



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

**EFFECTO DE TRES SISTEMAS DE LABRANZA EN  
LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA, DENSIDAD  
APARENTE Y POROSIDAD DE UN SUELO  
FRANCO-ARCILLOSO**

Por:

**José Juan Aguilar Zavala**

**T E S I S**

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Marzo de 2014



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"

DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

EFFECTO DE TRES SISTEMAS DE LABRANZA EN LA  
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA, DENSIDAD APARENTE Y  
POROSIDAD DE UN SUELO FRANCO-ARCILLOSO

Por:  
José Juan Aguilar Zavala

TESIS

Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial para  
obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

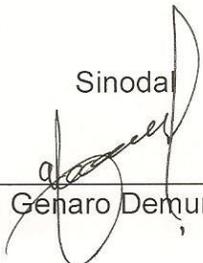
Aprobado por el comité de Tesis

Asesor principal:



Dr. Martin Cadena Zapata

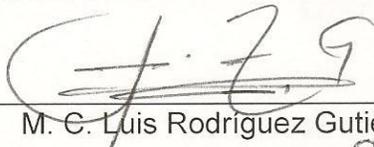
Sinodal

  
M. C. Genaro Demuner Molina

Sinodal

  
Ing. Jesús Gutiérrez Mariscal  
Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"

Coordinador de la División de Ingeniería

  
M. C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Coordinación de  
Buenavista, Saltillo, Coahuila, Marzo de 2014.

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** porque me ha guiado a lo largo de mi carrera brindándome una vida llena de aprendizajes y experiencias.

A mi Alma Mater la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por darme la oportunidad de estudiar una carrera en sus instalaciones y formarme profesionalmente.

A mi comité de asesores: **Dr. Martín Cadena Zapata, M.C. Genaro Demuner Molina e Ing. Jesús Gutiérrez Mariscal** por la oportunidad y el apoyo en la realización de mi tesis.

A todo el **personal académico del departamento de maquinaria agrícola** por los conocimientos transmitidos a lo largo de mi estancia en la universidad.

A mis compañeros y amigos de la generación CXVI, **Fermín, Jairo, Miguel, Cesar, Toño, Tomás y Cardozo** por su apoyo, confianza y sobre todo amistad durante estos años.

A mis familiares (**familia Aguilar Bravo y familia Zavala Zamarripa**), quienes todo el tiempo me apoyaron indicándome que iba por buen camino y siguiera así.

A todos quienes un día y de alguna forma intervinieron apoyándome, hoy gracias a todos he logrado una meta más en mi vida.

## DEDICATORIA

### **A mis padres:**

*Alfredo Aguilar Bravo y Engracia Zavala Zamarrípa*

Por su amor y cariño, por darme la vida y su apoyo en todo momento, guiarme por un buen camino inculcándome buenos valores, mi ejemplo de vida quienes nunca se rinden por sacar a la familia adelante, porque mis logros siempre son pensando en ustedes y para ustedes.

### **A mi hermana:**

*Rosa María Aguilar Zavala*

Por su apoyo incondicional en todo momento, quien me mostro todo el tiempo que nunca hay que rendirse que por más difícil que se ponga la situación vamos a salir adelante, mi ejemplo de desarrollo profesional todo este tiempo.

### **A mis hermanas:**

*María Guadalupe, María Concepción y María de los Ángeles*

Por estar siempre conmigo apoyándome, por ser parte importante de mi vida llenándola de alegrías y amor.

### **A mis abuelos:**

*Adolfo Aguilar y María de la Luz Bravo*

Aunque ya no se encuentre físicamente su recuerdo siempre vivirá en mí, por su cariño.

### **A mis abuelos:**

*Ángel Zavala y Estanislada Zamarrípa*

Por sus bendiciones, palabras de apoyo y consejos brindados, por su amor y cariño.

A mis niños *Diego Alexander* por ser una de mis mayores alegrías y *Abel*

*Emanuel* por la alegría que ha traído a la familia con su llegada.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA .....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 La labranza .....	1
1.2 El suelo y su textura .....	3
1.3 Conductividad hidráulica.....	4
1.4 Densidad Aparente .....	5
II. OBJETIVO .....	7
III. HIPÓTESIS.....	7
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
4.1 La conductividad hidráulica del suelo .....	8
4.2 Métodos para determinar conductividad hidráulica.....	8
4.2.1 Determinación de la conductividad hidráulica en laboratorio .....	10
4.2.2 Métodos de campo para determinar la conductividad hidráulica.....	14
4.3 Interpretación de la conductividad hidráulica saturada .....	22
4.4 Prácticas de manejo de suelo que afectan la conductividad hidráulica ....	22
4.5 Densidad Aparente .....	27
4.6 Métodos para determinación de la densidad aparente .....	28
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	32
5.1 Localización geográfica .....	32
5.2 Geología .....	33
5.3 Distribución de parcelas.....	33
5.4 Conductividad Hidráulica por el método del permeámetro de Guelph .....	34
5.4.1 Equipo utilizado.....	34
5.4.2 Procedimiento .....	37
5.5 Densidad aparente por el método del extractor de núcleos.....	45
5.6 Porosidad.....	47

VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
6.1	Conductividad Hidráulica .....	48
6.2	Densidad Aparente .....	53
6.3	Porosidad.....	56
VII.	CONCLUSIONES .....	60
VIII.	LITERATURA CITADA.....	61
IX.	ANEXOS .....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de un permeámetro de cabeza constante	10
Figura 2. Permeámetro de carga variable (Hartmann, 2000)	12
Figura 3. Método del pozo	14
Figura 4. Perfil del piezómetro	16
Figura 5. Determinación de C. función para una cavidad de 10.5 cm	17
Figura 6. Infiltrómetro de doble anillo (Hartmann, 2000)	18
Figura 7. Infiltrómetro de disco e Infiltrómetro de tensión (Elrick y Reynolds, 1989)	21
Figura 8. Pozo invertido (barreno invertido) (Hartmann, 2000; Bouwer, 1978)	21
Figura 9. Ubicación geográfica del sitio experimental	32
Figura 10. Distribución del terreno experimental	33
Figura 11. Permeámetro Guelph 2800K1	34
Figura 12. Instrumentos para Perforar	35
Figura 13. Cuerpo del Permeámetro	35
Figura 14. Elementos del Trípode	36
Figura 15. Recipiente para llenado	37
Figura 16. Perforación con el cilindro no. 1	38
Figura 17. Cilindro no. 2 para un fondo parejo	38
Figura 18. Cepillado para remover la capa compactada	39
Figura 19. Trípode armado	39
Figura 20. Permeámetro armado y ensamblado	40
Figura 21. Llenado del Permeámetro	41
Figura 22. Verificación del permeámetro	42
Figura 23. Formato para el registro de datos	44
Figura 24. Conductividad hidráulica obtenida en cada parcela	49
Figura 25. Distribución normal de los datos para su análisis	50
Figura 26. Comparación de medias respecto a la conductividad hidráulica en cada sistema de labranza	52

Figura 27. Comparación de medias respecto a la Da en cada sistema de labranza .....	54
Figura 28. Comparación de medias en las diferentes profundidades .....	56
Figura 29. Comparación de medias respecto a la porosidad en cada sistema de labranza .....	58
Figura 30. Comparación de medias respecto a la porosidad en las diferentes profundidades .....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas de suelos .....	13
Tabla 2. Categorías de medios porosos usados para la estimación de $\alpha^*$ .....	20
Tabla 3. Clases de conductividad hidráulica del suelo saturado. (Tomadas de SSDS, 1993) .....	22
Tabla 4. Valores de $D_a$ con relación a la textura del suelo .....	28
Tabla 5. Resultados de conductividad hidráulica (K) en cada parcela.....	48
Tabla 6. Análisis de varianza con respecto a la conductividad hidráulica (K) .....	51
Tabla 7. Comparación de medias con respecto a la conductividad hidráulica del suelo en cada sistema de labranza.....	51
Tabla 8. Análisis de varianza con respecto a la densidad aparente en los sistemas de labranza y profundidades.....	53
Tabla 9. Comparación de medias respecto a $D_a$ obtenidas en cada sistema de labranza .....	54
Tabla 10. Comparación de medias respecto a la densidad aparente en la profundidad.....	55
Tabla 11. Análisis de varianza con respecto a la porosidad en los sistemas de labranza y profundidades.....	57
Tabla 12. Comparación de medias respecto a la porosidad obtenida en cada sistema de labranza.....	57
Tabla 13. Comparación de medias respecto a la porosidad en la profundidad .....	58

## RESUMEN

Con el objetivo de determinar la conductividad hidráulica (**K**), sobre tres sistemas de labranza, labranza convencional (**LC**), labranza vertical (**LV**) y labranza cero (**NL**), se realizó una investigación dentro del campo experimental denominado El Bajío ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), localizado a siete kilómetros al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila, México (Latitud 25°23'42" Norte y Longitud 100°59'57" Oeste). Se realizaron 36 lecturas utilizando el permeámetro de Guelph en un suelo que presenta una textura franco-arcillosa a dos cargas hidráulicas 5 y 10 cm, sobre los tres sistemas de labranza estudiados, a una profundidad de 30.48 cm. (1 pie). Se determinó también la densidad aparente (**Da**) y porosidad (**P**) en cada sistema a profundidades de 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm de profundidad para comparar con la conductividad hidráulica en los diferentes sistemas de labranza.

Los resultados obtenidos indican que **LC** presenta mayor conductividad hidráulica con un valor de 11.92 mm h<sup>-1</sup>, pero sin mostrar diferencia significativa con **LV** el cuál presentó una conductividad hidráulica de 10 mm h<sup>-1</sup>, **NL** presenta mayor diferencia con respecto a los demás sistemas estudiados con un valor de 7.387 mm h<sup>-1</sup>.

Para la **Da** los resultados indican que se presenta en valores más altos **NL** con un valor de 1.265 g cm<sup>-3</sup>, seguido por **LC** con 1.252 g cm<sup>-3</sup> y **LV** con un valor de 1.218 g cm<sup>-3</sup>.

En la determinación de **P** se encontró que se presenta un mayor porcentaje en **LV** con un 54.03% el cual muestra diferencia con los sistemas **LC** con un valor de 52.74% y **NL** con 52.26% donde no se presenta diferencia entre estos.

**Palabras clave:** *Sistemas de labranza, conductividad hidráulica, densidad aparente, porosidad, permeámetro de Guelph*

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 La labranza

La labranza del suelo son todas aquellas prácticas de manejo o explotación del suelo o del cultivo, que se llevan a cabo de diferentes formas sobre él (Jaramillo, 2002).

