendimiento de la caña de azúcar en 20 Ton/Ha y de algodón en un fardo por hectárea (Bowen y Kratky, 1985).

Miranda et al. (1976), indican que gran parte de las labores de preparación de suelos, se hacen al encontrarse el campo más ó menos húmedo, tal como sucede en la preparación de la cama para la semilla, siembra, fertilización, aplicación de pesticidas, etc. Debido a lo anterior y a lo ya mencionado, el tránsito de vehículos y la acción de los implementos de labranza provocan la compactación del suelo y subsuelo cada año y en forma acumulativa, causando los daños siguientes: disminución de los espacios porosos de el suelo, infiltración deficiente del agua, influencia negativa en los microorganismos del suelo y obstáculo físico para el desarro -

llo de raíces (Ver: Efectos de la compactación).

Por todo lo descrito anteriormente, un buen agricultor debe romper los "pisos de arado". Dependiendo de la relación entre factores de suelo, económicos y técnicos, existen varias técnicas de cultivo y preparación de tierras que alivian las capas duras del subsuelo. Algunas son el uso del subsolador, arado de vertedera profundo ó de subsuelo, arado de cinceles, cultivos de cobertura y rotación de cultivos. Las tres primeras dan solución rápida al problema, en tanto que las dos últimas requieren varios años para mostrar sus efectos benéficos (Bowen y Kratky, 1985).

2.4.1. Clasificación de los pisos de arado.

Un estudio detallado de varias operaciones de cultivo (Baver et al., 1973), reveló que casi todos los implementos agrícolas formaban algún tipo de "piso" en suelos húmedos. Había pisos de arado (vertedera y discos), pisos de rastra de discos y pisos de tránsito. Aunque son más conocidos los pisos de arado (debido a que sus efectos son los más severos), todos estos pisos causan los mismos problemas (reducen la permeabilidad del suelo al agua, restringen la proliferación y alargamiento de las raíces, etc.).

2.4.1.1. Pisos de arado (vertedera y discos).

Baver et al. (1973), indican que la acción de la compactación del arado es notablemente perjudicial cuando la profundidad de aradura es constante. Al respecto, Flegmann y George (1975), señalan que la incidencia de estas formas de compactación, puede ser reducida variando la profundidad de la aradura año con año ó usando alguna de las técnicas que alivian estas capas duras (subsolador, arado de subsuelo, arado de cinceles, etc.). Además del efecto del arado mismo, ya se mencionó que existe la influencia de las ruedas del tractor y de las pisadas del ganado. Frese y Altemüller (1962), citados por Baver et al. (1973), realizaron un profundo estudio de la morfología de los pisos de arado, valiéndose de una técnica de secciones delgadas. Observaron que la acción normal del arado, deja una capa superficial floja y un subsuelo denso en el

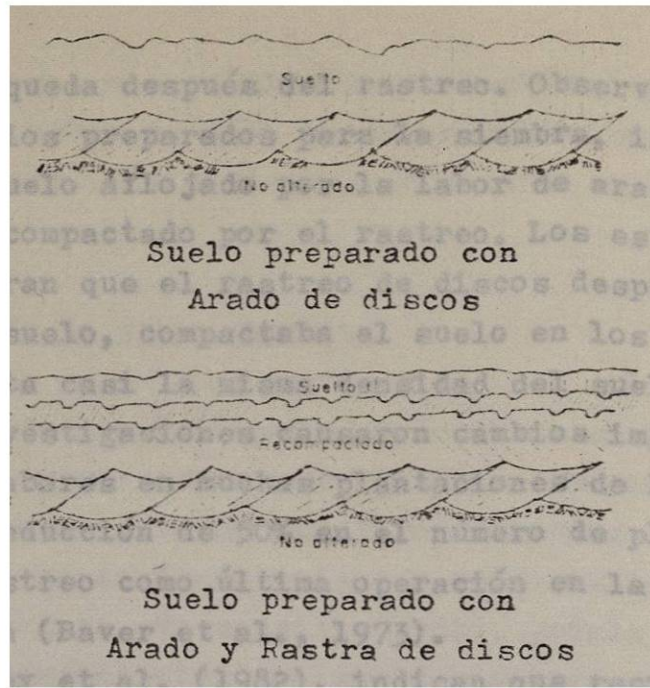


Fig. 4 Diagramas del perfil de suelo preparado para la siembra - con arado y rastra de discos (Baver et al., 1973).

que los agregados del suelo han sido compactados por el dental del arado. Microfotografías de la compactación por la costanera del arado de vertedera, demostraron la existencia de una acción de "frote" que formaba una película de arcilla de unos cuantos milímetros de espesor sobre la zona compactada (Ver: Implementos de Labranza). Este estado de compactación, disminuía la permeabilidad ó porosidad de esta zona, a tal grado, que podía impedir el crecimiento de las plantas. Con respecto al "piso" del arado de discos, este se forma principalmente donde los discos cortan el suelo en el fondo del surco (Figura 4).

2.4.1.2. Pisos de rastra de discos.

La rastra, cuya función es aflojar el suelo, puede también producir compactación, generada por las mismas fuerzas que causan la penetración de sus discos. El rastreo de discos es una de las últimas operaciones en la preparación de la cama de siembra. Su efecto de compactación en la formación del "piso", se describe claramente en la Figura 4. Se puede observar en esta perspectiva: a) el piso producido por el arado de discos; b) la zona recompactada; c) el piso producido por la rastra de discos; d) y la sorera capa

mullida que queda después del rastreo. Observaciones en varios perfiles de suelos preparados para la siembra, indicaron que del 50 - al 70% del suelo aflojado por la labor de arado (vertedera o discos), fue recompactado por el rastreo. Los estudios hechos en los E. U., muestran que el rastreo de discos después de la labor con arado de subsuelo, compactaba el suelo en los surcos de la arada profunda hasta casi la misma densidad del suelo primitivo no labrado. Estas investigaciones causaron cambios importantes en la secuencia de labores en muchas plantaciones de los E.U.A. De 1958 a 1964, hubo reducción de 50% en el número de plantaciones que hacían el rastreo como última operación en la preparación de la cama de siembra (Baver et al., 1973).

Gaultney et al. (1982), indican que recientemente en Indiana e Illinois E.U.A., se han realizado estudios al respecto. Uno de ellos, realizado en Indiana (1975) por la Soil Conservation Service, reveló que el uso de las rastras de discos fue eliminado en la preparación de la cama de siembra, dejando solamente las operaciones con arados de vertedera. Ahora bien, el estudio hecho por la Illinois Energy Advisory Committee en 1975, reveló que en Illinois hubo más campos agrícolas que eliminaron el uso de las rastras de discos que en Indiana. En conclusión, se determinó que el uso de las rastras de discos en general, declinó entre 1970 y 1974.

2.4.1.3. Pisos de tránsito.

Las operaciones posteriores a la aradura y rastreo, tales como la siembra, el deshierbe y las labores con cultivador, producen pisos de tránsito. Aunque este tipo de compactación ocurre entre las hileras del cultivo, tiene acción restrictiva en la penetración del agua y en el desarrollo de la raíz principalmente (Caterpillar, 1969; Baver et al., 1973; etc.). Se sabe que el efecto perjudicial del equipo agrícola, es mayor cuando el suelo se labra con humedad próxima a la C.C., sin embargo, la compactación también se produce en suelos secos (Parker y Jenny, 1945; citados por Baver et al., 1973). Ahora bien, aunque el rastreo de discos causa notable compactación, hubo considerable mejoría en la infiltración de agua y en el desarrollo de la raíz de los cultivos, cuando se -

eliminó el laboreo con cultivadores. También, el control químico - de las malas hierbas ha dado buenos resultados al respecto, ya que se practica con un mínimo de operaciones de maquinaria (Baver et al., 1973).

2.5. Efectos de la compactación.

La compactación del suelo agrícola ha sido reconocida, durante muchos años, como causante de daños a las condiciones del suelo, los cuales provocan efectos negativos directos, secundarios e indirectos sobre el crecimiento, vigor y rendimiento de los cultivos.

Específicamente, Threadgill (1982), señala que los efectos negativos de la compactación del suelo, incluye restricción del desarrollo de la raíz, movimiento de nutrientes, movimiento de agua y disponibilidad de oxígeno, que muchas veces resulta en reducciones de rendimientos de cosechas agronómicas (cultivos de grano, forrajeras, etc.) y hortícolas (legumbres, etc.).

