



*Propiedades Físicas de los Suelos de los Llanos Orientales y sus  
Requerimientos de Labranza*

*Edgar Amézquita*



UNIDAD DE INFORMACION Y  
DOCUMENTACION

39595

02 DIC. 1998

---

*Trabajo presentado en el Taller sobre "Encuentro Nacional de Labranza".  
Villavicencio, 28-30 de Abril de 1998*

# PROPIEDADES FISICAS DE LOS SUELOS DE LOS LLANOS ORIENTALES Y SUS REQUERIMIENTOS DE LABRANZA<sup>1/</sup>

*Edgar Amézquita<sup>2/</sup>*

## **RESUMEN**

En el trabajo se definen algunos aspectos relacionados con las prácticas de labranza de suelos, los cuales a pesar de ser permanentemente utilizados por profesionales e investigadores en labranza, carecen de definiciones precisas y se prestan a mucha confusión. Asimismo, se plantea la importancia de la aplicación de aparatos de labranza al suelo y sobre su importancia en el control de los factores edafológicos de crecimiento de las plantas, los cuales se consideran esenciales para el buen crecimiento y desarrollo de las raíces y para la obtención de altos rendimientos.

A partir de datos experimentales y de la evaluación de propiedades y procesos físicos de algunos suelos de la Altillanura Colombiana, se discute sobre los sistemas de labranza más acordes con la situación actual de los suelos y sobre los conceptos de creación de una capa arable, la cual es indispensable para el desarrollo y ejecución de sistemas conservacionistas y de no-labranza, como una primera etapa de conseguir suelos sostenibles y sobre ellos sí poder hacer una agricultura sostenible.

Se discuten también algunos de los aspectos relacionados con la selección de tratamientos de labranza, cuando se planifican ensayos de preparación de suelos. De tal manera que el investigador esté siempre consciente de qué problema o problemas pretende solucionar al escoger los tratamientos y de qué respuesta en términos de mejoramiento de suelos y de cultivos espera obtener.

Por último, se plantea la necesidad que se tiene en la agricultura tropical bajo labranza, de comprender que la labranza en suelos con estructura débil constituye la práctica agrícola más importante, porque mediante ella se construye o se destruye el recurso suelo.

**Palabras claves:** *labranza, propiedades físicas, requerimientos labranza, Altillanura, sabana, labranza vertical, capa arable, perfil cultural, suelos tropicales, cambios por labranza.*

---

1/ *Taller sobre "Encuentro Nacional de Labranza". Villavicencio 28-30 de Abril de 1998.*

2/ *Fisico de Suelos. CIAT, Apartado Aéreo 6713, Cali, Colombia*

## **1. Introducción**

Aunque la labranza es una práctica trascendental para asegurar el mejoramiento de los suelos y garantizar la sostenibilidad de la agricultura, poca importancia ha recibido, si se la compara con la que se le ha dado a los problemas de acidez y de fertilidad en los suelos tropicales.

La fragilidad de la estructura de los suelos tropicales y su susceptibilidad a sellamiento, compactación, adensamiento y erosión, cuando se someten a sistemas de labranza intensivos, los hace muy susceptibles a degradación, con los consiguientes efectos negativos en la sostenibilidad agrícola y ganadera.

A partir de los efectos negativos que los sistemas de labranza que se han utilizado, han producido en muchos suelos del país, se ha despertado en Colombia un vivo interés por conocer el comportamiento de suelos y de cultivos cuando se aplican diferentes sistemas de labranza.

Con el ánimo de contribuir a la aclaración de ciertos conceptos utilizados en la investigación y en la práctica de la labranza y de discutir sobre las propiedades físicas que tienen que ver con las decisiones de preparación de suelos en la Altillanura Colombiana, se ha preparado este artículo el cual se inicia con dos preguntas fundamentales: *¿Para qué es la labranza?* y *¿Qué es la labranza?*

**Para qué es la labranza?** La labranza en su concepción de comportamiento físico del suelo, debe ser utilizada para corregir cualquier factor físico que sea limitante para el desarrollo normal de las raíces de los cultivos que se piensan establecer. El haber conceptualizado la labranza, como un medio para controlar malezas o como un medio para obtener una mejor acción de los herbicidas, ha conducido al deterioro estructural superficial de muchos suelos a nivel mundial y especialmente a nivel de la faja tropical. En Colombia es común ver cómo los suelos bajo agricultura intensiva han ido perdiendo su estructura superficial y como producto de esto se han sellado y encostrado.

La labranza debe ser siempre correctiva y creativa. Correctiva, en el sentido de que debe corregir cualquier factor físico limitante que presente el suelo para el desenvolvimiento normal de las raíces de las plantas. Creativa, en el sentido de que debe permanentemente conducir al desarrollo de una capa arable, que no presente limitaciones físicas, químicas ni biológicas para el crecimiento de las raíces, de tal manera que se vaya edificando la sostenibilidad de los suelos y de la agricultura.

**Qué es labranza?** Labranza o preparación de suelos, es la manipulación mecánica de éste con el fin de alterar su estructura y disminuir su resistencia a la

penetración de las raíces para convertirlo en un medio con condiciones óptimas para la germinación de las semillas y el desarrollo productivo de los cultivos (Figuroa y Morales, 1994).

Esta definición aunque objetiva, generaliza la función de la labranza al no especificar que ella debe corregir problemas específicos que deben haber sido identificados y diagnosticados previamente.

Hillel *et al.* (1969) definen la labranza como la manipulación mecánica del suelo que tiende a mejorar las condiciones del suelo que afectan la producción de cultivos. Afirma que los tres objetivos que se buscan con la labranza son: (a) incorporación de materia orgánica dentro del suelo, (b) control de malezas y (c) mejoramiento de la estructura. Una función auxiliar, que actualmente no está bien entendida, es la conservación de la humedad, la cual involucra los procesos de infiltración, escorrentía y evaporación (Hillel *et al.*, 1969) del agua del suelo. Estos conceptos son compartidos por Gill y Vanden Berg (1967) en su tratado sobre labranza, quienes además profundizan en lo relacionado con fracción, respuesta del suelo a diferentes tipos de implementos y sobre la conceptualización de los principios que rigen la labranza.

## ***2. Definiciones y tipos de labranza comunes en Colombia***

**Sistema de labranza:** serie secuencial de actividades que deben conducir a obtener a través del tiempo un suelo ideal para el desarrollo de las raíces de las plantas que permita que ellas expresen su potencial genético sin restricciones. Se hace con el fin de corregir cualquier factor limitante que posea el suelo y controlar cualquier proceso degradativo.

**Labranza primaria:** es aquella labranza que se hace con arado de discos o de vertedera, con cinceles, con subsolador o con rastras pesadas para descompactar capas endurecidas o adensadas e incorporar materia orgánica, con el fin de facilitar el desarrollo de las raíces de los cultivos. Es más agresiva y profunda (0-350 mm) que la secundaria y produce mayor rugosidad en el terreno.

**Labranza secundaria:** es aquella labranza que remueve el suelo superficialmente (a poca profundidad), proporciona mayor fraccionamiento de terrones superficiales y tiende a nivelar el terreno. Se hace con rastra de discos. Su profundidad de acción varía entre 0-150 mm.

**Cama de siembra:** es la capa más superficial de un suelo laborado, la cual se consigue con el uso del rastrillo pulidor después de que el suelo ha sido arado y rastrillado. Es la capa de suelo sobre la cual se deposita la semilla para asegurar su germinación.

**Labranza convencional:** se refiere a una combinación de labranza primaria hecha con uno o dos pases de arado de discos y de labranza secundaria hecha con dos o tres pases de rastra, más un pase de pulidor. Es la labranza que usualmente se ha hecho en las zonas frías del país.

**Labranza limpia:** es el proceso de arar y rastrillar un suelo, incorporando todos los residuos y previniendo el crecimiento de todo tipo de vegetación, excepto el del cultivo particular que se desea obtener durante el ciclo de crecimiento (SSSA, 1987). Prácticamente equivale a labranza convencional.

**Labranza reducida:** sistema en el cual las operaciones de labranza primaria son modificadas conjuntamente con procedimientos especiales de siembra, de tal manera que se reduzcan o eliminen las operaciones de labranza secundaria.

**Labranza apropiada:** es la labranza que actualmente requiere un suelo para el control de los factores que puedan afectar negativamente a los cultivos.

**Labranza vertical:** es aquella que se hace con cinceles y subsolador para "aflojar" capas compactadas y/o endurecidas, con el fin de promocionar mayor infiltración y crecimiento de raíces. El suelo entra en contacto con el implemento sólo en las líneas donde van acopladas las estructuras verticales (patas), las cuales producen la ruptura angular (45°) del suelo hacia la superficie.

**Labranza horizontal:** es la labranza que se realiza fundamentalmente con implementos que poseen discos (arados, rastras, rastrillos, Big-rome, etc.) los cuales disturbán la totalidad del suelo a la profundidad de trabajo.

**Labranza mínima:** es la mínima manipulación que se hace al suelo para la siembra de la semilla de un cultivo. Exige que el suelo presente una buena condición física, química y biológica para el crecimiento de las raíces.

**Labranza cero:** es el procedimiento mediante el cual, la siembra se hace directa y esencialmente en suelo no preparado, es decir, que no se disturba el suelo antes de la siembra.