La FAO (2000) indica que los sistemas de cultivo son definidos por el conjunto de sistemas de labranza y de manejo de los cultivos y de sus residuos, siendo estos de gran importancia ya que influyen en las propiedades físicas del suelo dado que en gran parte, el tipo y la magnitud de esta influencia dependen de la labranza del suelo. La labranza del suelo es hecha con el propósito de alterar sus propiedades físicas y posibilitar a las plantas la expresión de todo su potencial. Las técnicas de labranza del suelo son utilizadas a fin de proporcionar una buena cementera y desarrollo de raíces, controlar malas hierbas, manejar los residuos de los cultivos, reducir la erosión, nivelar la superficie para el plantío, riego, drenaje, trabajos culturales y operaciones de cosecha e incorporar fertilizantes o pesticidas.

Este mismo autor dice que la incorrecta labranza del suelo es causada principalmente por la falta de conocimiento de los objetivos y de las limitaciones de las técnicas de labranza, la cual puede resultar negativa para el mismo, haciendo que este mal uso cause la erosión y la degradación física del suelo.

La disminución de los rendimientos en los cultivos es cada vez mayor por la degradación del suelo, debido a la sobreexplotación, los altos índices de deforestación, la eliminación de la cobertura vegetal y el exceso de laboreo del suelo. Una explotación eficiente del suelo en la producción de cultivos debe considerar los principios básicos de sustentabilidad, que se traducen en procesos productivos ecológicamente sanos, económicamente viables, socialmente justos, humanos y adaptables, con la aplicación adecuada de los adelantos e innovaciones de la ciencia y la tecnología (Navarro *et al.*, 2000).

El hombre ha usado y abusado del suelo a través de la historia de la agricultura, lo ha utilizado para su sustento y la producción de alimentos para el resto de la sociedad, pero muchas veces, con o sin conocimiento, ha contribuido a su destrucción por no usar los métodos de labranza adecuados para cada circunstancia, es por eso que dentro de toda la gama de sistemas de labranza existentes, se debe elegir aquel que optimice la producción considerando las condiciones del suelo, clima y economía (IICA-BID-PROCIANDINO. 1989).

Las operaciones de labranza pueden ser buenas o malas, dependiendo de cuando se realicen y como se realicen, es decir, si un suelo se ha deteriorado en sus características físicas; esta compactado y los cultivos no se desarrollan, quizás es necesario ayudar a recuperar esas características físicas pasando implementos que básicamente rompen el suelo y en algunos casos lo voltean, para así permitir la entrada y almacenamiento de agua, aire, fertilizantes y abonos; que se pueda colocar allí una semilla y que esta germine al permitir que sus raíces crezcan y se desarrolle la planta, por lo tanto cuando un suelo es afectado en sus propiedades físicas, se afecta también sus propiedades químicas y biológicas (Romero, 2002).

La labranza cero o siembra directa y la labranza vertical, han resultado ser las técnicas conservacionistas más utilizadas y difundidas, aunque en nuestro país, debido a las particularidades de los suelos, es necesario probar sus ventajas en cuanto al aumento en la retención de humedad, mismo que tendría como consecuencia, un aumento en la eficiencia de uso de este recurso al aumentar la relación entre rendimiento y agua utilizada por el cultivo (Hook y Gascho, 1988).

La labranza del suelo puede, inicialmente, mejorar la infiltración y, algunas veces, beneficiar el drenaje. Pero, con el tiempo, la labranza favorece la degradación de la estructura y la reducción de la tasa de infiltración (FAO, 2000).

## 1.2 El suelo y su textura

El suelo según Hillel (1998), es un sistema heterogéneo, polifásico, particulado, disperso y poroso en el cual el área interfacial por unidad de volumen puede ser muy grande.

Las tres fases que componen el sistema suelo son:

- La fase sólida, compuesta por el conjunto de las partículas inorgánicas (cristalinas y no cristalinas) y las orgánicas.
- La fase líquida, que la componen el agua y los solutos que están disueltos en ella, es decir, la fase líquida es, en realidad, una solución: la solución del suelo.
- La fase gaseosa: o atmósfera del suelo, formada por todos aquellos compuestos que se presentan en forma gaseosa y cuyos representantes más abundantes, en condiciones de aireación adecuada del suelo son el CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y vapor de agua.

Jaramillo (2002) dice que la textura es aquella propiedad que establece las cantidades relativas en que se encuentran las partículas de diámetro menor a 2 mm, es decir, la tierra fina en el suelo; estas partículas, llamadas separados, se agrupan en tres clases, por tamaños: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar).

Este autor indica también que el hombre puede acondicionar el suelo a sus necesidades, mediante el laboreo; el comportamiento físico edáfico obedecerá a la presencia de ciertas propiedades físicas y a la interacción entre ellas, en la fase sólida encontramos dos propiedades como son la textura y la estructura que son las que controlan la dinámica física del suelo. Para mantener un adecuado medio físico en el suelo, se deben implementar aquellas prácticas de manejo que garanticen que no se va a hacer un uso abusivo del mismo. Éstas se refieren a la utilización de la labranza y a la selección adecuada de los implementos de

acuerdo con el suelo y el cultivo; además, llevarla a cabo en las condiciones de humedad óptimas para el suelo y en la cantidad justa. El mantenimiento de las condiciones de humedad apropiadas para el cultivo se logra con la ayuda de sistemas adecuados de riego y drenaje, así como con el manejo de coberturas en el suelo, etc.