Enseguida se discuten algunos de los efectos más importantes debidos a la compactación, pero no hay que olvidar que estos y - - otros efectos están correlacionados directamente.

2.5.1. Disminución de los espacios porosos.

Es esencial la aeración suficiente para que la semilla y la planta en crecimiento realicen las actividades normales de respiración. Además, los procesos microbiológicos aeróbicos dependen de una dotación suficiente de oxígeno. Así, el desarrollo de las raíces y el crecimiento normal de los cultivos están claramente relacionados con la aeración (Baver et al., 1973). De hecho, Duarte y Jacoby (1972), indican que las raíces necesitan abastecimiento - - constante de oxígeno para sus actividades de nutrición y desarrollo, pero cuando se compacta la tierra, se disminuyen los espacios porosos con aire en el suelo, dificultándose entonces su circulación normal.

Al respecto, Bowen y Kratky (1985), mencionan que se ha demostrado que en un clima húmedo, incluso la compactación más ligera puede tener efectos adversos sobre el desarrollo del cultivo, -

al causar la formación de condiciones anaeróbicas en la rizósfera mal aireada. La capacidad de la planta para absorber elementos nutritivos de la solución del suelo disminuye, y el cultivo comienza a mostrar síntomas de deficiencia nutritiva con reducción del crecimiento.

Un estudio en la Universidad Estatal de Iowa E.U.A., indica que la absorción de potasio (K) por el maíz, se redujo 70% en - - suelo gravemente compactado, la de nitrógeno (N) en 30%, la de magnesio (Mg) en 20% y la de calcio (Ca) en 10%. La reducción depende del tipo de suelo y del grado de compactación, pero invariablemente la absorción es afectada negativamente por la compactación del del suelo.

La aplicación de fertilizante adicional no corrige estos problemas, ni tampoco el uso de híbridos ó cultivares más eficientes en la utilización de los elementos nutritivos. Hay que entender - que la absorción de los elementos nutritivos por las plantas, depende de la disponibilidad de oxígeno en la rizósfera, condición - de la que carecen los suelos compactados por tener menor volumen - de poros.

El intercambio de O_2 y otros gases entre la atmósfera y el - suelo, tiene lugar por flujo de masa y difusión hacia y desde los poros del suelo. La compactación reduce el tamaño de los poros y, por lo tanto, el intercambio de gases en la rizósfera, creando con diciones anaeróbicas en la zona de las raíces. A su vez, como ya - se indicó, la anaerobiosis reduce la absorción de elementos nutritivos por parte de las raíces (Bowen y Kratky, 1985).

Ahora bien, Trowse (1962), citado por Baver et al. (1973), - indicó que la disminución del alargamiento de las raíces está relacionada con la aeración. Diversas investigaciones demostraron una íntima relación entre el índice de difusión del oxígeno y el crecimiento de plantas de maíz en un suelo compactado, concluyendo que la restricción en el desarrollo de las raíces se debe, primariamente, a la deficiencia de aeración. De hecho, se halló que las raíces no se elongaban cuando la tasa de difusión de oxígeno caía por debajo de cierto mínimo (Baver et al., 1973). Al respecto, Barley (1962), citado por Baver et al. (1973), señaló primeramente, que a

bajas presiones donde la resistencia mecánica del suelo es un factor mínimo, la concentración de oxígeno determina el grado de crecimiento de las raíces, y segundo, las raíces no se elongan bajo altos niveles de resistencia mecánica, cualesquiera que fuere el nivel de oxígeno (Ver: Obstáculo físico para el desarrollo de las raíces).

2.5.2. Infiltración deficiente del agua.

Con la excepción de los suelos tipo arenosos, la mayor parte de los suelos tienen capacidad suficiente de retención de agua. Sin embargo, la presencia de una capa compactada en la superficie del suelo, reduce la infiltración del agua de lluvia ó de riego y favorece el escurrimiento superficial, que puede llegar al 50% del agua, por lo que se restringe la cantidad disponible en el suelo para las plantas (Baver et al., 1973). Es importante considerar que una capa compactada de 6 mm de espesor en la superficie del suelo, puede determinar el valor del movimiento del agua en todo el perfil.

Según Bowen y Kratky (1985), la erosión y la compactación de el suelo van juntas, ya que el agua al no penetrar fácilmente en los suelos compactados (disminución de los poros), aumenta el escurrimiento en la superficie del suelo, originando corrientes superficiales de agua que aceleran la tasa de erosión laminar y de zanjas, especialmente en campos con pendiente. Más aún, la erosión retira el suelo superficial, dejando expuesto el subsuelo más compactado y tratar de obtener un cultivo en estas condiciones, da malos resultados. Así pues, la erosión en la superficie del suelo es tanto causa como efecto de la compactación.

Baver et al. (1973), indican que durante la infiltración del agua de lluvia, que generalmente está turbia, se forma una delgada capa compacta, debido a que el agua deposita partículas minerales en los poros grandes del suelo superficial, la cual se transforma en dura costra al secarse, reduciendo el intercambio de gases entre la atmósfera y el suelo, la infiltración de agua y dificulta la emergencia de las plántulas de los cultivos.

Duarte y Jacoby (1972), señalan que la compactación del sue-

lo, al dificultar la infiltración del agua, causa que ésta quede retenida ó acumulada en ciertas zonas del suelo (empantanamiento), ocasionando deficiencias de oxígeno, el cual de por sí ya reducido por la disminución de los poros. El oxígeno es necesario para las raíces así como para las actividades químicas y biológicas normales del suelo. Incluso, el empantanamiento causa una mayor incidencia de pudriciones apicales en los cultivos. Lo anterior puede comprobarse generalmente en el campo, cuando existe crecimiento retardado y poco uniforme de las plantas, que resulta en poblaciones variables del cultivo.

2.5.3. Influencia negativa en los microorganismos.

Baver et al. (1973), mencionan que la incorporación de la materia orgánica al suelo, trae a escena la acción de los microorganismos del suelo: hongos, actinomicetos, bacterias y levaduras. La materia orgánica en sí, sin transformaciones biológicas, tiene un efecto muy pequeño, si es que tiene alguno, en la estructura del suelo. El proceso metabólico de los microorganismos sintetiza las complejas moléculas orgánicas. Los productos residuales de la descomposición de los materiales orgánicos quedan en el suelo, y el resultado neto, es la producción de agregados estables.

Ahora bien, por la disminución de la circulación del aire -- (reducción de los poros), la compactación del suelo afecta en forma negativa a los microorganismos. Ya que para que descompongan el material orgánico y realicen otros muchos procesos bioquímicos en el suelo, necesitan del oxígeno del aire. Cuando este falta, se disminuye su población hasta paralizarse dichos procesos, quedando así en el suelo, elementos nutritivos que no son asimilables por las plantas, así como compuestos orgánicos e inorgánicos que no mejoran, en nada, las propiedades del suelo (Duarte y Jacoby, 1972). Por el contrario, la falta de aire puede incrementar la población de microorganismos patógenos (anaeróbicos), para los cultivos y el suelo en general.

2.5.4. Obstáculo físico para el desarrollo de las raíces.

Aunque otros factores distintos de la compactación (salinidad, sodicidad, mal drenaje, estructura, etc.), tienen mayor influencia en el desarrollo de un extenso sistema de raíces, toda resistencia física a la penetración, tiende a obstruir el normal crecimiento radical (Baver et al., 1973). De hecho, Gaultney et al. (1982), mencionan que las raíces de las plantas son muy sensitivas a las propiedades mecánicas del suelo. Al respecto, los agrónomos han desarrollado lo que podría llamarse "Laboratorio de raíces". Sus hallazgos confirman que la resistencia física ó mecánica del suelo a una probeta (penetrómetro de cono), tiene correlación con la capacidad de penetrar de la raíz de una planta.

La velocidad a que las raíces penetran el suelo, podría resultar tan importante al cultivo como la eventual zona en que habrá de ocurrir el desarrollo de las mismas. La profundidad de penetración de las raíces tiene importancia en función del rendimiento máximo, especialmente desde el punto de vista de la humedad. La humedad del suelo disponible para el cultivo, es proporcional al tamaño de su sistema de raíces. Ahora bien, se tiene que las capas superficiales del suelo son las primeras en volverse más secas, y son las que sufren el mayor grado de apisonamiento ó compactación debido al tránsito de vehículos en el predio (Caterpillar, 1969). Por esto, es importante desarrollar una zona más profunda para la formación de raíces, a fin de asegurar, en lo posible, la existencia de nutrientes y humedad durante las primeras etapas de crecimiento en condiciones desfavorables para la planta.