**Labranza de conservación:** cualquier sistema de labranza y de siembra en el cual por lo menos un 30% de la superficie del suelo quede cubierta por residuos de plantas después de la siembra, con el fin de controlar erosión (CTIC, 1993). En este sistema se conserva la rugosidad de la superficie (Mannering y Fenster, 1983; Allmaras *et al.*, 1985).

### **3. Relaciones entre la labranza y los factores edafológicos de crecimiento de las plantas**

Se consideran como los factores edafológicos de crecimiento de las plantas a nivel de zona de crecimiento de raíces a los siguientes:

- Presencia y disponibilidad de los elementos nutritivos esenciales
- Succión del agua del suelo
- Aireación en la zona radical
- Penetración de raíces
- Temperatura

Se denominan factores de crecimiento porque su presencia es absolutamente necesaria para el crecimiento de las plantas; deben además estar presentes en cantidades adecuadas. El criterio de esencialidad, se refiere a que en la ausencia de cualquiera de ellos, las plantas no pueden crecer. Por ejemplo, sin agua las plantas no pueden crecer, sin aire no pueden respirar y por lo tanto no pueden crecer y producir rentablemente; si el suelo no permite que las raíces se desarrollen por oponer alta resistencia a su penetración, el crecimiento de los cultivos será muy restringido; si la temperatura del suelo es muy baja o excesivamente alta las raíces no pueden desarrollarse. Además, a temperaturas extremas las reacciones químicas del suelo se ven notablemente afectadas y se afecta negativamente la absorción de agua y de nutrientes por los cultivos. Por último, una suplencia inadecuada e inoportuna de elementos nutritivos afecta también negativamente a los cultivos (Amézquita, 1991).

El criterio de suficiencia, se refiere a que los cinco factores mencionados, deben presentarse dentro de determinados rangos óptimos, para que las plantas puedan expresar todo su potencial genético. Por ejemplo, existen límites críticos para la interpretación de cada uno de los diferentes elementos nutritivos; para el crecimiento óptimo de los cultivos, el porcentaje de humedad del suelo debe estar cercano a capacidad de campo; el porcentaje de espacio aéreo a capacidad de campo debe estar alrededor del 10% para que no haya restricciones en la aireación del suelo y para evitar que ésto afecte negativamente a los cultivos. Si los valores de penetrabilidad del suelo medido con penetrómetro exceden 0.1 MPa (1 bar) a capacidad de campo puede haber grandes restricciones en el crecimiento de las raíces (Amézquita, 1994).

Los cinco factores de crecimiento de las plantas son afectados directa y positivamente o negativamente por la labranza. La manipulación del suelo como se mencionaba antes, produce cambios en el acomodamiento actual (estructura) del suelo. Al producir aflojamiento de éste como consecuencia de las fuerzas aplicadas a través de los implementos de labranza, se aumenta el volumen que ocupaba el suelo y se suceden cambios profundos en el acomodamiento y

empaquetamiento del suelo lo cual causa cambios en sus propiedades volumétricas.

Una de las formas de estudiar la estructura del suelo desde el punto de vista de producción agrícola, es el de considerarlo como un medio poroso compuesto por poros de diferentes tamaños: macro, meso y microporos los cuales por su condición de tamaño confieren al suelo diferentes cualidades y comportamientos en relación con el crecimiento de las plantas (Greenland, 1977).

Por los macroporos se infiltra y mueve el agua que procedente de las lluvias llega al suelo. Por ellos, también circula el aire que lleva oxígeno a las raíces y dentro de ellos crecen las raíces y los pelos absorbentes de las plantas. Su diámetro equivalente tiene un límite inferior de  $50 \mu\text{m}$ . En los mesoporos ( $5.0-0.2 \mu\text{m}$ ) se almacena el agua aprovechable, que no es otra cosa que la solución nutritiva del suelo, la cual es absorbida por las raíces de las plantas para cumplir sus funciones de transpiración y de nutrición. En los microporos ( $<0.2 \mu\text{m}$ ) se encuentran en forma reducida los elementos Fe y Mn, los cuales solo en esta forma pueden ser absorbidos por las raíces. Por los macro, meso y macroporos se realizan respectivamente los procesos de interceptación, flujo de masa y difusión, por los cuales llegan los nutrientes a ponerse en contacto con las raíces (Amézquita, 1994; Orozco, 1991).

La labranza al causar cambios en la estructura actual del suelo, causa cambios en la distribución de tamaño de los poros y de esa manera afecta positiva o negativamente la distribución de tamaño de los poros y los procesos que ellos afectan en relación con el crecimiento de las plantas. Es por ésto, por lo que el autor considera a la labranza como la práctica agrícola más importante que se hace a los suelos, porque si ella se hace con conocimiento de qué problema o problemas se piensan solucionar conduce a la sostenibilidad de los suelos y de la agricultura, en caso contrario conduce a la degradación.

Una labranza constructiva debe conducir a obtener una buena distribución y estabilidad del sistema poroso. Debe tender a conseguir entre un 10-15% de macroporos, entre 20-25% de mesoporos y entre 10-15% de microporos en los primeros 25 a 30 cm de profundidad de tal manera, que se asegure la continuidad del espacio poroso en profundidad. Por otro lado, debe velar porque esa condición de buena distribución de poros que se ha creado sea estable en el tiempo, lo cual se consigue mediante la adición de materiales vegetales lignificados (tamos) fraccionados, los cuales incorporados al suelo en ciclos sucesivos de cultivo impiden que el suelo vuelva a la condición porosa que tenía antes de la aplicación del sistema de labranza.

#### **4. Diagnóstico del suelo en el campo para identificar sistemas de labranza**

Siempre debe hacerse el diagnóstico de los limitantes físicos de los suelos en el campo que se va a sembrar. Nunca debe el técnico o el agricultor, decidir sobre un sistema de labranza desde la oficina porque fracasará. Es el suelo y su problemática el sujeto que indicará qué sistema o sistemas de labranza requiere para solucionar la o las limitantes físicas que posee. Es un error pretender solucionar los problemas que posee un suelo sin haberlo previamente evaluado y diagnosticado. Solo el suelo indica su problemática, la cual siempre es específica del sitio y no se puede generalizar.

Para el diagnóstico de campo, se recomienda hacer cajuelas (40 x 40 x 40 cm) en varios sitios de campo. La selección de sitios para la elaboración de cajuelas puede hacerse al azar, en forma diagonal cruzada o en zig-zag en el lote problema. Se recomienda hacer un mínimo de 10-15 cajuelas en un lote o más si el muestreador no está satisfecho con la representatividad de los sitios que ha escogido para evaluar la problemática del terreno. Elaboradas a conciencia las cajuelas, se procede a la observación y toma de nota de las propiedades físicas que se presentan en cada una de ellas. Interesa conocer la profundidad de la capa superficial, los cambios de color, textura y estructura, la presencia de capas endurecidas, el espesor de éstas, la continuidad del espacio poroso, la profundidad a la cual se presenta el mayor número de raíces, los cambios en contenido de humedad, etc. La evaluación de dureza o penetrabilidad de las capas se puede hacer con navaja, cuchillo o penetrómetro, para darse cuenta a qué profundidad se producen cambios. En las cajuelas y a las profundidades escogidas se hacen también los muestreos para los análisis físicos y químicos de laboratorio.

La evaluación de las cajuelas debe ser muy objetiva. En muchos casos dentro de un horizonte "A" genético se presentan, capas con diferentes condiciones físicas, lo cual quiere decir, que el solo color del suelo superficial aunque es un indicativo de uniformidad genética, no lo es de uniformidad física. ICRISAT (1997) ha desarrollado metodologías que ayudan a las evaluaciones y Lal (1993 y 1994) discute sobre las propiedades cambiantes por el uso y la labranza de suelos tropicales.

Hecha la evaluación física en el campo, se procede a comparar la forma como se manifiestan las diferentes condiciones físicas en las cajuelas. Si el comportamiento del suelo es uniforme a través del lote, se elegirá el sistema de labranza que solucione la o las limitantes que actualmente posea. Si se presentan diferencias en los limitantes observados éstos se mapean y se manifiesta que el lote no es uniforme y se decide sobre el tipo de labranza que debe hacerse en cada sub-lote.

## 5. Principales problemas de orden físico que restringen la producción agropecuaria en el trópico

Los principales problemas de orden físico asociados con labranza que restringen o causan disminución en los rendimientos de los cultivos en los suelos tropicales son los siguientes:

- Impedimento o impedancia mecánica a la penetración de raíces
- Estrés de agua (déficit)
- Estrés de aireación (exceso de agua)
- Escorrentía y erosión

### 5.1 Impedancia mecánica

El impedimento mecánico a la penetración de raíces se refiere a la incapacidad que presenta una raíz cuando su presión de turgor no es capaz de vencer la resistencia que opone el suelo a su deformación (Taylor, 1980). La máxima presión axial (longitudinal) ejercida por un buen número de cultivos varía para varios investigadores (Stolzy y Barley, 1968; Eavis *et al.*, 1969; Taylor y Ratliff, 1969), entre 9-15 bares (0.9-1.5 MPa). Russell y Goss (1974) demostraron que la aplicación de una presión de 0.2 bares a un sistema de camas de vidrio, redujo la tasa de elongación de las raíces de cebada en un 50% y si se aplicaban 0.5 bares en un 80%. El tamaño de los poros afecta el desarrollo de las raíces. Si el diámetro del poro es mayor al de la cofia, la raíz penetra, si es menor y el suelo no es deformable y la raíz no puede penetrar (Taylor y Gardner, 1960; Aubertin y Kardos, 1965).