### **1.3 Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica ( $K$ ) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua y la conductibilidad está en su máxima expresión y es representada como  $K_s$ , mientras que en condiciones insaturadas o no saturadas es representada como  $K_q$ . En cualquier caso, depende del tamaño, número, orientación, distribución y continuidad de los poros especialmente los de retención, el tamaño de las partículas, tipo de fluido, cantidad relativa de fluido presente en la matriz del suelo (Reichardt y Timm, 2004). Es por ello que existe una relación cuantitativa entre la conductividad hidráulica y volumen de agua en un suelo que cuente con un alto porcentaje de partículas grandes (arenas), las cuales permitan el paso del agua rápidamente, y suelos que presentan un alto porcentaje de partículas pequeñas (arcillas) las cuales hacen que el paso del agua sea más lento (Rowell, 1994).

La conductividad hidráulica es una de las características de mayor importancia de los suelos, por cuanto son muchos los problemas referidos al riego y drenaje que, para su solución satisfactoria, requieren de este parámetro. La conductividad hidráulica se considera como la velocidad de infiltración que se presenta en un medio saturado (suelo), cuando el gradiente de energía o hidráulico es igual a la unidad y constituye una expresión numérica (Leitón, 1985).

Una baja conductividad hidráulica puede ser provocada por un bajo contenido de materia orgánica, combinada con un alto contenido de sodio, particularmente en suelos de textura fina. Un suelo que contiene más de 5% de sodio intercambiable

reportan baja conductividad hidráulica. Para que estos suelos mejoren su productividad no basta adicionar solo fertilizantes, sino que requieren la aplicación de un mejorador como fuente de calcio y/o de abonos orgánicos (FUNPROVER).

Reynolds *et al.*, (1983), presentaron el permeámetro de Guelph como una modificación del permeámetro presentado por Talsma y Hallam (1980). Este permeámetro consiste en un Mariotte construido con dos tubos concéntricos que actúan como depósito manteniendo la carga hidráulica constante en un hoyo practicado en el suelo. Los mismos autores desarrollaron además el procedimiento numérico para la determinación de los valores de la conductividad saturada en campo ( $K_s$ ) a partir de las mediciones de velocidad de flujo infiltrándose en estado estacionario. La medida de  $K_s$  con el método de Guelph es una técnica sencilla y relativamente rápida, aunque requiere un esfuerzo experimental considerable en el caso de muestreos de gran cantidad de puntos.

En el siguiente trabajo se utilizó el permeámetro de Guelph para medir la conductividad hidráulica y así poder determinar cuál de los sistemas de labranza utilizados es el presenta una mejor conductividad.

#### **1.4 Densidad Aparente**

La densidad de volumen o densidad aparente se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, tal cual se encuentra en su emplazamiento natural, incluyendo el espacio poroso (Pinot, 2000).

La densidad aparente del suelo es un buen indicador de propiedades importantes del suelo, como son: la compactación, porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración, lo que condiciona la circulación de agua y aire en el suelo, los procesos de establecimiento de las plantas (emergencia, enraizamiento) y el manejo del suelo. La densidad aparente afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces.

Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos. Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate (Donoso, 1992).

## **II. OBJETIVO**

Determinar cuáles son los valores de conductividad hidráulica en un suelo franco-arcilloso bajo tres tratamientos de sistemas de labranza (convencional, vertical y cero).

## **III. HIPÓTESIS**

El sistema de labranza vertical es el que presentará en el suelo una mejor conductividad hidráulica.

## IV. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 La conductividad hidráulica del suelo

Esta cualidad es la que define las posibilidades que tiene el agua de moverse dentro del suelo; la propiedad que se mide para evaluar dicha posibilidad se conoce como conductividad hidráulica del suelo y se representa como  $K_s$  o simplemente  $K$ ; por su definición, es una cualidad que se relaciona estrechamente con el drenaje del suelo (Leitón, 1985).

La conductividad hidráulica del suelo es fuertemente dependiente de su contenido de humedad y puede disminuir varios órdenes de magnitud al pasar del estado de saturación a punto de marchitez permanente (Hanks y Ashcroft, 1980). La conductividad hidráulica del suelo es máxima cuando está saturado, pues todos los poros están llenos con agua y actúan como conductores; además, a mayor tamaño de poros, mayor es la conductividad, por lo cual es una propiedad que depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas.

La conductividad hidráulica es una característica que depende de la porosidad del suelo, así como de la temperatura y salinidad del agua. Tomando en cuenta la porosidad, se puede decir que los suelos abiertos y/o bien estructurados son los que reportan en las pruebas los valores más altos de conductividad hidráulica (Leitón, 1985).

### 4.2 Métodos para determinar conductividad hidráulica

Leitón (1985) dice que son muchos y muy variados los métodos que se utilizan para determinar la conductividad hidráulica, sea midiendo el flujo de agua, o a través de valoraciones indirectas. Estos métodos pueden ser agrupados de la siguiente manera:

a) Métodos de laboratorio

En este caso, se realiza mediante la utilización de permeámetros para muestras alteradas y para muestras inalteradas.

b) Métodos de campo

Este grupo se puede dividir en dos:

1) Métodos que se realizan en presencia de nivel freático: se incluyen los elementos tales como piezómetro, dos, cuatro y multi-pozos, tubo, agujero de barreno, descarga de pozos y descarga de drenes.

2) Métodos que se realizan en ausencia de nivel freático: se incluyen los elementos tales como infiltrómetro, permeámetro de inclusión, de cilindro, inyección de pozos someros, gradiente de infiltración y doble tubo.

c) Métodos indirectos

Se realizan a través de la evaluación de la textura, composición granular y distribución del tamaño del poro.