Los sistemas radiculares podrían ser demasiado someros, por que las raíces no penetran el suelo compactado en la zona radicular, y debido a esto, las plantas pueden mostrar señales de falta de humedad rápidamente (Bowen y Kratky, 1985). Incluso, Duarte y Jacoby (1972), señalan que con la compactación del suelo se produce un obstáculo físico para el desarrollo normal de las raíces, quedándose estas únicamente en la superficie, y no pudiendo aprovechar la planta el agua y los nutrientes que se encuentran por debajo de la capa dura. En cultivos como el maíz y la caña de azúcar, el acame de las plantas puede aumentar sustancialmente en estas

condiciones, lo mismo que la incidencia de pudriciones de las raíces. Incluso los herbicidas de pre-emergencia pueden perder efectividad, pues su movimiento hacia la rizósfera queda impedido por las capas compactadas (Bowen y Kratky, 1985).

Duarte y Jacoby (1972), señalaron que estas capas compactadas, llamadas "pisos de arado", se originaban debido a la compactación constante del suelo por el equipo agrícola, y debido a dichas capas compactadas, las raíces de los cultivos no pueden desarrollarse verticalmente y sufren alteraciones horizontales que en el campo se conocen como "patas de gallina" (Figura 5). Esta deformación se caracteriza porque la gruesa raíz principal se dobla tomando una posición horizontal, ó puede detener completamente su crecimiento desarrollando raíces laterales a lo largo de la parte supe-



Fig. 5 Malformación de la raíz llamada "Pata de Gallina" debido a la presencia del "Piso de Arado" (Miranda et al., 1976).

rior de las capas endurecidas (Caterpillar, 1969).

Taylor (1971), citado por Gaultney et al. (1982), concluyó - que cuando la raíz de una planta encuentra una capa dura de suelo, la raíz puede ser desviada horizontalmente ("pata de gallina"); - puede crecer dentro de la capa a una pequeña distancia y entonces cesar la elongación; ó puede elongarse en la misma dirección (vertical), a una proporción más lenta (Figura 6).

Ahora bien, el nivel de compactación requerido para detener el crecimiento de la raíz, se ha establecido en los E.U.A. a una resistencia de 300 lb/pulg² (21.1 Kg/cm²), a un penetrómetro de cono (Caterpillar, 1969). Según Gaultney et al. (1982), para el caso de las raíces del maíz, la elongación de la raíz se detiene a presiones arriba de 1,800 kPa (261 psi).

Según Voorhees (1977), citado por Gaultney et al. (1982), niveles moderados de compactación resultan en más ramificación de la raíz y, posiblemente, mejor exploración de la masa total de suelo. Al respecto, Trowse (1971), citado por Gaultney et al. (1982), - observó que bajo condiciones de compactación severa, la elongación de las raíces aumentaba lentamente resultando en un lento desarrollo de la planta.

Los experimentos de Gill y Miller (1956), citados por Baver et al. (1973), demostraron que el crecimiento de las raíces de los cultivos era casi anulado por la resistencia mecánica del suelo - cuando la concentración de oxígeno era baja; 15 lb/pulg² (1.055 Kg/cm²) disminuyeron el crecimiento de las raíces en 71% con un valor de oxígeno de 1%; el crecimiento casi cesó del todo a los 2 Kg/cm². Para una presión dada, el crecimiento de las raíces aumentó con un creciente contenido de oxígeno hasta el nivel óptimo por encima de 10% de oxígeno. La resistencia mecánica pareció ser el factor principal que afecta el desarrollo de las raíces a presiones mayores de 20 lb/pulg² (1.406 Kg/cm²).

Los resultados obtenidos por Barley (1962), citado por Baver et al. (1973), señalan varios hechos significativos concernientes al alargamiento de las raíces. Primero, a bajas presiones donde la resistencia mecánica es un factor mínimo, la concentración de oxígeno determina el grado de crecimiento de las raíces. Segundo, las

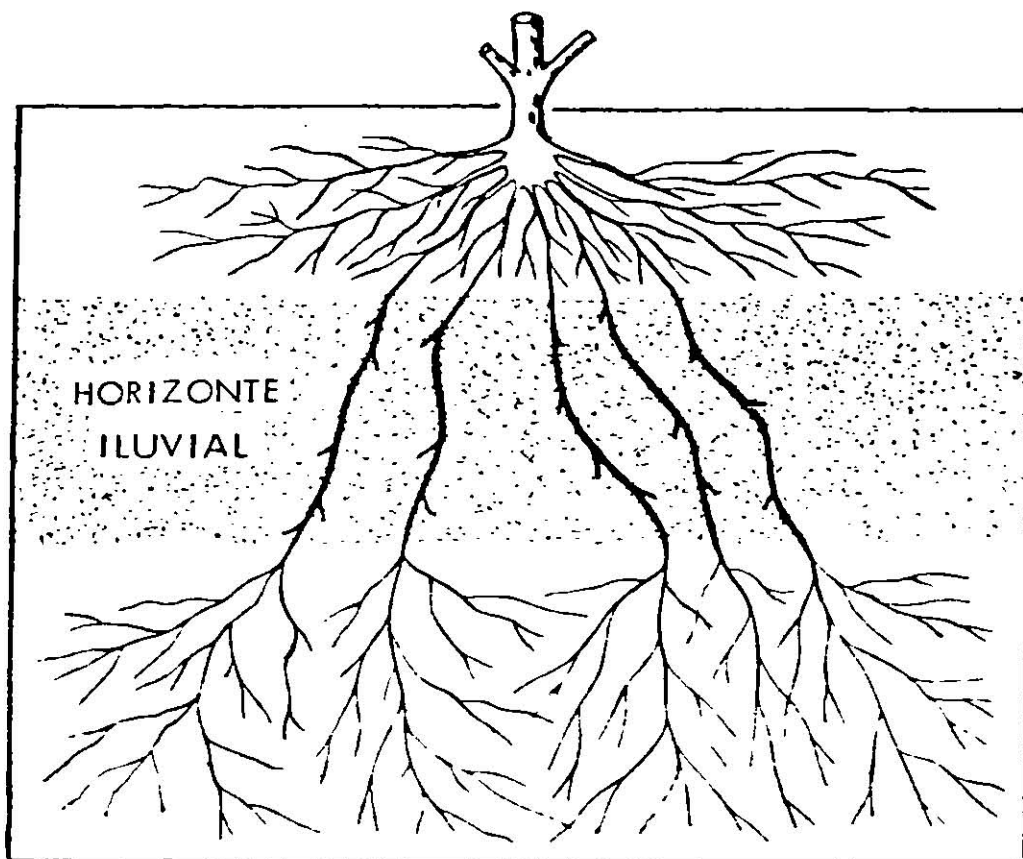


Fig. 6 Esquema que muestra el desarrollo de la raíz a través de un perfil de suelo con una capa u horizonte de suelo apisonado (J. Glover, South African Association Research Department, citado por Caterpillar, 1969).

raíces no se alargan bajo altos niveles de resistencia mecánica, cualquiera que sea el nivel de oxígeno. Tercero, para una concentración de oxígeno dada, el alargamiento de las raíces decrece en proporción logarítmica con el aumento de presión (resistencia mecánica).

Gaultney et al. (1982), indican que la compactación tiene su mayor consideración en el hecho de que materialmente inhibe ó desvía el crecimiento de las raíces fuera de sus patrones normales. Al respecto, los datos obtenidos en el área de interacción suelo compactado-raíz varían ampliamente en sus conclusiones, pero casi todas las investigaciones concordaron que la compactación severa en cualquier parte de la zona radicular, produce efectos negativos sobre el crecimiento de la raíz.

2.6. Cómo reducir la compactación.

Muchos agricultores son indiferentes a la compactación por creer que es un problema inevitable, y aunque en parte tienen razón, es indispensable tomar algunas medidas que reduzcan el problema, que puede resultar muy perjudicial para la producción de cultivos. Al respecto, se considera que tanto la intemperización como la labranza, se combinan para mantener un perfil de suelo que no impedirá el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, a pesar de lo anterior, si no se usan prácticas de racionalización del tránsito de vehículos e implementos agrícolas, los efectos negativos, sobre los rendimientos de los cultivos, se verán en mayor ó menor proporción (Caterpillar, 1969).