El impedimento mecánico debido a la compactación y a la presencia de capas endurecidas (adensadas), es la principal causa de disminución de los rendimientos y de insostenibilidad en suelos tropicales, debido a los efectos negativos que causan en el crecimiento de las raíces. El impedimento mecánico se corrige mediante la utilización adecuada y oportuna de implementos de labranza que produzcan aflojamiento del suelo y disminución de la densidad aparente fundamentalmente subsoladores y cinceles (Castro y Amézquita, 1991; Arking y Taylor, 1981).

Varios implementos y metodologías se han ideado para evaluar el estado de impedancia mecánica del suelo, entre ellos están: los penetrómetros, los aparatos para medir la resistencia tangencial al corte, aparatos para toma de muestras de densidad aparente y aparatos para la realización de pruebas de aplicación de presión bajo presiones confinadas y no confinadas en laboratorio. Cualquier metodología que se use para diagnóstico o predicción debe correlacionarse con el crecimiento actual de las raíces y con los rendimientos de los cultivos que se van a producir para poder disponer de niveles críticos.

## 5.2 Estrés de agua

El estrés de agua de las plantas resulta de la interacción entre el estado de humedad de agua en el suelo, la demanda evaporativa y los factores fisiológicos. Dentro del concepto del sistema suelo-planta-atmósfera-continuum el suelo debe considerarse como un reservorio que suministra agua al sistema (Reichardt, 1985). Por lo tanto, cualquier déficit que ocurra en el reservorio afecta negativamente el comportamiento del sistema. El agua útil o agua aprovechable, aquella que teóricamente se calcula como la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez temporal, se mueve dentro del sistema suelo-planta-atmósfera obedeciendo a gradientes de potencial hídrico. Desde sitios donde el potencial es alto (más húmedo) a sitios donde el potencial es más bajo (más seco). Desde el suelo hacia la atmósfera a través del proceso de transpiración. Desde el suelo donde la humedad relativa es cercana al 100%, hacia la atmósfera donde la humedad relativa al mediodía puede variar entre 50% y 30%, valores que producen potenciales hídricos en el aire entre 8- y 150 MPa y que se convierten en la bomba que succiona el agua del suelo a través de las plantas (Amézquita, 1981).

Para que un suelo cumpla con su función de reservorio de agua es necesario que se cumplan tres condiciones: (a) que buena parte del agua lluvia penetre al suelo, (b) que el suelo tenga buena capacidad de almacenamiento de agua en la zona de crecimiento de raíces y (c) que el suelo posea suficiente capacidad de conducción de agua cuando la demanda evaporativa sea alta. Estas condiciones son afectadas directamente por la labranza (Amézquita, 1981).

La aceptación (aceptancia) de aguas lluvias depende de la presencia de agregados superficiales estables (que no se rompan cuando reciban el impacto de las gotas de agua lluvia) y de la rugosidad superficial del terreno. Ambas características propician el ingreso del agua al suelo mediante el proceso de la infiltración y son afectados negativamente, por la destrucción de la estructura superficial del terreno por exceso de labranza, la cual conduce a sellamiento y encostramiento superficial, fenómenos que impiden o disminuyen drásticamente el ingreso del agua al suelo, haciendo que la escorrentía supere ampliamente a la infiltración, originando suelos secos.

El almacenamiento del agua en el suelo, también depende de la labranza que se dé al suelo en profundidad. Entre más profunda sea la preparación del suelo, mayor es su capacidad de almacenamiento de agua. Un suelo preparado a 10 cm de profundidad con rastra, dispondrá solo de la porosidad disponible en esos 10 cm para almacenar agua. Un suelo preparado a 25 cm tendrá igualmente la porosidad disponible a 25 cm de profundidad para almacenamiento de agua. Por lo tanto, la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo puede ser manejada con la labranza (Reichardt, 1985).

El déficit de agua en un suelo, se manifiesta cuando ésta se convierte en factor limitante para la evapotranspiración. Cuando la demanda atmosférica está exigiendo que la evapotranspiración sea alta. Dos fenómenos se asocian con el déficit de agua en el suelo: (a) cuando su capacidad de almacenamiento se ha visto disminuida por agotamiento y (b) cuando la velocidad de movimiento del agua en el suelo, es mucho más baja que la velocidad de movimiento que exige el sistema evapotranspirativo. Bajo ambas condiciones el agua se convierte en factor limitante, por ello, es necesario que las acciones de labranza corrijan estas situaciones donde quiera que ellas ocurran al aumentar la capacidad de almacenamiento de agua y la conductividad hidráulica no saturada del suelo (Amézquita, 1994).

### **5.3 Déficit de aire**

El déficit de aire en el suelo se manifiesta donde quiera que en un lbte se produzca inundación. También, cuando los valores de aireación a capacidad de campo sean inferiores a 10% en la profundidad de desarrollo de las raíces. Bajo condiciones de baja aireación o de inundación, las raíces de los cultivos de secano no pueden absorber ni agua ni nutrientes, por lo tanto hay una disminución drástica de los rendimientos.

Condiciones de baja aireación, pueden crearse por uso excesivo de la maquinaria agrícola, el cual puede conducir a una disminución gradual de macroporos, cuya presencia es indispensable para el movimiento del aire en el suelo.

El uso apropiado de la maquinaria agrícola en suelos con problemas de drenaje restringido, puede conducir al mejoramiento temporal o permanente de esta condición, si se aplican las técnicas razonables que conduzcan a mejorar la evacuación de aguas sobrantes y a promocionar la aireación.

### **5.4 Escorrentía y erosión**

Grandes problemas de escorrentía y de erosión se producen en el trópico por el uso inadecuado de la maquinaria agrícola en las labores de preparación de suelos.

La mayor cantidad de erosión que actualmente se produce es propiciada por el aflojamiento del suelo al inicio de la temporada lluviosa. Suelos recién preparados, por presentar terrones y agregados prácticamente sueltos, son muy susceptibles a dejarse desmoronar por el impacto de las gotas y a dejarse acarrear por las aguas de escorrentía. Suelos que no son tocados por implementos de labranza presentan alta resistencia a la erosión, aunque propician la escorrentía. Es necesario por lo tanto buscar una condición de equilibrio entre infiltración y escorrentía en suelos susceptibles a erosión, la cual se puede lograr con el uso apropiado de implementos de labranza.

El origen de los llamados sistemas conservacionistas, en los cuales el uso de residuos superficiales y la poca manipulación del suelo son condiciones necesarias, es una respuesta del hombre a la lucha contra la erosión y a la pérdida de agua en forma de escorrentía.

## **6. Condiciones físicas de los suelos de la Altillanura en relación con labranza**

El principal problema a enfrentar en los suelos de la Altillanura de los Llanos (Typic haplustox isohiperthermic, kaolinitic) para su utilización en agricultura y en la producción de pastos, es su susceptibilidad a degradación. Se entiende como degradación a la pérdida de algunas cualidades físicas, químicas y biológicas del suelo por mala intervención humana, los cuales se convierten en factores negativos de producción y en el futuro afectarán la sostenibilidad agrícola.

Las principales propiedades físicas de los suelos que son afectadas por sistemas inadecuados de labranza (intervención humana) son aquellas que tienen que ver con el comportamiento volumétrico del suelo, tales como porosidad total y distribución de tamaño de poros, propiedades íntimamente ligadas a la estructura del suelo. Por lo tanto, cualquier cambio en la distribución de tamaño de agregados, en la estabilidad estructural como consecuencia de la labranza, afecta la infiltración, la capacidad de almacenaje de agua por el suelo, la penetración y crecimiento de las raíces, por afectar la distribución de tamaño de los poros. El sellamiento superficial producto del desmoronamiento de los agregados y del desprendimiento y salpicadura de partículas (Le Bissonnais, 1996), es otro gran problema en los Llanos que está asociado con labranza.

Los principales problemas de orden físico que el autor ha observado y evaluado en el campo en suelos de los Llanos, son los siguientes:

- Sellamiento superficial
- Encostramiento superficial
- Alta densidad aparente
- Adensamiento y endurecimiento del suelo en la época seca
- Compactación
- Baja velocidad de infiltración
- Baja estabilidad estructural
- Pobre distribución de tamaño de poroso
- Pobre continuidad en el espacio poroso
- Poco espesor del horizonte "A"
- Alta susceptibilidad a erosión (suelos recién preparados)
- Alta producción de escorrentía

Ante esta situación y para el desarrollo de sistemas de labranza que tiendan a la

sostenibilidad requiere: (a) entender los procesos de degradación que actualmente se presentan en función de tiempo de uso, tipo de suelo y sistemas de manejo; (b) determinar las propiedades (físicas, químicas y biológicas) del suelo que son más afectadas por las prácticas de manejo y determinar sus valores críticos para diferentes cultivos; (c) desarrollar metodologías de campo y laboratorio que permitan evaluar en una forma realista las condiciones que limitan el buen desarrollo de los cultivos; y (d) desarrollar prácticas de manejo de suelos que conduzcan a su sostenibilidad para anular los procesos degradativos.