De los métodos enumerados, la selección del más apropiado dependerá del objetivo que se persigue, de la precisión requerida en los resultados, de los materiales y equipo disponible, y del tipo de suelo donde se realiza la prueba.

Los métodos de laboratorio y los indirectos tienen la particularidad de medir la conductividad hidráulica en cualquier dirección. Los métodos restantes (los que se realizan en el campo) se pueden agrupar en superficiales y subterráneos. Dentro del primer grupo aparece el método del infiltrómetro y el del permeámetro de inclusión que miden principalmente la conductividad hidráulica en dirección vertical. Dentro del segundo grupo se encuentran los métodos que se realizan con presencia o ausencia de nivel freático. A excepción del piezómetro que mide la conductividad hidráulica en ambas direcciones, los métodos que se realizan en presencia de nivel freático, en su mayoría lo hacen en dirección horizontal, mientras que aquellos que no requieren presencia de nivel freático, lo hacen en dirección vertical, exceptuando el método de inyección de pozos someros.

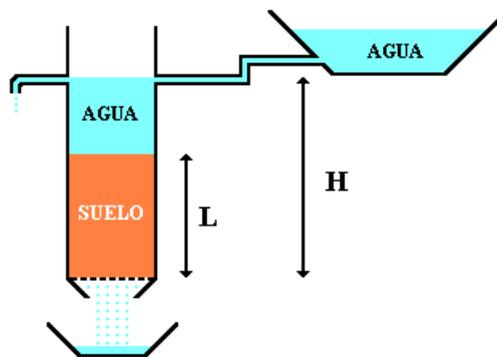
Uno de los métodos más sencillos, es el utilizado para determinar la velocidad de infiltración básica de campo, mediante el uso de los cilindros y fundamentado en el hecho de que en un medio homogéneo la velocidad de penetración del agua es rápida al principio, para luego estabilizarse en un valor aproximadamente constante, que viene a corresponder a la conductividad hidráulica ( $K$ ).

#### 4.2.1 Determinación de la conductividad hidráulica en laboratorio

Los métodos de laboratorio para medir la conductividad hidráulica han estado disponible desde los primeros experimentos de Henri Darcy en 1856 (Stephens, 1996), los cuales generalmente utilizan muestras cilíndricas no alterados o cilindros de suelo empacados. Para medir la conductividad hidráulica en el laboratorio se utilizan aparatos llamados permeámetros tanto de carga constante como de carga variable (Reynolds *et al.*, 2002).

##### 4.2.1.1 Carga constante de agua

La conductividad hidráulica del suelo se determina, en laboratorio, midiendo el tiempo que gasta en pasar un volumen determinado de agua a través de una columna de él, saturado con agua; para hacer esta prueba se utilizan los permeámetros, los cuales pueden ser de cabeza constante (el más común; ver representación en la Figura 1) y de cabeza variable (especial para suelos de baja permeabilidad) Motta *et al.*, (1990).



**Figura 1.** Representación esquemática de un permeámetro de cabeza constante

Para llevar a cabo la determinación, lo más recomendable es tomar muestras, sin disturbar, en sentido vertical y replicadas por lo menos 4 veces; pueden fabricarse los cilindros con tubería de PVC o de metal, según la dureza del suelo, de 20 a 30 cm de altura y de 10 a 12 cm de diámetro; se les debe biselar uno de los bordes para facilitar su penetración en el suelo; a unos 4 ó 5 cm del borde no biselado hacer dos perforaciones enfrentadas, pegando en ellas un tubito al cual se puedan adherir sendas mangueras, una para entrada y la otra para salida de agua para poder mantener el nivel del agua constante; luego, los procedimientos a seguir son:

- Tomar las muestras en campo con cilindros que no las disturben, hasta la altura deseada.
- En la parte inferior del cilindro se coloca una malla fina y se pone a saturar la muestra.
- Se coloca el cilindro con el suelo saturado en un soporte; debajo del cilindro se coloca un recipiente graduado para recoger el agua que pase a través del suelo; se conecta la manguera que abastecerá el agua y se empieza a adicionar ésta hasta que se alcance el nivel constante; observar el caudal que se está aplicando para no sobrepasar el nivel que proveen los orificios en el cilindro.
- Cuando se alcance el nivel constante, se empieza a contabilizar el tiempo; a ciertos intervalos de tiempo, se anota el volumen de agua que se ha recogido; éstas observaciones se hacen hasta que la velocidad de paso del agua a través de la columna de suelo sea más o menos constante.
- Al finalizar las observaciones anteriores, se calcula la conductividad hidráulica mediante la Fórmula siguiente (Motta *et al.*, 1990).

$$K_{sat} = \frac{V}{tA} \times \frac{L}{H}$$

Donde:

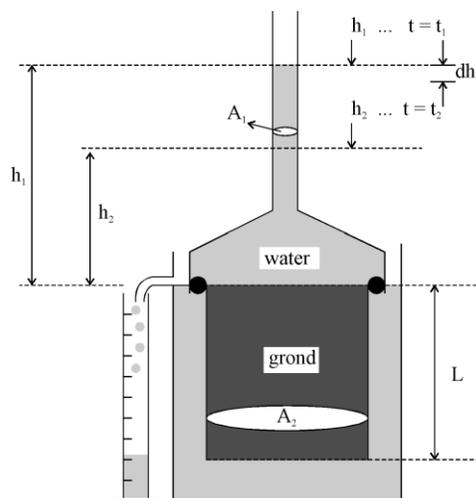
$K_{sat}$ : Conductividad hidráulica saturada ( $cm\ h^{-1}$ )

$V$ : Volumen total de agua que pasó a través del cilindro ( $\text{cm}^3$ )  
 $t$ : Tiempo total empleado en la prueba (min)  
 $A$ : Área transversal interna del cilindro ( $\text{cm}^2$ )  
 $L$ : Longitud de la columna de suelo (cm)  
 $H$ : Longitud de la columna de agua (cm)

#### 4.2.1.2 Carga variable de agua

El permeámetro de carga variable es similar al de carga constante, excepto que en lugar de mantener una carga constante de agua sobre la superficie de la muestra de suelo no se agrega más agua y al cambiar el nivel de la carga de agua se observa cómo se percola el agua a través de la muestra.