En la práctica, muchas veces el agricultor no tiene más alternativa que trabajar sus campos, incluso sabiendo que el nivel de humedad es demasiado alto y que causará compactación en el suelo (Bowen y Kratky, 1985). En estos casos, hay algunas medidas que puede adoptar a fin de reducir los daños al mínimo.

2.6.1. Congelamiento y deshielo.

El efecto del congelamiento y deshielo sobre el suelo, ha sido estudiado como un posible mecanismo de desmenuzamiento de los suelos compactados. Gaultney et al. (1982), mencionan que durante el invierno de 1979 y 1980, fueron llevados a cabo diferentes experimentos en el campo y en el laboratorio, con el fin de determinar el efecto cíclico del congelamiento-deshielo sobre las capas compactadas. Los efectos de la duración del ciclo, la humedad inicial del suelo y la disponibilidad de agua libre, fue notoria.

Algunos suelos son más susceptibles a los efectos del congelamiento y deshielo que otros. La formación de cristales de hielo al principio del congelamiento, es considerado un mecanismo importante en el aflojamiento de los suelos compactados.

Gaultney et al. (1982), señalan que para que ocurra una acción significativa de la "formación de escarcha", el suelo debe ser susceptible a la escarcha, deben existir condiciones termales apropiadas y debe estar presente un frente de agua. Oosterbaan -

(1963), citado por Gaultney et al. (1982), sintió que la distribución del tamaño del poro es una base racional para el criterio de susceptibilidad a la escarcha. Reed (1977), citado por Gaultney et al. (1982), añadió que el uso de los métodos de distribución del tamaño del grano para predecir la susceptibilidad a la escarcha, no pueden hacerse dentro de las considerables variaciones en densidad y tipo de suelo. Este investigador desarrolló una ecuación, la cual usa las distribuciones del tamaño del poro para predecir el grado de afectación de la formación de escarcha.

Sin embargo, existen afirmaciones contradictorias del grado de influencia que el congelamiento y deshielo tienen sobre el desmenuzamiento del suelo. De hecho, según "Implement and Tractor" (7 de Enero de 1979), citado por Gaultney et al. (1982), la compactación puede persistir a pesar de la labranza, aunque se afirma que uno de los agentes más activos que rompe la parte superior de los suelos compactados es el congelamiento y deshielo. También Gaultney et al. (1982), mencionan que las fuerzas naturales de congelamiento y deshielo no parecen ser agentes seguros para la desintegración de la compactación del subsuelo (pisos de arado). Esto es ratificado por Bowen y Kratky (1985), los cuales indican que el congelamiento y deshielo son agentes muy activos para el desmenuzamiento de las capas compactadas más superficiales del suelo, pero que no son tan efectivos para las capas compactadas del subsuelo. Incluso, se menciona que estas fuerzas naturales sólo son efectivas en las regiones nórdicas ó en aquellos lugares donde la acción del congelamiento-deshielo sea severa.

2.6.2. Cal, estiércol y fertilizantes.

La cal y el estiércol han sido estudiados por los agricultores y los científicos, desde hace mucho tiempo, como una solución práctica para los problemas de compactación del suelo. Sabemos que los datos de campo y de laboratorio no confirman ningún efecto directo de la cal sobre la compactación. Sin embargo, se sabe que el encalado impulsa un mayor desarrollo de la vegetación y de la producción de materia orgánica, lo que en general ayuda en la resistencia del suelo a la compactación. Experimentos realizados en Bél

gica, demostraron que la compactación por el piso de arado y el deterioro de la estabilidad de los agregados era doble en suelos pobres en cal comparado con el de suelos en los que era visible el carbonato de calcio (DeLeenheer, 1964; citado por Baver et al., 1973). El efecto de la cal se vio minimizado en campos en donde la densidad del ganado vacuno era mayor de 1.3 animales por hectárea; esto se debió a los efectos beneficiosos del estiércol. Sin embargo, es necesario no olvidar que el pastoreo ó "pisoteo" del ganado en un suelo muy húmedo, provoca que se "apelmaze" formando una costra muy dura en la superficie del suelo.

En general, el estiércol ejerce una influencia favorable en la agregación (granulación) y en la aeración del suelo, pero este efecto no es permanente. Con la posible excepción de fuertes aplicaciones, el beneficio en fertilidad es mayor que el beneficio físico. La aplicación de estiércol en los pastos de raíz profunda, aumenta el crecimiento de estos cultivos, lo cual ayuda en el desmenuzamiento de las capas compactadas (Baver et al., 1973). Se ha recomendado añadir de 50 a 60 toneladas de estiércol por hectárea en todas las granjas mecanizadas en que se nota el deterioro de la estructura del suelo.

Se sabe poco de los efectos de los fertilizantes sobre la compactación. Sin embargo, el aumento en la producción de follaje y de raíces como resultado de la aplicación de fertilizantes, tiene sin duda, gran influencia en la resistencia del suelo a la compactación. Esto es especialmente cierto en cultivos de pastos de raíz profunda.

Lutz et al. (1966), citados por Baver et al. (1973), obtuvieron de los fertilizantes fosfatados efectos importantes en el tempero del suelo, ya que disminuyó la resistencia del suelo y aumentó la capacidad de retención de agua. Sin embargo, debe tenerse cuidado con la aplicación de fertilizantes de sales de sodio, ya que causan dispersión en los agregados del suelo.

2.6.3. Drenaje.

Muchos agricultores usan implementos de disco (rastras, arados, bordeadores, etc.) en campos excesivamente húmedos, creyendo

que los discos aceleran el secado del suelo, sin saber que son de los implementos agrícolas que más compactación causan. Al respecto, diferentes investigadores y científicos, señalan que al mejorar el drenaje del suelo se reduce el nivel de humedad, y con esto, la compactación. Sin embargo, cuando el campo se labra muy húmedo habrá compactación aunque tenga buen drenaje. Más bien, el drenaje tiene su mayor consideración contra la compactación en el hecho de reducir el tiempo durante el cual el campo permanece excesivamente húmedo (Bowen y Kratky, 1985).

Ahora bien, la programación adecuada del riego también ayuda a reducir la compactación. Por ejemplo, programar las labores de labranza antes o suficientemente después de regar, para que la humedad del suelo sea la recomendada. Por otra parte, el sistema de riego debe estar bien diseñado y en buenas condiciones de funcionamiento. Por ejemplo, en los sistemas de aspersión, evitar las presiones y boquillas que formen gotas grandes, porque aumentan el escurrimiento y la compactación al sellar los poros de la superficie y formar una costra dura.

2.6.4. Sistemas de labranza.

Durante años los científicos han estudiado los efectos de los sistemas de labranza sobre el ambiente creado para el crecimiento de los cultivos. Trowse (1971,1980), citado por Gebhardt et al. (1986), indicó que las prácticas de labranza muchas veces producen excelentes ambientes para la germinación de la semilla, pero que se ignoran, en gran medida, las condiciones necesarias para el óptimo crecimiento de la raíz en etapas posteriores del desarrollo de la planta. Al respecto, diversos investigadores y científicos implementaron los sistemas de labranza reducida (por ejemplo: Labranza mínima y No-labranza), debido a que ocurrieron problemas de rendimiento en los campos agrícolas, a causa de la formación de capas compactadas en el suelo donde los sistemas de labranza convencional fueron practicados (Spoor, 1983; citado por Chaplin et al., 1986).

Lo anterior se debe a que los sistemas de labranza convencional implican el uso del arado (de vertedera o discos), rastras de

discos, sembradoras, cultivadoras, etc., los cuales causan la formación de los "pisos de arado", los que han sido reconocidos por décadas como causantes de problemas a los suelos y cultivos (Martin et al., 1976; citados por Chaplin et al., 1986). Sin embargo, a pesar de lo anterior, la labranza convencional ha sido practicada universalmente (Gebhardt et al., 1986). De hecho, para la producción de un cultivo por labranza convencional no-irrigada (Temporal), la labranza requiere más energía que cualquier otra actividad en la granja, exceptuando el secado de los granos (Laflen, 1977; citado por Gebhardt et al., 1986).