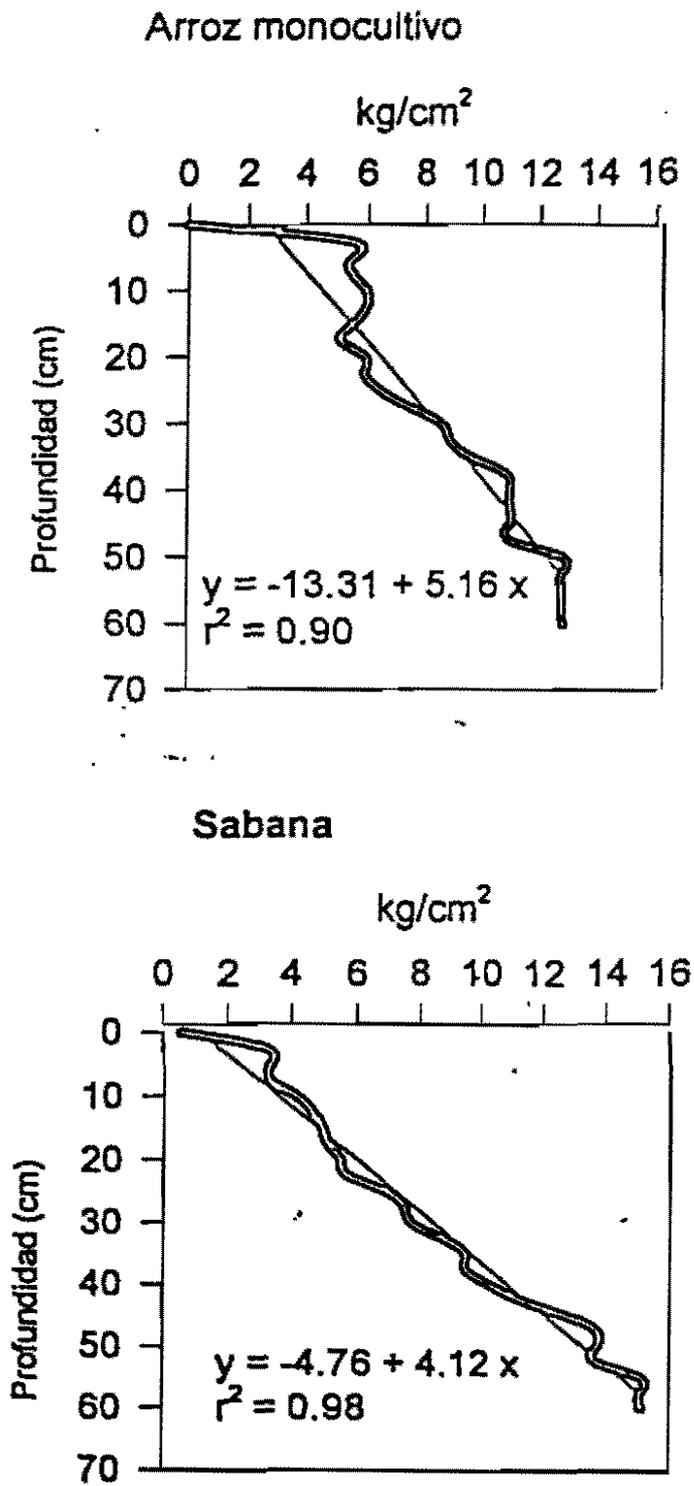
En la Figura 1 se presentan los valores de resistencia a la penetración en Oxisoles de Carimagua, bajo condiciones de sabana nativa y suelo cultivado con arroz. Las evaluaciones se hicieron en tiempo de lluvias (Junio) con un penetrógrafo japonés. Se observa que bajo la condición de sabana nativa, los valores de penetrabilidad en los primeros 5 cm de profundidad ya alcanzan niveles de alrededor de  $3.0 \text{ kg.cm}^{-2}$  que para las condiciones de suelo húmedo son valores altos (en la estación seca el penetrómetro no penetra). Los valores incrementan la profundidad indicando que en el perfil de muestreo, las raíces pueden sufrir restricciones en su crecimiento. De hecho, bajo condiciones de campo el mayor porcentaje de raíces se concentra en los primeros 0-2.5 cm ó 0-5.0 cm.

Bajo condiciones de monocultivo de arroz, en los primeros 0-5 cm ya se llega a valores de  $6.0 \text{ kg.cm}^{-2}$  que prácticamente duplican a los de sabana nativa para la misma profundidad. Esto claramente demuestra que el sistema de labranza (rastra) que se ha dado al suelo, está incrementando los valores de penetrabilidad. Hacia abajo del perfil, entre 5 y 25 cm de profundidad, los valores permanecen más o menos constantes indicando que se está formando una capa compactada.

En la Figura 2 se observa la influencia negativa que el aumento en el número de pases de rastra (Hacienda Matazol - Typic haplustox isohiperthermic kaolinitic) tiene en los rendimientos de arroz. Prácticamente al pasar de dos a cuatro pases ya se ha afectado la estructura y los rendimientos son menores. Si se reducen los rendimientos en arroz, que es un cultivo muy rústico en los requerimientos de condición física de suelos, es de esperar que otras especies de cereales se vean más afectadas.

El uso creciente de pases de rastra, el sistema más común de preparación de suelos en los Llanos, disminuye la densidad aparente en los primeros 5 a 10 cm de profundidad, pero la aumenta a partir de estas profundidades, lo cual es indicativo de que el paso de las rastras a la misma profundidad está causando compactación (pie de rastra). El valor de este parámetro, bajo sabana nativa, es mayor ( $1.41 \text{ Mg.t}^{-1}$ ) entre 0 y 5 cm que entre 5 y 10 cm ( $1.33 \text{ Mg.t}^{-1}$ ) lo cual es indicativo de la presencia de una costra densa en la superficie (Tabla 1).

Fig. 1. Resistencia a la penetración bajo condición de arroz monocultivo en comparación con sabana  
Ensayo Culticore-Carimagua / 97



**Fig. 2. Efecto del numero de pases de rastra en la produccion de arroz**

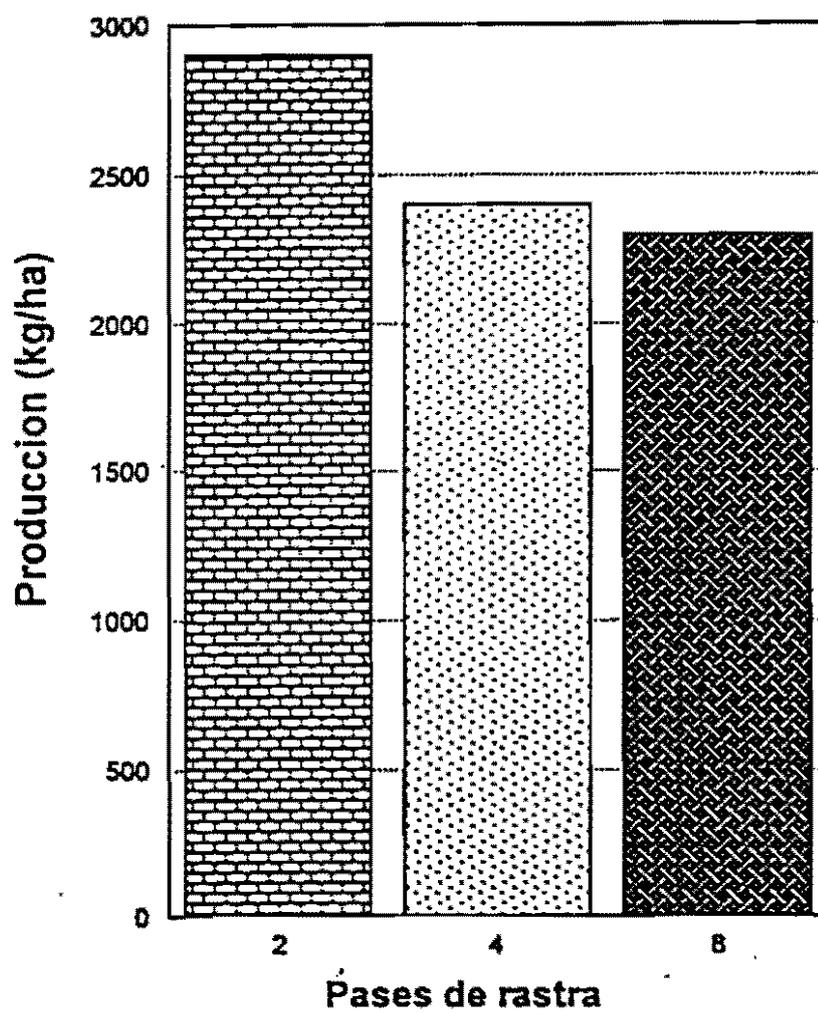


Tabla 1. Influencia del número de pases de rastra en la densidad aparente a diferentes niveles de profundidad

Profundidad (cm)	Sabana nativa 0	Número de pases de rastra		
		6	12	24
0-5	1.41	1.36	1.28	1.37
5-10	1.33	1.40	1.37	1.33
10-20	1.23	1.42	1.38	1.46
20-30	1.41	1.45	1.36	1.45
30-50	1.46	1.56	1.46	1.48
50-70	1.38	1.56	1.43	1.45