Los cilindros de suelo previamente preparados se humedecen desde la parte inferior hasta alcanzar la saturación. Se toman dos lecturas sucesivas en un mismo descenso del nivel del agua en la bureta para iguales intervalos de tiempo, luego se aplica agua con la bureta y se anota el tiempo y el nivel del agua sobre en punto de salida después de percolarse ( $h_0$ ), cuando se observe un descenso en el nivel de 40-50 cm o a 24 h debe anotarse el nivel del agua sobre el punto de desagüe ( $h$ ). Se toma el volumen percolado y el tiempo transcurrido. Cada pequeño descenso en la altura de la columna de agua por unidad de tiempo representa un flujo de la misma cantidad de agua por unidad de área por unidad de tiempo a través de la columna (figura 2).



**Figura 2.** Permeámetro de carga variable (Hartmann, 2000).

La conductividad hidráulica saturada con carga variable puede ser calculada usando la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{A_1}{A_2} + \frac{L}{(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Donde:

$K_s$  = conductividad hidráulica ( $L T^{-2}$ )

$L$  = longitud de la columna de suelo ( $L$ )

$A_1$  = área de la sección transversal del tubo por encima del suelo ( $L^2$ )

$A_2$  = área de la sección transversal del suelo ( $L^2$ )

$t$  = intervalo de tiempo ( $T$ )

$h_0$  = nivel inicial del agua sobre el punto de salida del agua percolada ( $cm$ )

$h$  = nivel final desagua sobre el punto de salida del agua percolada ( $cm$ ).

Como referencia se presentan valores de conductividad hidráulica saturada (Tabla 1) para diferentes texturas (Clapp y Homberger, 1978).

**Tabla 1.** Valores de conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas de suelos

Textura	$K_s$ ( $m d^{-1}$ )	$K_s$ ( $cm h^{-1}$ )
Arenosa	15	62.5
Areno franca	13.5	56.3
Franco arenosa	3.0	12.5
Franco limosa	0.6	2.5
Franca	0.6	2.5
Franco arcillo arenosa	0.54	2.3
Franco arcillo limosa	0.15	0.6
Franco arcillosa	0.21	0.9
Arcilla arenoso	0.19	0.8
Arcillo limosa	0.09	0.4
Arcillosa	0.11	0.5

## 4.2.2 Métodos de campo para determinar la conductividad hidráulica

Los métodos de campo permiten medir la conductividad hidráulica de un suelo en forma directa, mediante experiencias que contemplan la excavación de pozos superficiales, en los cuales se efectúan pruebas de agotamiento y recuperación, el uso de pruebas de infiltración, o a través de medidas de velocidad. En algunos casos es posible obtener una medida de la conductividad hidráulica del suelo, mientras que en otros se obtiene la tasa de infiltración básica, la que se relaciona directamente con la conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica puede medirse en la zona saturada y en la zona no saturada (Reynolds *et al.*, 2002).

### 4.2.2.1 Zona saturada

#### 4.2.2.1.1 Método del pozo

Consiste en realizar un agujero cilíndrico en el suelo, de 10 a 20 cm de diámetro, hasta alcanzar la mesa de agua permitiendo que el agua retorne a su nivel de equilibrio. El nivel de agua en el agujero se baja entonces sacando el agua mediante bombeo y se mide la tasa de ascenso del agua dentro del agujero hasta alcanzar el nivel de equilibrio (figura 3). (Hartmann, 2000; Van Beers, 1958, Reynolds *et al.*, 2002).

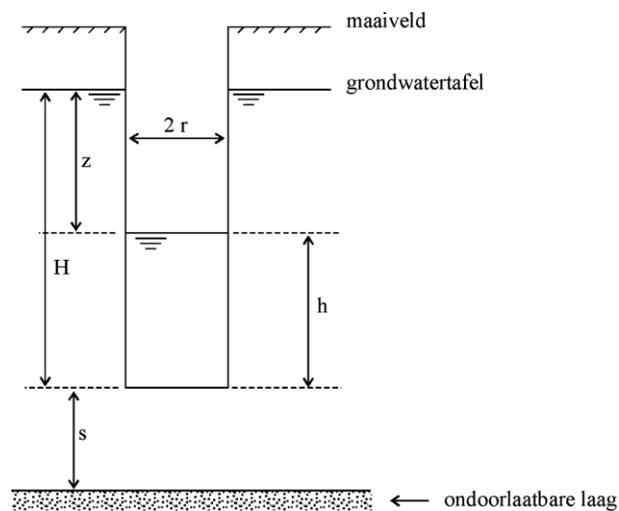


Figura 3. Método del pozo

La conductividad hidráulica puede ser calculada usando la fórmula:

$$K_s = C \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

$$C = C(r/H, s/H, z/H)$$

*Donde:*

*K<sub>s</sub> = conductividad hidráulica (L t<sup>-1</sup>)*

*Z = altura del agua en el hueco por debajo de la mesa de agua en tiempo t (L)*

*Dz/Dt = tasa de ascenso del agua en el hueco (L t<sup>-1</sup>)*

*C = factor de geometría que depende del radio r del agujero o pozo, la profundidad de la capa impermeable o infinitamente permeable por debajo del fondo del agujero (s), y la profundidad (z), todos medidos en relación a la profundidad (H) del agua en el pozo en equilibrio con el nivel freático (H/r, s/H, z/H)*