Gebhardt et al. (1986), señalan que la poca cobertura del residuo de los cultivos anuales en hileras por la labranza convencional, deja al suelo susceptible a la erosión, y la operación del equipo de labranza convencional, puede compactar el suelo tanto, que el crecimiento de la raíz es inhibido. Al respecto, Phillips y Young (1973), indican que en años pasados, prolongadas rotaciones de cultivos utilizando legumbres y pastos perennes de raíz profunda, fueron usados para vencer la compactación y mejorar las condiciones físicas del suelo entre los años de labranza convencional excesiva. Si no era factible el uso de especies perennes de raíces profundas, plantas anuales como el maíz y la remolacha azucarera, eran alternativas aceptadas. En general, todo lo anterior consiste en aplicar un sistema de rotación con cultivos que dejen poco residuo y otros que produzcan gran cantidad de materia orgánica. Estos últimos reducen la incidencia de la compactación del suelo durante la labranza convencional, lo mismo que el estiércol y las forrajeras perennes de raíces profundas (Bowen y Kratky, 1985).

Ahora bien, ya se mencionó que diversos investigadores y científicos implementaron los sistemas de labranza reducida (Por ejemplo: Labranza mínima y No-labranza), debido a los problemas causados por la labranza convencional. Al respecto, Phillips y Young (1973), señalan que desde que las operaciones de maquinaria de la no-labranza (no-till), son solamente plantación, asperjado y cosechado; oportunamente los "pisos de arado" (plow pans), y otras capas compactas tendientes mecánicamente a desarrollarse, son evitadas. Gebhardt et al. (1986), mencionan que esto se debe a que

son eliminadas las fuerzas compactivas del suelo como son la preparación de la cama de siembra (aradura y rastreo), y las labores de cultivo. También, con la no-labranza, los residuos del cultivo son dejados sobre la superficie del suelo para proveer protección contra la erosión. Apesar de que la no-labranza provee dos de las mayores ventajas en la agricultura moderna (el ahorro de combustible y la conservación del suelo), todavía existe incertidumbre entre los científicos acerca de los efectos de la no-labranza sobre el ambiente planta-suelo (Phillips y Young, 1973). De hecho, Gebhardt et al. (1986), indican que tratar de predecir si una reducción en la labranza es una ventaja ó desventaja para una condición ambiental suelo-planta específica, es no obstante, extremadamente difícil.

Sin embargo, Threadgill (1982), en base a lo anterior, señala que los sistemas de labranza han sido reconocidos ampliamente como los factores más controlables para reducir la compactación de el suelo.

2.6.5. Agricultura por tráfico controlado.

Una práctica relativamente nueva llamada "Agricultura por tráfico controlado", puede reducir el problema de la compactación en suelos susceptibles. Con este sistema, todos los años el tráfico de las ruedas está confinado a las mismas huellas desde el cultivo hasta la cosecha. El área de suelo con huellas de las ruedas no está cultivada, lo que reduce los requisitos de energía, ya que el suelo que se labra, requiere menos trabajo pues no ha sido compactado por el tráfico de ruedas (Dumas et al., 1973; citado por Williford, 1980).

Esta práctica, aparte de los requisitos reducidos de energía y tiempo, causa que el suelo no pierda capacidad para la infiltración de agua (drenaje del suelo), así mismo se reduce la erosión del suelo y, en algunos casos, ha habido aumentos de rendimiento. Sin embargo, los geotécnicos e ingenieros que han trabajado con el sistema no pronostican aumentos de rendimiento para todas las superficies y creen que el ahorro de tiempo y energía puede ser un incentivo mayor (John Deere, 1976).

He aquí las recomendaciones que todo agricultor puede llevar a cabo para controlar el tráfico en el campo:

1. Aparear las ruedas del implemento a la trocha del tractor y usar tractores de 4 ruedas en vez de modelos triciclos.
2. Reducir el número de viajes sobre el campo para la preparación de camas de siembra. Tirar juntos dos ó más implementos de arrastre livianos en vez de hacer viajes separados.
3. Cambiar a cultivo reducido, ó más aún, al sistema de - - plantación "no-till" ó "no-labranza".
4. Si es posible, mantener todas las ruedas del tractor sobre el suelo firme durante la aradura, en vez de colocar una rueda en el surco.
5. Cada vez las bandas ó fajas de trabajo deben hacerse lo más ancho posible a través del campo.
6. Sacar el contrapeso extra del tractor cuando éste no se requiere para la tracción. Para reducir la necesidad de lastre extra, manejar a las velocidades máximas recomendadas.
7. Sembrar los cultivos en las aporcaduras ó camellones para proporcionar un suelo menos compacto para el crecimiento de las raíces. Usar los mismos camellones todos los años y seguir los modelos establecidos para el tráfico de todas las ruedas (Figura 7).

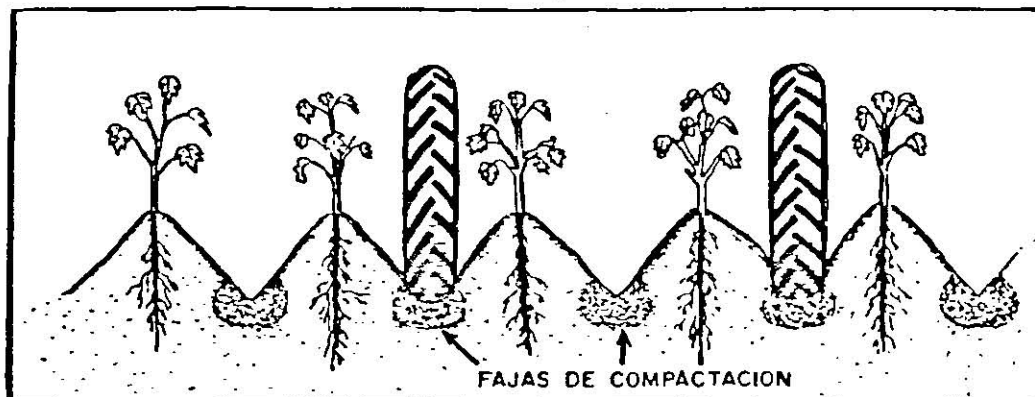


Fig. 7 Esquema mostrando fajas de compactación (llantas e implementos) y zonas de fácil desarrollo de las raíces (Duarte y Jacoby, 1972).

8. Evitar trabajar el suelo demasiado húmedo. De ser posible, usar aplicaciones aéreas de productos químicos si el suelo está húmedo y sujeto a compactación.
9. Usar subsoladores para romper el fondo del surco ó alguna otra práctica conveniente al caso (Ver: Pisos de arado).

3. DISCUSION Y CONCLUSIONES

El suelo es dinámico, ya que en él se desarrollan constantemente procesos químicos, biológicos, químico-biológicos y otros, - los cuales para su normal actividad necesitan del abastecimiento - constante de oxígeno y otros elementos. Estos procesos son fundamentales para el desarrollo de la vida animal y vegetal en el suelo, ya que ellos dejan los minerales en formas asimilables para - las plantas y producen compuestos orgánicos que mejoran, en general, todas las propiedades del suelo. Por lo anterior, es de vital importancia que el suelo tenga las condiciones adecuadas para facilitar la movilización del aire y el agua, para el buen desarrollo de las raíces, etc.

Los suelos compactados no tienen las condiciones adecuadas - anteriores. Sin embargo, aquellos suelos que tienen desarrollada - una buena estructura por medio de las fuerzas naturales - como son la penetración de la raíz, descomposición de los materiales de las plantas y la actividad de los microorganismos del suelo-, y que - son cubiertos con gran cantidad de residuos de cultivos, son más - resistentes a una seria compactación que otros suelos. Incluso el contenido de humedad, tipo de suelo (textura, estructura, etc.), y la cubierta superficial de materia orgánica de un suelo, determinan el grado de daño producido por la compactación debida al peso y a la operación de la maquinaria agrícola.