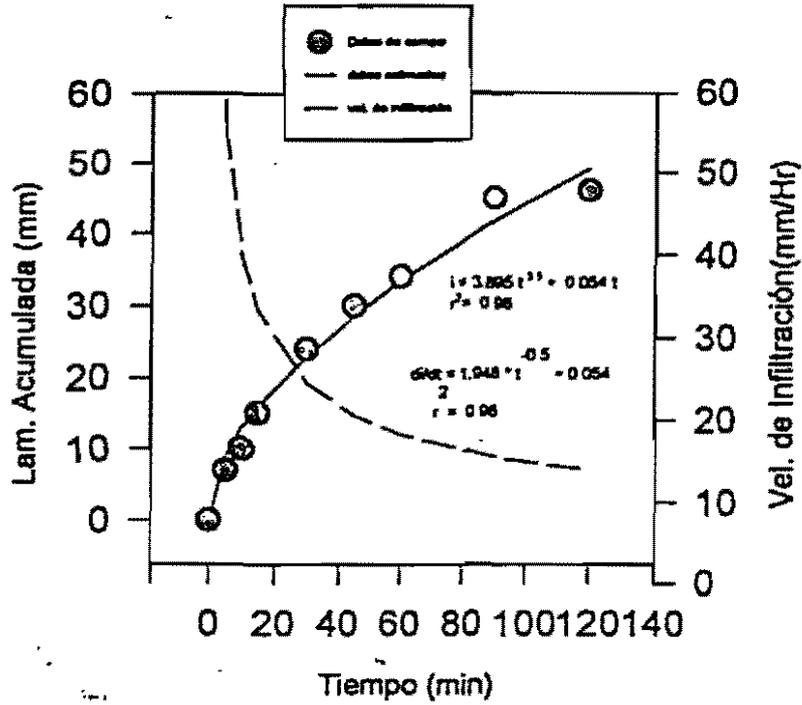
Los valores de infiltración acumulada (Amézquita y Londoño, 1997) y de velocidad de infiltración (Figuras 3 y 4) muestran que ella es baja. Por lo tanto la capacidad de aceptación de agua lluvia es baja y los suelos pueden comportarse como suelos secos dentro de un clima húmedo. Bajo esta condición es más importante para la suplencia de agua a los cultivos la frecuencia de caída de las lluvias, que la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Esta puede ser una de las razones por las cuales bajo sabana nativa se encuentran la mayoría de las raíces en los primeros 2 cm de suelo, porque a esa profundidad cada lluvia es capaz de mojar el suelo pero la baja infiltración impide que el agua entre más profundamente al suelo.

La distribución de tamaño de agregados guarda relación con la intensidad de uso de la labranza. En la Figura 5 se muestra el comportamiento de la distribución de tamaño de agregados para diferentes intensidades de labranza (Amézquita *et al.*, 1997). Lo más notorio es que el D50 bajo sabana nativa (1.9 mm) ha disminuido a 0.40 mm bajo monocultivo de arroz (uso intensivo de maquinaria). El D50 es el diámetro límite por debajo o por encima del cual se presenta el 50% de los agregados.

El tamaño de los agregados influye grandemente en la respuesta de los cultivos a las condiciones que ese tamaño de agregados produce en las condiciones del suelo. En la Tabla 2 se observa que la *Brachiaria* respondió significativamente en producción de materia seca, al tamaño de los agregados en que se sembró. El mayor peso seco se obtuvo cuando se sembró en agregados mayores de 4 mm y el menor cuando ellos fueron inferiores a 2 mm. Asimismo, el comportamiento del nitrógeno en el suelo y en la planta se vio afectado por el tamaño de los agregados (Meléndez, 1998).

Fig. 3. Infiltración acumulada y velocidad de infiltración en ensayos de Matazul

Dos Pases de Rastra - Profundidad 0 cm - Jun / 95



Dos Pases de Rastra - Profundidad 5 cm - Jun / 95

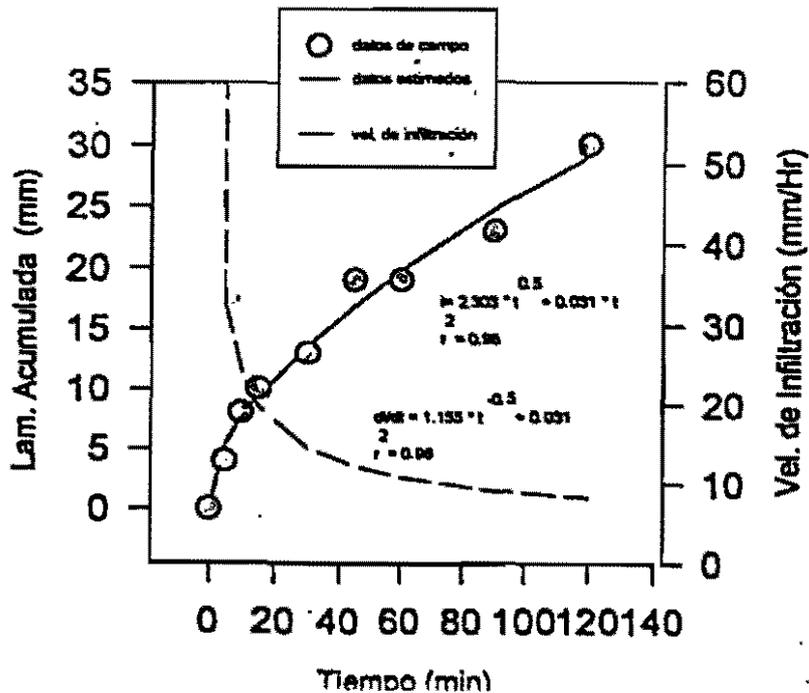
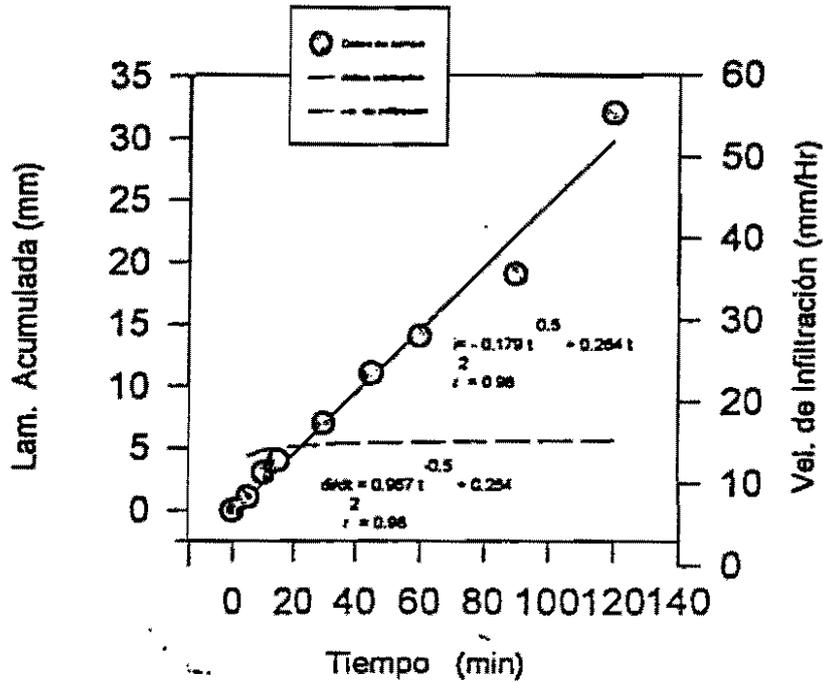


Fig. 4 Infiltración acumulada y velocidad de infiltración en ensayo de labranza en Matazul.

Cuatro Pases de Rastra - Profundidad 0 cm - Jun / 95



Cuatro Pases de Rastra - Profundidad 5 cm - Jun / 95

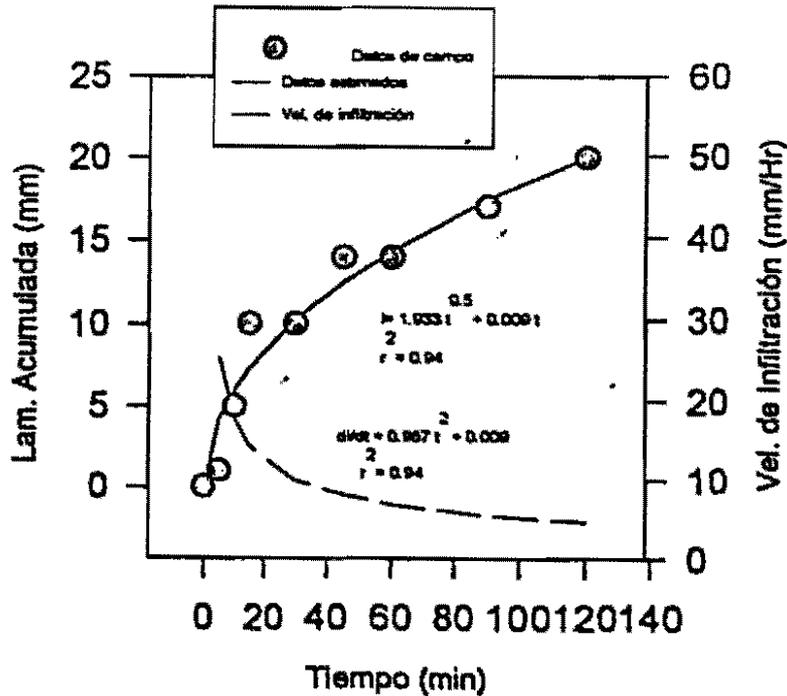


Fig. 5. Comportamiento del D-50 en agregados superficiales de varios tratamientos de uso y manejo de suelos.