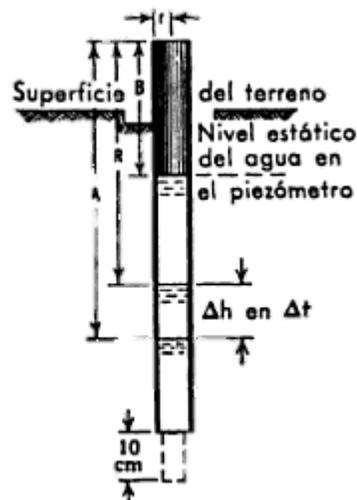
*H = Profundidad del pozo por debajo del nivel freático en equilibrio (L)*

#### **4.2.2.1.2 Método del piezómetro**

El método del piezómetro (figura 4) se emplea para calcular la conductividad hidráulica de un estrato dado o de una porción del perfil del suelo (la CH depende de las propiedades del agua del terreno, así como del perfil del suelo). Se hace un taladro en el terreno, que posteriormente se entuba, excepto una pequeña cavidad en el extremo inferior. La velocidad de entrada del agua en esa cavidad da una medida de la conductividad hidráulica del suelo que la rodea.

Instrucciones: se emplea una barrena de espiral, con un extremo cuadrado. Un tubo de conducción eléctrica de 3.8 a 5.1 cm de diámetro inferior, afilado por un extremo, puede ser utilizado como piezómetro. El taladro producido por la barrena es de diámetro inferior en 0.2 cm al diámetro inferior del piezómetro. Para evitar que el piezómetro se estropee al golpearlo, es preciso colocarle en su extremo superior un remache. Un instrumento eléctrico que mueva una campanilla puede ser utilizado para medir el nivel de agua. Para retirar el piezómetro puede emplearse un gato.

Método: se perfora un taladro de unos 15 cm de profundidad. Se introduce el piezómetro dentro del taladro unos 13 cm, por medio de golpes ligeros. De nuevo se barrana el suelo otros 15 cm más abajo del piezómetro. Este proceso continua hasta que el piezómetro ha alcanzado la profundidad deseada. En el extremo del piezómetro se deja una cavidad de 10 cm que se barrana con cuidado. Marcando la barrana debidamente se puede llegar a esa profundidad con precisión. Hay que retirar la barrana con cuidado para evitar que en la cavidad se produzcan desplazamientos. Se puede emplear una sonda hueca o un pequeño tubo al final de la sonda para permitir que el aire rompa la succión e impedir el enfangado de la cavidad. El piezómetro es bombeado o achicado con una bomba de engranajes o un achicador, para permitir que en los poros de la cavidad se provoque un flujo. Se inunda el piezómetro tantas veces hasta que la altura de elevación en el piezómetro sea la misma que la del bombeo anterior.



**Figura 4.** Perfil del piezómetro

Prueba: el agua se hace descender en el piezómetro a una distancia que depende de la tendencia al encharcamiento del perfil. El agua se nivela y los tiempos de las observaciones son registrados y utilizados en la fórmula de Kirkham, que sirve para calcular la conductividad hidráulica (Wiley, J & Sons, Inc. 1985).

$$CH = 377 * \frac{r^2}{c} * \frac{\Delta h}{\Delta t} * \frac{1}{A + R - 2B}$$

Donde:

$CH$ = Conductividad hidráulica ( $cm\ h^{-1}$ )

$r$ = diámetro inferior de un piezómetro (cm)

$c$ = función de la figura 5

$\Delta t$ = tiempo necesario para perder una altura  $\Delta h$  (min)

$\Delta h$ = aumento del nivel del agua ( $A-R$ ) (cm en un intervalo de tiempo)

$A$ = profundidad del nivel de agua al principio de la prueba (cm)

$R$ = profundidad de agua al final de la prueba (cm)

$B$ = profundidad estática del agua (cm)