Ahora bien, las reacciones del suelo a cambios en el tiempo -cargas de implementos (fuerzas de penetración y corte), diferentes niveles de presión (pesos de las máquinas), área y forma de la carga de contacto superficial (llantas u orugas), etc.-, dependen de la exacta situación (condición de suelo) encontrada en un tiempo en particular. De hecho, la complejidad del comportamiento del suelo aumenta con el aumento en la operación del equipo agrícola. Sin embargo, con el equipo moderno es posible cumplir con el trabajo de labranza a pesar del suelo húmedo ó cualquier otra mala condición, por lo que frecuentemente el itinerario programado de cultivos y el alto nivel de inversión en maquinaria, dicta que se siga adelante a pesar de las malas condiciones del suelo. Las consecuencias son, muchas veces, la formación de los pisos de arado y

una pérdida en la estructura del suelo, las cuales no muestran sus efectos dañinos hasta que el cultivo subsecuente está produciendo ó igualmente cosechado.

Con base en lo anterior, los agricultores han dado importantes pasos en el mejoramiento de los cultivos durante los últimos años, comprendiendo ahora que ya no es posible conformarse con los tratamientos tradicionales de manejo de suelos, ya que observaron que esos trabajos tradicionales destruían las condiciones naturales del suelo (estructura), al disminuir la cantidad de materia orgánica y a la formación excesiva de polvo. Este manejo inadecuado de los suelos, ocasiona mal drenaje, erosión y falta de aeración, produciendo una seria compactación. Incluso, se ha comprobado que estos tratamientos incrementan la compactación del suelo, a tal grado, que en ciertas regiones es sumamente difícil obtener producciones estables de los cultivos. En general, esto se debe a que la compactación restringe el desarrollo de las raíces, el movimiento de nutrientes, el movimiento de agua, la disponibilidad de oxígeno y aumenta la energía requerida para labranzas subsecuentes.

Existen algunas prácticas generales que reducen la compactación del suelo, y sería muy conveniente tratar de combinarlas, por ejemplo; utilizar el sistema de agricultura por tráfico controlado con un sistema de labranza reducida (labranza mínima, no-labranza, etc.), con aplicaciones de cal ó fertilizantes, etc.

En conclusión, la compactación del suelo superficial puede remediarse, en forma general, con la labranza normal. En cambio, la compactación del subsuelo (pisos de arado), es más difícil de corregir y tiene un efecto perjudicial mayor sobre los cultivos.

Por otra parte, se necesita un determinado grado de compactación a nivel de las semillas. Esto es porque crea una mejor barrera de difusión para el aire y el agua. Incluso, es necesaria una compactación general del suelo, para que las raíces de los cultivos tengan un buen sostén.

Desafortunadamente, en todos los trabajos y reportes previos marcados por la literatura sobre compactación en suelos agrícolas, se ha observado, en general, que hay una falta de información simultánea y de coordinación en las pruebas de campo y en las pruebas índice de laboratorio.

4. RESUMEN

La compactación del suelo se define como el aumento de la densidad de masa (volumétrica) seca del suelo, que resulta de la aplicación de un peso ó carga (fuerza). Esto disminuye la porosidad del suelo, causando principalmente la reducción de la circulación del aire y el agua, así como la difícil penetración de las raíces de los cultivos. La compactación se mide comunmente de dos formas; por la densidad en masa (volumétrica) expresada en gr/cm^3 , y por la resistencia del suelo expresada en Kg/cm^2 (lb/pulg^2). La clasificación de las principales variables que son función del grado de compactación del suelo son: la cantidad de materia orgánica, la distribución de los tamaños de las partículas y de los poros de el suelo, la cantidad y la naturaleza de la fracción de arcilla coloidal, el contenido de humedad y la fuerza (peso ó carga) de compresión aplicada al suelo. Cabe señalar que de las anteriores variables, las fuerzas de compresión aplicadas al suelo, son los parámetros de mayor consideración (en este trabajo), para el estudio de la compactación.

Se sabe que la materia orgánica tiene su mayor efecto en el hecho de que mejora la estructura de los suelos, debido a la producción de agregados estables. Sin embargo, no sólo mejora la estructura del suelo, sino que mejora, en forma general, todas sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Con respecto a la distribución de los tamaños de las partículas y de los poros del suelo, se tiene que en base a ello, podemos determinar que suelos son inherentemente más susceptibles a compactarse. Por ejemplo, es lógico pensar que ocurre mayor compactación en suelos arcillosos ó francos que en suelos arenosos u orgánicos. De hecho, lo anterior se relaciona con la cantidad y la naturaleza de la fracción de arcilla coloidal, ya que dependiendo de su proporción, se puede determinar el grado de compactación posible en un suelo. Las dos anteriores variables dependen básicamente del tipo de suelo. En cuanto a la humedad, se sabe que un aumento de ésta en el suelo al inicio, ayuda al estrecho aglomerado de las partículas, favoreciendo la compactación; pero arriba de un cierto contenido de humedad, el

agua adicional evita el aglomerado de las partículas del suelo, y por ello, disminuye la compactación. Incluso, se ha comprobado que el contenido de humedad óptimo para una compactación máxima, es muy cerca del contenido óptimo deseable para la labranza agrícola.

Ahora bien, las fuerzas de compresión aplicadas al suelo, llamadas en este trabajo FUERZAS EXTERNAS MECANICAMENTE APLICADAS, como son el tráfico de vehículos y la labranza (implementos agrícolas), son las variables de mayor consideración en este estudio. Los factores principales que intervienen en la extensión de los efectos de la compactación debido al TRAFICO DE VEHICULOS son: el nivel de humedad del suelo, número de pasos del equipo, aflojamiento inicial del suelo, peso total del vehículo y la presión de superficie específica (presión de contacto) de las llantas u orugas. En cuanto a los IMPLEMENTOS DE LABRANZA, son considerados como los principales causantes de la compactación, debido a que la ocasionan de la misma forma que el tráfico de vehículos pero, a la vez, causan compactación de otras formas más graves. Por ejemplo: las cuchillas ó bordes de ataque de los implementos, causan compactación debido al "frotado" que originan al penetrar y cortar el suelo; también, la excesiva "pulverización" del suelo debida a la labranza normal, provoca la formación de partículas muy finas en la superficie del suelo, las cuales se desplazan al drenarse el exceso de agua através del perfil y someterse a "colado" por el suelo en estado natural, ocupando los poros del mismo y formando una masa más compacta a diferentes profundidades. Lo anteriormente mencionado fueron formas generales de compactación debidas a los implementos de labranza en particular. Tenemos por ejemplo, que el arado de vertedera causa compactación de dos formas; una es la fuerza de reacción descendente ó inclinada necesaria para que el arado corte y penetre en el suelo, y la segunda es el efecto de "frotado" debido al deslizamiento de las partes del arado (costilla, costanera, talón, etc.) por el suelo. En cuanto a las rastras de discos, estas compactan el suelo debido al considerable peso que requieren para poder penetrar el suelo, y a la transferencia de dicho peso através de las pequeñas áreas de las hojas de los discos al suelo. Básicamente las formas específicas de compacta-

ción se limitan a las ya mencionadas anteriormente.

Ahora bien, a medida que los suelos se vuelven más firmes - después de la labranza, diversos investigadores señalaron que en el suelo inmediatamente debajo de la profundidad de aradura (zona de labranza), se forma una capa ó capas severamente compactadas - llamadas "pisos de arado" en español ó "plow pans" en inglés. Incluso, diversas investigaciones realizadas descubrieron que aproximadamente el 90% de los suelos dedicados a la agricultura en Latinoamérica, estaban afectados por algún tipo de capas duras (pisos de arado), a una profundidad que variaba entre 20 y 70 cms. Estas capas duras afectan la producción de los cultivos debido a que provocan deformaciones y mal desarrollo en la raíz, así como anomalías conocidas en el campo como "patas de gallina". Debido al desarrollo defectuoso de la raíz y a su poca profundidad, era bien conocido que al iniciarse la época seca, las plantaciones recibían un "golpe fisiológico" y morían prematuramente por la falta de - - agua, al no poder aprovechar la que se encuentra en las capas más profundas. Además, por la formación de los pisos de arado, el viento puede acamar la plantación por mal anclaje de las raíces, ocurren deficiencias de oxígeno por empantanamiento, mal aprovechamiento de los fertilizantes, etc. Los pisos de arado se clasifican según el implemento agrícola que los cause, existiendo principalmente tres tipos; los pisos de arado (vertedera o discos), los pisos de rastras de discos y los pisos de tránsito. Existen varias técnicas que alivian los "pisos", estas son; el uso del subsolador, arado de vertedera profundo ó de subsuelo, arado de cinceles, cultivos de cobertura y rotación de cultivos.