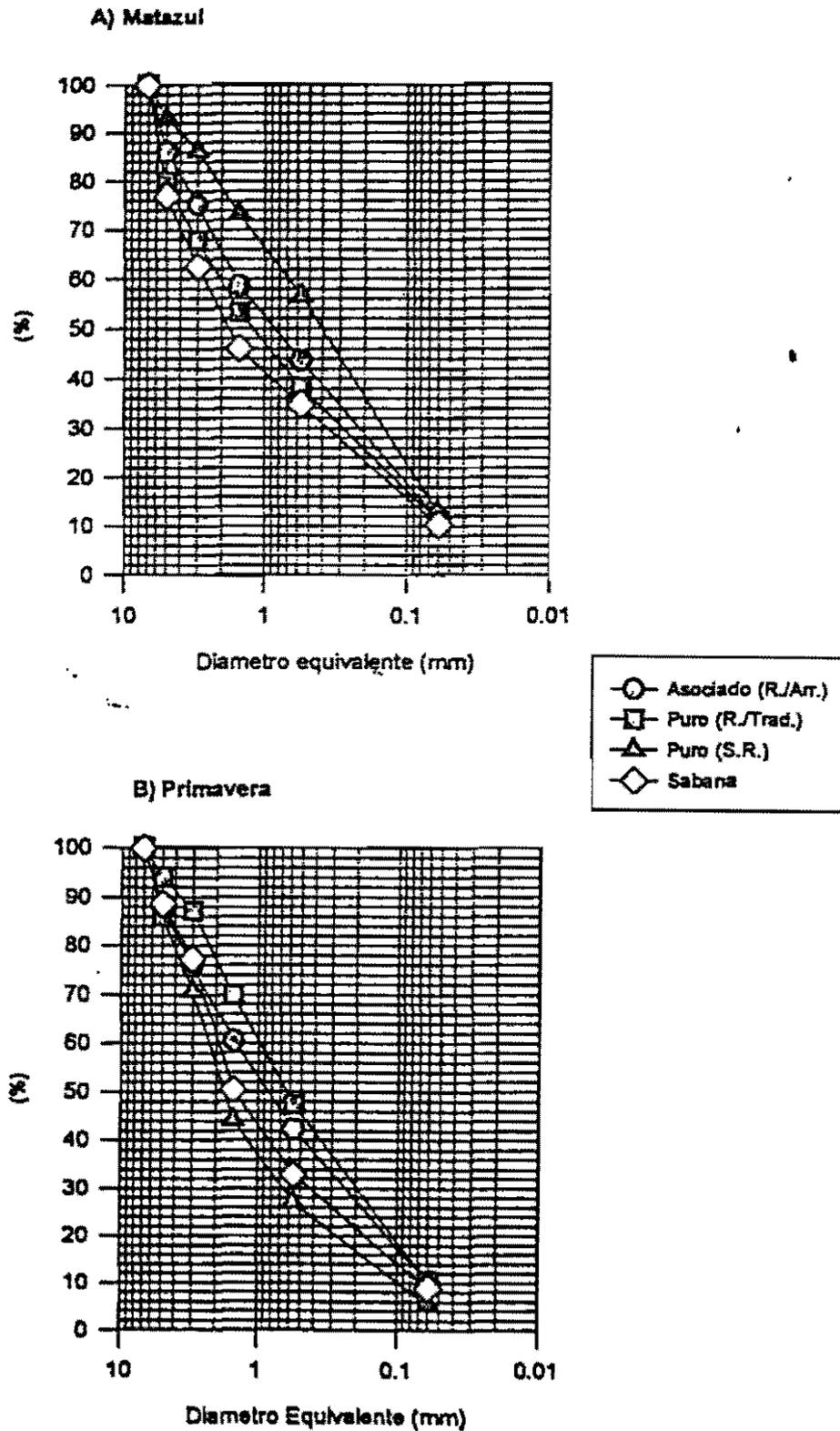


Tabla 2. Producción de biomasa y absorción por *Brachiaria* en diferentes tamaños de agregados

Tamaño de agregado (mm)	Peso seco (g)	N absorción (g/pot)	N en el suelo (g/g)
>4	21.0 a	0.39 a	37.5 a
4-2	12.7 b	0.31 b	27.0 b
<2	5.0 c	0.13 c	17.6 c
C.V.	25.3	14.0	14.7

### 7. Efecto del tiempo de uso en algunas propiedades físicas de suelos del Llano

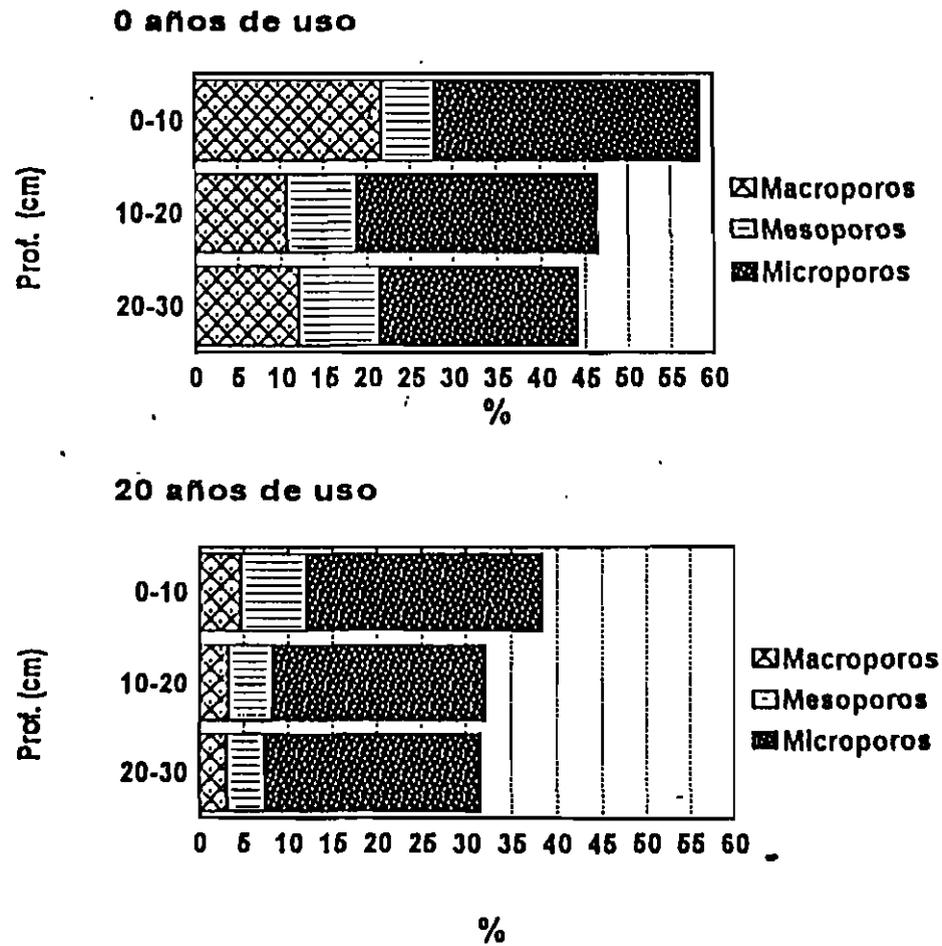
El uso permanente e intensivo de implementos agrícolas en los suelos causa deterioros en su estructura (Mulla *et al.*, 1992; Quirk y Murray, 1991) y ésto puede afectar negativamente los rendimientos.

A manera de ejemplo cabe citar, que los productores de arroz de secano en Casanare abandonan sus lotes después de cinco a ocho años de uso continuo, porque después de este tiempo los rendimientos, a causa de procesos degradativos, disminuyen notablemente (Preciado, 1997). En estos suelos la labranza se hace casi que exclusivamente con rastras de diferentes tamaños.

La Figura 6 muestra los datos obtenidos por Preciado, 1997). En ellos se observan los cambios que se han producido en la porosidad total y en la distribución del tamaño de los poros por efecto del tiempo de uso. Cuando el suelo no se había cultivado la porosidad total en los primeros 10 cm era de 60%, después de 20 años de uso se había reducido a 38%, una disminución del 22% que manifiesta que el suelo se ha adensado. Entre 10 y 20 cm los valores pasaron de 47% a 33% y entre 20 y 30 cm de 43% a 32% observándose que hasta la profundidad de muestreo el suelo había reducido fuertemente su volumen.

Analizando la distribución de tamaño de poros, se observa que los macroporos pasaron de 20% a aproximadamente 3% en la primera profundidad, de 10% a 2% en la segunda y de 10% a 1.5% en la tercera. Menores cambios se observaron en meso y microporos. El hecho de que el volumen de macroporos haya disminuido es un indicativo de degradación de suelos por efecto del uso y del manejo y puede ser la causa del abandono de los lotes, porque ya el agua no puede penetrar y los suelos pierden su capacidad de aireación y de permitir el desarrollo de las raíces.

**Fig. 6. Distribución de tamaño de poros y porosidad total en función de tiempo de uso en suelos arroceros de Casanare.**



La disminución en el volumen de macroporos, por efecto de un uso no apropiado a las condiciones del suelo, disminuye todos los flujos que tienen que ver con agua y aire en el suelo, afectando negativamente la conductividad hidráulica, la infiltración y la permeabilidad del aire. También se afectan otras propiedades como resistencia tangencial al corte y penetrabilidad, las cuales aumentan sus valores.

### **8. *Hacia la creación de una capa arable para obtener suelos sostenibles en el Llano***

La actual condición física de los suelos del Llano, especialmente la de Attilanura, muestra que las labores de preparación de suelos deberá enfocarse hacia la creación de una "capa arable". Se entiende en el contexto de este artículo como *capa arable* a aquella capa superficial de suelo planificada y obtenida por el hombre con el fin de obtener un suelo que no presente limitantes físicas, químicas ni biológicas para el desarrollo normal de las raíces de los cultivos y que sea estable a través del tiempo. La profundidad de ésta puede variar entre 0-15 cm para pastos, 0-25 cm para cereales y leguminosas y 0-40 cm para cultivos permanentes.

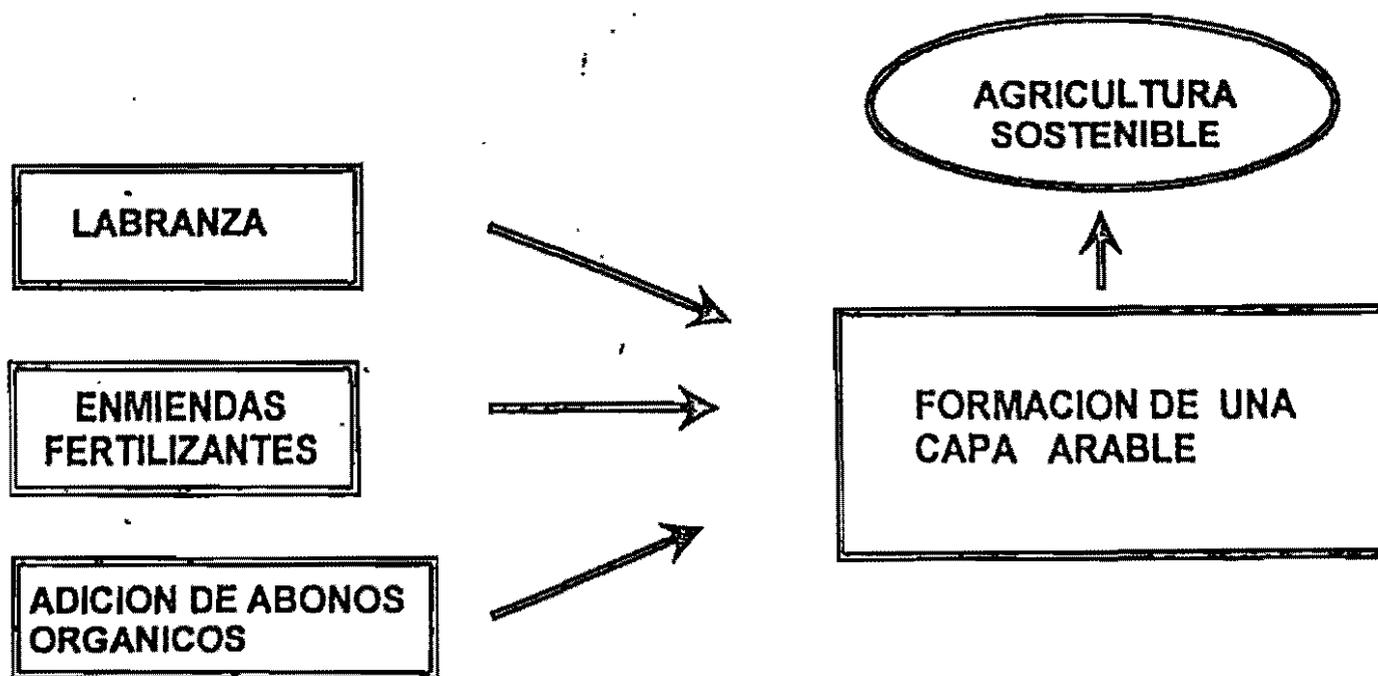
Si en el Llano no se maneja el concepto de desarrollo de una capa arable los suelos se seguirán degradando y se harán cada vez más improductivos. La Figura 7 presentan los conceptos involucrados en el desarrollo o creación de esa capa arable. Mediante la combinación de una labranza que tienda a corregir los limitantes físicos del suelo, de un buen uso y manejo de enmiendas y de fertilizantes que corrijan la condición química hasta la profundidad deseada y del uso de prácticas de manejo de abonos orgánicos, abonos verdes y residuos vegetales que propicien la formación de bioestructura es posible formar una capa arable y sobre ella una agricultura sostenible.

En un suelo que presenta diferentes limitantes, que han sido corregidos, ya se pueden hacer labranzas de tipo conservacionista, para mantener la condición de alta productividad alcanzada. Si en los suelos de los Llanos no se hacen las correcciones que requieren, cualquier sistema de labranza conservacionista que se use, será un fracaso porque ellos actualmente no poseen las condiciones requeridas para propiciar un buen crecimiento de las raíces de los cultivos que se establezcan. Si se presentan fracasos en la respuesta a la utilización de sistemas de labranza conservacionista, se corre el riesgo de que una práctica que sobre suelos ya corregidos puede conducirlos a sostenibilidad, sea rechazada por los productores por ineficiente.

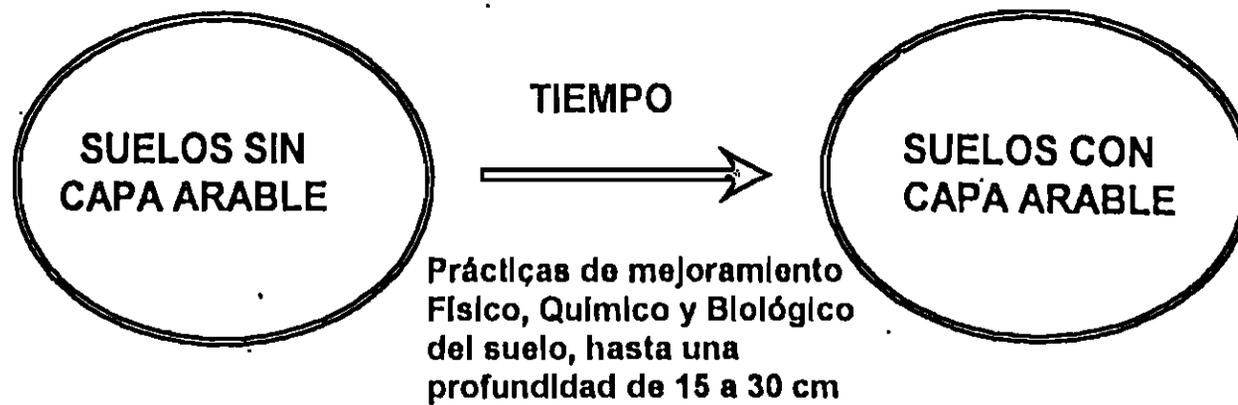
El concepto de transformación de suelos sin capa arable a suelos con capa arable, se esquematiza en la Figura 8. En ella se muestra cómo a través del tiempo, es posible ir haciendo correcciones al suelo mediante prácticas de mejoramiento

**Fig. 7. EL CONCEPTO DE PERFIL CULTURAL:**

**Desarrollo de una capa Arable sin limitaciones físicas, químicas ni biológicas**



**Los sistemas agro y silvopastoriles tienden a la práctica de estos conceptos**



**Fig. 8. Construcción de una Capa Arable.**

físico, químico y biológico para conseguir un suelo superficial (sin limitaciones). Dentro de los conceptos de mejoramiento del suelo deben considerarse todas aquellas prácticas que conduzcan a aumentar el contenido de materia lignificada (formadora de estructura) dentro y sobre la superficie del suelo, aprovechando que ya se han seleccionado materiales genéticos capaces de crecer en las condiciones adversas de acidez que presentan los suelos del Llano. Como sistemas de producción útiles para la obtención de capas arables, cabe mencionar el uso de abonos verdes, para llevar la fertilidad del suelo; el uso de programas de rotación de cultivos y el uso obligatorio de sistemas agropastoriles para utilizar los beneficios que los pastos brindan a los suelos como formadores o propiciadores de bioestructura.

Para el caso de los Llanos se definirán a continuación los objetivos que deben perseguirse desde los puntos físico, químico y biológico para desarrollar suelos sostenibles.

**Mejoramiento físico:** se debe mejorar la condición de alta densidad aparente y de alta resistencia a la penetración de los suelos mediante el uso de implementos de labranza vertical (cinceles y subsolado superficial hasta 35 o 40 cm) que permitan el rompimiento del suelo en profundidad. Los cinceles ideales para este propósito son los rígidos que son capaces de romper suelos que ofrecen alta resistencia al fraccionamiento. Quien usa cinceles debe considerar que suelos muy adensados o compactados se deben empezar a trabajar primero superficialmente y luego sí a mayor profundidad hasta lograr la profundidad requerida. Si esto no se hace se rompe el tractor o el implemento.

Una vez que se ha aflojado el suelo, es necesario "fijar" o "mantener" ese aflojamiento mediante la siembra de pastos o de cultivos de buen sistema radical o mediante la adición de tamos fragmentados, que mantengan la condición lograda con la labranza. Labranzas verticales "fijadas" por un período de tres a cinco años arrojarán un suelo diferente, sobre el cual se pueden realizar sistemas de labranza conservacionista.

**Mejoramiento químico:** el mejoramiento químico debe incluir el uso de enmiendas hasta la profundidad a la cual se laboree el suelo y no sólo hasta 10 cm como actualmente se hace, en la cantidad que lo determine el análisis del suelo y con los correctivos que sean necesarios.

Se debe también adicionar al suelo los nutrientes necesarios para obtener buenos rendimientos, ya que esto garantiza la formación de una buena cantidad de biomasa externa e interna (raíces) que a la vez actuará como correctivo del suelo.