Los efectos de la compactación del suelo son muchos y muy variados. Sin embargo, los principales son: la disminución de los espacios porosos del suelo, la infiltración deficiente del agua (lluvia ó riego), la influencia negativa en los microorganismos del - suelo y el obstáculo físico para el desarrollo de las raíces.

Debido a que la compactación disminuye los espacios porosos de aire en el suelo, dificulta la circulación normal del oxígeno y otros gases, los cuales requieren de un abastecimiento constante - en las raíces para sus actividades de nutrición y desarrollo, así

como para las actividades químicas y biológicas normales del suelo. Este efecto está relacionado con el escurrimiento excesivo del agua, debido a que al disminuir los poros del suelo, dificulta también la infiltración del agua. Esto origina corrientes superficiales que aceleran la tasa de erosión laminar y de zanjas, particularmente en suelos con pendiente. De hecho, puede originar la retención de agua en lugares bajos (empantanamiento), lo cual dificulta aún más, la circulación de aire en el suelo, de por sí ya reducida por la disminución de los espacios porosos. Incluso, causa una mayor incidencia de pudriciones de las raíces. También, la disminución de la circulación del aire en el suelo, afecta en forma negativa a los microorganismos, ya que para que realicen la descomposición del material orgánico y otros muchos procesos bioquímicos, necesitan del oxígeno del aire, y cuando este falta, disminuye la población microbiana hasta paralizarse dichos procesos. Sin embargo, el efecto más directo de la compactación, sin duda, es el obstáculo físico que representa para la penetración y desarrollo de las raíces de los cultivos. Este efecto tiene su mayor consideración en el hecho de que materialmente inhibe ó desvía el crecimiento de las raíces fuera de sus patrones normales. Esto causa deformaciones horizontales de la raíz llamadas generalmente "patas de gallina", las cuales a su vez, originan una disminución de la capacidad de los cultivos a las sequías, debido a que las raíces no logran absorber el agua y los nutrientes de los niveles más profundos del suelo. Incluso, el viento puede acamar la plantación por mal anclaje de las raíces.

Aunque no se puede controlar del todo, existen algunas medidas que se pueden adoptar con el fin de reducir los daños de la compactación del suelo al mínimo. Al respecto, se ha comprobado que las fuerzas naturales de congelamiento y deshielo, son agentes muy efectivos en el desmenuzamiento de las capas compactadas superficiales del suelo, pero que no lo son tanto en las del subsuelo (pisos de arado). Sin embargo, se indica que estos agentes sólo son efectivos en las regiones nórdicas ó en aquellos lugares donde la acción del congelamiento-deshielo sea severa. En cuanto a la cal, el estiércol y los fertilizantes, estos han sido estudiados -

desde hace años como soluciones prácticas para los problemas de compactación del suelo. Se ha comprobado que la cal ejerce una influencia favorable, ya que mejora la agregación y la aeración del suelo (estructura). De hecho, estos mismos efectos los ejercen las aplicaciones de estiércol y fertilizantes, pero estos últimos también favorecen el aumento en la producción de follaje (materia orgánica) y de raíces como resultado del aumento en fertilidad. Esto tiene sin duda, gran influencia en los mecanismos de resistencia del suelo a la compactación. También, al mejorar el drenaje del suelo se reduce la compactación, debido principalmente a que se reduce el tiempo durante el cual el campo permanece excesivamente húmedo.

Por otra parte, sabemos que los sistemas de labranza juegan un papel importante en la compactación de los suelos agrícolas, ya que dependiendo de su manejo en general, se determina el grado de los daños que causen. Por ejemplo, en la labranza convencional, a pesar de causar seria compactación debido al empleo de máquinas agrícolas en la preparación de las camas de siembra y de las labores de cultivo, se pueden usar algunas prácticas que disminuyan los efectos de la compactación, como el uso de rotaciones de cultivos (utilizando legumbres y pastos perennes de raíz profunda), cultivos que dejen gran cantidad de materia orgánica ó de cobertura vegetal, así como la aplicación de cal, estiércol, fertilizantes, etc. En general, para la labranza convencional, los cultivos anuales en hileras no poseen el potencial de contribuir positivamente a la compactación como lo tienen los cultivos perennes de raíz profunda. Se ha comprobado que las rotaciones de cultivos han tenido una máxima eficacia al promover y mantener una buena estructura de el suelo, así como en mejorar los mecanismos de resistencia a la compactación. Esto se debe, primariamente, al efecto de granulación del sistema de raíces de los cultivos, a la influencia de la cubierta vegetal y a la producción de materiales orgánicos que promueven la actividad biológica. Así también, se tienen los sistemas de labranza reducida, como por ejemplo, la no-labranza, la cual tiene como únicas operaciones de maquinaria (factores compactivos) la siembra, el asperjado y el cosechado. Los que defienden este ti

po de sistemas, sostienen que el rastrojo dejado en la superficie del suelo, lo protege del escurrimiento y erosión; y que evitan, - en cierta medida, las capas compactas tendientes mecánicamente a - desarrollarse. Incluso señalan el ahorro en energía y en tiempo. - Sin embargo, se ignora hasta la fecha si las reducciones en la labranza son una ventaja ó desventaja para una condición ambiental - suelo-planta específica.

Existe una práctica relativamente nueva llamada "Agricultura por tráfico controlado", la cual reduce la compactación sacando el lastre de exceso del equipo agrícola y limitando los viajes sobre el campo. Al respecto, se indica que de ser posible, se recomienda el uso de equipos livianos. Por supuesto, esto requiere una planificación muy cuidadosa. También recomienda retirar todo el peso de el equipo que no se requiera para efectuar el trabajo. Pero se debe uno cerciorar de usar bien el lastre, porque el deslizamiento ó patinaje de las llantas también compacta el suelo. Señala también, que de ser práctico, combinar dos ó más tareas en un viaje, ó mejor aún, ajustar los programas de manera que los trabajos puedan - efectuarse después que el campo haya secado lo necesario. En general, se menciona que al confinarse el tráfico de ruedas a los mismos centros de hileras durante toda la temporada, se limita el - - área compactada, se mejora el desarrollo de las raíces en el suelo restante y se ahorra tiempo y energía.

5. BIBLIOGRAFIA

- Anónimo. 1969. Costos de compactación de suelos para la agricultura. Caterpillar. VSDA 7925.
- Anónimo. 1973. Mayor producción y ahorro en su cañaveral. John Deere. p. 19-23.
- Anónimo. 1976. Fundamentos de funcionamiento de maquinaria; Cultivo. John Deere. FMO. p. 26-33.
- Anónimo. 1980. Compaction Data Handbook. Ingersoll-Rand. Form - - 15032-E.
- Aref, K.E., W.J. Chancellor y D.R. Nielsen. 1975. Dynamic Shear - Strength Properties of Unsaturated Soils. TRANSACTIONS of the ASAE. 18(5):818-823.
- Ayers, P.D. y J.V. Perumpral. 1982. Moisture and Density Effect on Cone Index. TRANSACTIONS of the ASAE. 25(5):1169-1172.
- Bailey, A.C. y E.C. Burt. 1981. Performance of Tandem, Dual and - Single Tires. TRANSACTIONS of the ASAE. 24(5):1103-1107.
- Bateman, H.P. 1963. Effect of Field Machine Compaction on Soil Physical Properties and Crop Response. TRANSACTIONS of the ASAE. 6(1):19-25.
- Baver, L.D., W.H. Gardner y W.R. Gardner. 1973. Física de Suelos. 1a. Edición. UTEHA. México, D.F. p. 56-73, 110-131, 205-236.
- Bowen, J.E. y B.A. Kratky. 1985. Compactación del suelo. Agricultura de las Américas. 34(6):10-14.
- Brixius, W.W. y F.M. Zoz. 1976. Tires and Tracks in Agriculture. - Society of Automotive Engineers. Form 760653.