**Mejoramiento biológico:** para el mejoramiento biológico del suelo se sugiere:  
(a) elevar el contenido de materia orgánica, mediante la promoción de raíces y

la incorporación de residuos; (b) incrementan la estabilidad de los agregados mediante la incorporación de materiales orgánicos lignificados y fragmentados (2-3 cm); (c) propiciar el incremento del reciclaje superficial de nutrientes a través del uso del mulch; y (d) propiciar el uso de plantas de raíces profundas para mejorar la condición estructural del suelo en profundidad. Rao *et al.* (1996) ha estudiado la distribución de raíces de pasto en suelos de la Altillanura.

Actualmente se llevan a cabo ensayos de campo encaminados a la formación de "capas arables" o de "perfil cultural". La Tabla 3 muestra algunos de los resultados que hasta ahora se han obtenido. En ella se muestran los cambios de porosidad total obtenidos cuando se pretende conseguir una capa arable por medios biológicos (leguminosa, pasto y pasto-leguminosa) y físicos (cincel 1, cincel 2, cincel 3 - los números representan la cantidad de pases paralelos que se dan).

Tabla 3. Cambios en la porosidad total (%) como respuesta a los diferentes tratamientos y usos del suelo

Profundidad (cm)	Testigo Sabana	Tratamiento Biológico			Tratamiento Químico y Físico		
		Legum.	Pasto	Pasto + Leg	Q1	Q2	Q3
0-10	34.0	37.8	44.8	41.7	44.4	46.3	48.6
10-20	34.0	37.0	39.0	42.1	37.1	42.5	40.5
20-30	29.6	35.0	32.3	30.8	33.5	34.2	35.0
30-40	28.8	34.6	29.5	28.0	31.4	36.8	31.8

Las siguientes observaciones merecen destacarse: (a) bajo sabana nativa la porosidad total es baja, no apta para producción agrícola; (b) el uso de agentes biológicos ha mejorado la condición de porosidad total hasta 30 cm de profundidad, pero especialmente lo ha hecho la combinación pasto-leguminosa, y (c) el mejoramiento físico con cincel ha mejorado la porosidad total hasta llevarla a valores muy buenos para producción agrícola. Ese mejoramiento ha sido función del número de pases y es mejor cuando se hacen tres pases.

El uso de los conceptos presentados satisfacen las recomendaciones de Spoor (1975) y de Soane y Pidgeon (1974) en el sentido de que la labranza no debería definirse en términos, de los implementos usados, sino más bien por los cambios en las condiciones físicas del suelo, que ellos producen. Glinski y Lipiec (1990) han hecho una buena recopilación de la influencia de las propiedades físicas de los cultivos.

**Agradecimiento**

El autor expresa sus agradecimientos al CIAT y a COLCIENCIAS sin cuyo apoyo no hubieran podido realizarse las investigaciones que aquí se comentan y no hubiera podido darse claridad a los nuevos conceptos que de ellas han emanado. Asimismo agradece la colaboración brindada por la Universidad del Llano y por CORPOICA.

## Biografía

- Allmaras, R.R., P.W. Unger y D.E. Wilkins (1985). Conservation tillage systems and soil productivity. *In:* R.F. Follet and B.A. Stewart (eds.). Soil Erosion and Crop Productivity. *Am.Soc.Agron.* Madison WI. pp.357-412.
- Amézquita, E. (1981). A study of the water regime of a soil during approach to field capacity and permanent wilting point. Ph.D. Theses. University of Reading, U.K. 244 p.
- Amézquita, E. (1991). Procesos dinámicos del suelo y nutrición vegetal. XXI Congreso Anual y Primer Simposio sobre Fisiología de la Nutrición Mineral. COMALFI, Febrero 20-22. Manizales, Colombia.
- Amézquita, E. (1994). Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. *In:* F. Silva (ed.). Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Colombia. pp.137-154.
- Amézquita, E. y H. Londoño (1997). La infiltración del agua en algunos suelos de los Llanos Orientales y sus implicaciones en su uso y manejo. *Revista Suelos Ecuatoriales* Vol.27:163-168.
- Amézquita, E., J.I. Sanz, R.J. Thomas, R.R. Vera, P. Hoyos, D.L. Molina y L.F. Chávez (1997). Características estructurales de los suelos de los Llanos Orientales de Colombia sometidos a varios sistemas de manejo. *Revista Suelos Ecuatoriales* Vol.27:151-156.
- Arkin, G.F. y H.M. Taylor (1981). Modifying the root environment to reduce crop stress. ASAE Monograph No.4.
- Aubertin, G.M. y L.T. Kardos (1965). Root growth through porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size rigidity. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.* 29:290-293.
- Aubertin, G.M. y L.T. Kardos (1965). Root growth through porous media under controlled conditions. II. Effect of aeration levels and rigidity. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.* 29:363-365.
- Castro, H. y E. Amézquita (1991). Sistemas de labranza y producción de cultivos en suelos con limitantes físicos. *Revista Suelos Ecuatoriales* Vol.21(1):21-28.

- CTIC (Conservation Technology Information Center) (1993). Conservation tillage definitions and types of systems. *Conservation impact* 11(5):6.
- Eavis, B.W., L.F. Ratliff y H.M. Taylor (1969). Use of a dead-load technique to determine axial root growth pressure. *Agron.J.* 61:640-643.
- Figueroa, S.B. y F.F. Morales (1994). Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. SARH y Escuela de Postgrado, Chapingo, México. 273 p.
- Gill, W. y G.E. Vanden Berg (1967). Soil dynamics in tillage and traction. Agriculture Handbook No.316. Agricultural Research Services, United States Department of Agriculture. 511 p.
- Glinski, J. y J. Lipiec (1990). Soil physical conditions and plant roots. CRC Press Inc. 249 p.
- Greenland, D.J. (1977). Structural organization of soil and crop production. In: D.J. Greenland and R. Lal (eds.). Soil Physical Conditions and Crop Production in the Tropics. Chichester, England. pp.45-57.
- Hillel, D., D. Ariel, S. Orlowski, E. Stibbe, D. Wolf y A. Yavnai (1969). Soil-crop-tillage interactions in dryland and irrigated farming. Research Report submitted to the U.S. Department of Agricultural by the Hebrew University of Jerusalem, Jerūsalem, Israel.
- ICRISAT (1997). Measuring soil processes in agricultural research. Ed. by K.B. Laryea, P. Pathak y J.C. Katyal. Technical Manual No.3, ICRISAT. 99 p.
- Lal, R. (1993). Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. *Soil & Tillage Research*, 27 (1993) 1-8.
- Lal, R. (1994). Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. USDA-The Ohio State University. SMSS Technical Monograph No.21.
- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47:425-437.
- Mannering, J.V. y C.R. Fenster (1983). What is conservation tillage? *J.Soil Water Cons.* 38:141-143.

- Meléndez, A. (1998). Efecto de tres tamaños de agregados de suelos provenientes de los Llanos Orientales en el ambiente físico y en la respuesta a la fertilización nitrogenada del pasto *Brachiaria decumbens*. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.
- Mulla, D.J., L.M. Huyck y J.P. Reganold (1992). Temporal variation in aggregate stability on conventional and alternative farms. *Soil Science Society of America Journal* 56:1620-1624.
- Orozco, O.L. (1991). Caracterización física y dinámica del agua bajo tres sistemas de labranza en un Andisol de la antigua serie Tibaitatá. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Tesis de Maestría. 122 p.
- Preciado, L.G. (1997). Influencia del tiempo de uso del suelo en las propiedades físicas, en la productividad y sostenibilidad del cultivo de arroz en Casanare. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira.
- Quirk, J.P. y R.S. Murray (1991). Towards a model for soil structural behaviour. *Australian Journal of Soil Research* 29:829-867.
- Rao, I.M., V. Borrero, J. Ricaurte, R. García y M.A. Ayarza (1996). Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils. II. Differences in shoot and root growth responses to varying phosphorus supply and soil type. *Journal of Plant Nutrition* 19(2):323-352.
- Reichardt, K. (1985). Procesos de transferencia no sistema solo-planta-atmósfera. Publicação Especial do Centro de Energia Nuclear na Agricultura USP-CNEN e Fundação Cargill. 3a. edição. Brasil. 285 p.
- Russell, R.S. y M.J. Goss (1974). Physical aspects of soil fertility-the response of roots to mechanical impedance. *Neth.J.Agric.Sci.* 22:305-318.
- Soane, B.D. y J.D. Pidgeon (1974). Tillage requirement in relation to soil physical properties. *Soil Science* 119 (5):376-384.
- Spoor, G. (1975). Fundamental aspects of cultivation. In: Soil physical conditions and crop production. Min.Agricultural, Food Fish., H.M.S.O. London. *Technical Bulletin* 29: 128-145
- SSSA (Soil Science Society of America) (1987). Glossary of soil science terms. Madison, WI., USA: Soil Science Society of America. 44 p.

Stolzy, L.H. y K.P. Barley (1968). Mechanical resistance encountered by roots entering compact soils. *Soil Sci.* 105: 297-301.

Taylor, H.M. (1980). Mechanical impedance to root growth. In: Soil Related Constraints to Food Production in the Tropics. IRRI, Los Baños, Laguna, Philippines. pp.389-404.

Taylor, H.M y H.R. Gardner (1960). Use of wax substrates in root penetration studies. *Soil Sci.Soc.Am.Proc.* 24:79-81.

Taylor, H.M. y L.F. Ratliff (1969). Root growth pressures of cotton, peas and peanuts. *Agron.J.* 61:398-402.