- Chaplin, J., M. Lueders y D. Rugg. 1986. A Study of Compaction and Crop Yields in Loamy Sand Soil After Seven Years of Reduced Tillage. TRANSACTIONS of the ASAE. 29(2):389-392.
- Díaz Flores, C.L.A. 1985. Apuntes de maquinaria agrícola. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Trabajo no publicado.
- Dickey, E.C., T.R. Peterson, J.R. Gilley y L.N. Mielke. 1983. - - Yield Comparisons Between Continuous No-Till and Tillage Rotations. TRANSACTIONS of the ASAE. 26(6):1682-1686.
- Duarte, J.O. y I. Jacoby. 1972. Preparación y mantenimiento de los suelos algodnoneros de El Salvador. 1a. Edición. Impresos Litográficos de C. A. Santa Tecla (El Salvador, C. A.). p. 6-17.
- FitzPatrick, E.A. 1978. Introducción a las ciencias del suelo. 1a. Edición. Fondo Cultural. México, D.F. p. 14,73.
- Flegmann, A.W. y R.A.T. George. 1975. Soils and Other Growth Media. 1a. Edition. MacMillan Press. London, England. p. 117.
- Fuller, W.H. 1975. Soils of the Desert Southwest. 1a. Edition. The University of Arizona Press. Arizona, U.S.A. p. 27, 47.
- Gaultney, L., G.W. Krutz, G.C. Steinhardt y J.B. Liljedahl. 1982. Effects of Subsoil Compaction on Corn Yields. TRANSACTIONS of ASAE. 25(3):563-569.
- Gebhardt, M.R., A.K. Creek, C.L. Webber y J.M. Gregory. 1986. Soybean Culture Effects on Compaction of a Claypan Soil. TRANSACTIONS of the ASAE. 29(2):416-420.
- Gill, W.R., A.C. Bailey y C.A. Reaves. 1982. Harrow Disk Curvature Influence on Soil Penetration. TRANSACTIONS of the ASAE. 25(5): 1173-1180.

- Hammond, C., J.T. Reid y W.E. Seigler. 1981. Seedbed Preparation - Behind Row Subsoilers. TRANSACTIONS of the ASAE. 24(4):897-901.
- Hassan, A.E. 1978. Effect of Mechanization on Soils and Forest Regeneration - I. Coastal Plain Organic Soil. TRANSACTIONS of the ASAE. 21(6):1107-1112.
- Hillel, D. 1971. Soil and Water. 1a. Edition. Academic Press. New York, U.S.A. p. 167-168.
- Hillel, D. 1972. Optimizing The Soil Physical Environment Toward - Greater Crop Yields. 1a. Edition. Academic Press. New York, U.S.A. p. 193-194, 214-217.
- Johnson, C.E., D.W. Wright y A.C. Bailey. 1983. Compaction Characteristics of Some Soil Mixtures. TRANSACTIONS of the ASAE. - - 26(5):1337-1340.
- Juárez Badillo, E. y A. Rico R. 1984. Mecánica de suelos. Volumen I. 3a. Edición. LIMUSA. México, D. F. p. 575.
- Marshall, T.J. 1959. Relations Between Water and Soil. Commonwealth Agricultural Bureaux (England). Technical Communication No. 50.
- McKyes, E., E. Stemshorn y R. Bousquet. 1980. Damage to Agricultural Fields by Construction Traffic. TRANSACTIONS of the ASAE. 23(6):1388-1391.
- Miles, J.A. 1978. Soil Compaction Produced by Logging and Residue Treatment. TRANSACTIONS of the ASAE. 21(1):60-62.
- Miranda, C.A., J.O. Duarte, J.L. Olmedo, J.A. Castillo, T.A. Varela, M.A. Bruyeros, J.E. Villavicencio, M.A. Garzzona T., J.O. Romero y J.A. Gizzi G. 1976. Uso eficiente de maquinaria agrícola en El Salvador. Publicación Especial. Impresos Litográficos de C. A. Santa Tecla (El Salvador, C. A.). p. 14-18.

- Negi, S.C., E. McKyes, F. Taylor, E. Douglas y G.S.V. Raghavan. - 1980. Crop Performance as Affected by Traffic and Tillage in a Clay Soil. TRANSACTIONS of the ASAE. 23(6):1364-1368.
- Ohu, J.O., G.S.V. Raghavan, E. McKyes y G. Mehuys. 1986. Shear - - Strength Prediction of Compacted Soils with Varying Added Organic Matter Contents. TRANSACTIONS of the ASAE. 29(2):351-355.
- Ortiz-Cañavate, J. 1975. Técnica de la Mecanización Agraria. Tomo I. 1a. Edición. INIA. Ministerio de Agricultura. Madrid, España. p. 101-102, 152-154.
- Phillips, S.H. y H.M. Young, Jr. 1973. No-Tillage Farming. 1a. Edition. Reiman Associates. Milwaukee (U.S.A.) p. 57, 91.
- Pollock, D., J.V. Perumpral y T. Kuppusamy. 1986. Finite Element - Analysis of Multipass Effects of Vehicles on Soil Compaction. TRANSACTIONS of the ASAE. 29(1):45-50.
- Porterfield, J.W. y T.G. Carpenter. 1986. Soil Compaction: An Index of Potential Compaction for Agricultural Tires. TRANSACTIONS - of the ASAE. 29(4):917-922.
- Raghavan, G.S.V. y E. McKyes. 1979. Performance of Traction Wheels in a Clay Soil. TRANSACTIONS of the ASAE. 22(2):229-232.
- Raghavan, G.S.V., E. McKyes y B. Beaulieu. 1978. Clay Soil Compaction Due to Wheel Slip. TRANSACTIONS of the ASAE. 21(4):646- - 649.
- Raghavan, G.S.V., E. McKyes, E. Stenshorn, A. Gray y B. Beaulieu. 1977. Vehicle Compaction Patterns in Clay Soil. TRANSACTIONS - of the ASAE. 20(2):218-220.

- Raghavan, G.S.V., E. McKyes, F. Taylor, P. Richard y A. Watson. -
1979. The Relationship Between Machinery Traffic Corn Yield Re-
ductions in Successive Years. TRANSACTIONS of the ASAE. 22(6):
1256-1259.
- Raghavan, G.S.V., E. McKyes, I. Amir, M. Chasse y R.S. Broughton.
1976. Prediction of Soil Compaction Due to Off-Road Vehicle -
Traffic. TRANSACTIONS of the ASAE. 19(4):610-613.
- Sooter, C.A. y W.F. Millier. 1978. The Effect of Pellet Coatings -
on the Seedling Emergence from Lettuce Seeds. TRANSACTIONS of
the ASAE. 21(6):1034-1039.
- Taylor, F., G.S.V. Raghavan, E. McKyes, S. Negi, B. Vigier y E. -
Stemshorn. 1981. Soil Structure and Corn Yields. TRANSACTIONS
of the ASAE. 24(6):1408-1411.
- Taylor, S.A. y G.L. Ashcroft. 1971. Physical Edaphology. 1a. Edi -
tion. W.H. Freeman and Company. San Francisco, U.S.A. p. 321,
355, 414-415.
- Taylor, J.H., A.C. Trowse, E.C. Burt y A.C. Bailey. 1982. Multi- -
pass Behavior of a Pneumatic Tire in Tilled Soils. TRANSACTIONS
of the ASAE. 25(5):1229-1232.
- Taylor, J.H. y E.C. Burt. 1975. Track and Tire Performance in Agri-
cultural Soils. TRANSACTIONS of the ASAE. 18(1):3-6.
- Taylor, J.H., E.C. Burt y A.C. Bailey. 1980. Effect of Total Load
on Subsurface Soil Compaction. TRANSACTIONS of the ASAE. 23(3):
568-570.
- Threadgill, E.D. 1982. Residual Tillage Effects as Determined by -
Cone Index. TRANSACTIONS of the ASAE. 25(4):859-863.

- Verma, B.P., A.C. Bailey, R.L. Schafer y J.G. Futral. 1976. A Pressure Transducer in Soil Compaction Study. TRANSACTIONS of the ASAE. 19(3):442-447.
- Wildman, W.E., C.A. Reaves y W.R. Gill. 1978. Effect of Slip Plow Design on Draft Forces and Soil Loosening. TRANSACTIONS of the ASAE. 21(3):422-426.
- Williford, J.R. 1980. A Controlled-Traffic System for Cotton Production. TRANSACTIONS of the ASAE. 23(1):65-70.
- Worthen, E.L. y S.R. Aldrich. 1959. Suelos Agrícolas. 2a. Edición. UTEHA. México, D.F. p. 62-65.
- Zimmerman, M. 1970. Cómo escoger un tractor agrícola. Agricultura de las Américas. 19(7):95-96.