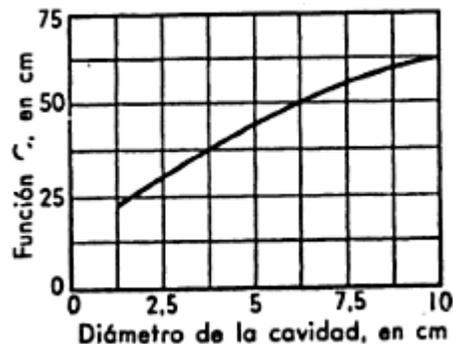


Figura 5. Determinación de C. función para una cavidad de 10.5 cm

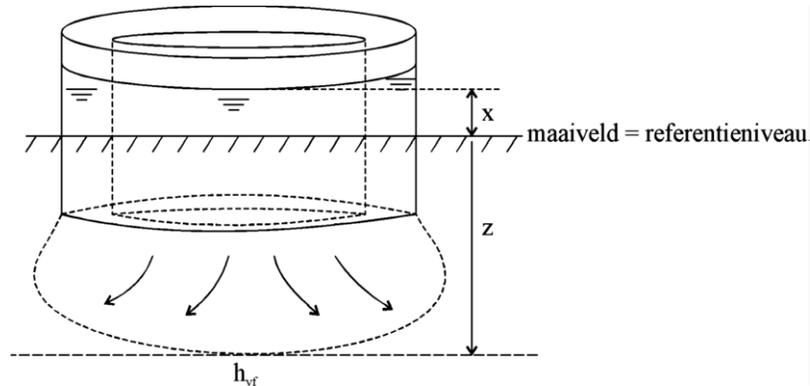
#### 4.2.2.2 Zona no saturada

##### 4.2.2.2.1 Infiltrómetro de doble anillo

Consiste de dos cilindros separados, usados para determinar la tasa de infiltración, la infiltración acumulada y la conductividad hidráulica saturada (Bouwer, 1986; Reynolds *et al.*, 2002) (figura 6). Es un método sencillo que puede ser usado para evaluar estos valores en los diferentes horizontes del suelo.

Los dos cilindros concéntricos son instalados con el propósito de reducir el flujo lateral en el cilindro interno. La tasa de infiltración en el cilindro interno se asume que sea una indicación del flujo vertical. Consiste en enterrar parcialmente un

anillo de diámetro en el suelo y colocar una lámina de agua de inundación constante o variable dentro de él. Se mide cuánta agua penetra en el suelo por unidad de área y tiempo.



**Figura 6.** Infiltrómetro de doble anillo (Hartmann, 2000)

La tasa de infiltración final constante puede ser dada usando la ley de Darcy:

$$q = KT \frac{hwf + z + x}{z}$$

Donde:

$q$  = tasa de infiltración ( $L T^{-1}$ )

$KT$  = conductividad hidráulica de la zona de transmisión ( $L T^{-1}$ )

$hwf$  = valor absoluto de la carga de presión en el frente de humedecimiento (al fondo de la zona de transmisión) ( $L$ )

$z$  = espesor de la zona de transmisión ( $L$ )

$x$  = carga de agua en el anillo interior del infiltrómetro ( $L$ )

La influencia de  $hwf$  y  $x$  vs  $z$  disminuye cuando  $z$  y el contenido de humedad aumentan. Como el gradiente de potencial hidráulico en un suelo homogéneo saturado alcanza la unidad con el tiempo, consecuentemente la tasa de infiltración adquiere un valor constante, así la ecuación sería:

$$q \approx KT$$

En cuanto a texturas no demasiado gruesas, la conductividad hidráulica de la zona de la transmisión es más o menos igual a la de la zona saturada.

$$q \approx K_T \approx K_s$$

Durante la medición es necesario tener cuidado de que la carga de agua en el interior y fuera del cilindro o anillo sea igual; de lo contrario puede ocurrir flujo lateral entre los dos anillos. Ambos anillos deben enterrarse hasta una profundidad de al menos 10 cm para reducir el flujo lateral a un mínimo. Normalmente toma largo tiempo antes de que la tasa de infiltración se haga constante. El resultado, aunque no siempre exacto, da una aproximación buena de la situación del campo.

#### **4.2.2.2 Infiltrómetro de disco e Infiltrómetro de tensión**

Los infiltrómetros de tensión de disco o de presión siguen el diseño básico de Perroux y White (1988). Están contruidos en metacrilato y dispone de una base circular de radio que está cubierta en su parte inferior por una malla permeable de nylon. En la parte superior del disco, que sirve de base, se roscan un cilindro y un Mariotte. El primero es el recipiente de alimentación del agua que se infiltra en el suelo y lleva una escala graduada que permite leer la cantidad de agua infiltrada (cm) en función del tiempo. El Mariotte consta también de un cilindro con agua que se comunica con el exterior a través de un tubo móvil llamado tubo de burbujas, el cual dispone de una entrada de aire que se usa para fijar el potencial de agua, para lo cual, basta con ajustar la altura ( $h_1$ ) del tubo de burbujas que se sumerge en el agua que contiene el Mariotte, leyendo esta longitud en una escala graduada. El potencial real del agua ( $h_0$ ), medido en cm de columna de agua, corresponderá a la suma algebraica de la altura  $H_1$  y la altura  $H_2$ . Esta última es la distancia existente entre la membrana de nylon y el tubo horizontal del capilar. Por tanto,  $H_0 = H_2 - H_1$ , y para todo  $H_1 > H_2$ ,  $h_0$  será negativo (tensión). Las tasas de infiltración leídas en la escala son luego convertidas en tasa de infiltración con

referencia al área de la base del infiltrómetro pues es el área real de infiltración (figura 7).

La conductividad hidráulica en campo puede estimarse mediante la siguiente expresión (Reynolds y Elrick, 1990):

$$Kfs = \alpha * GAR_1/[a(\alpha * H_1 + 1) + G\alpha * \pi a^2]$$

Donde:

$\alpha * (L^{-1})$ = *parámetro de textura-estructura (tabla 2)*

$A (L^2)$ = *área de la sección transversal del reservorio del infiltrómetro*

$R_1 (L T^{-1})$ = *tasa casi estable de caída del nivel del agua en el reservorio*

$a (L)$ = *radio interno del anillo*

$H_1 (L)$ = *carga de agua estable sobre la superficie de infiltración*

$G$  (*adimensional*)= *factor de forma*

$$G = 0.316 \left( \frac{d}{a} \right) + 0.184$$

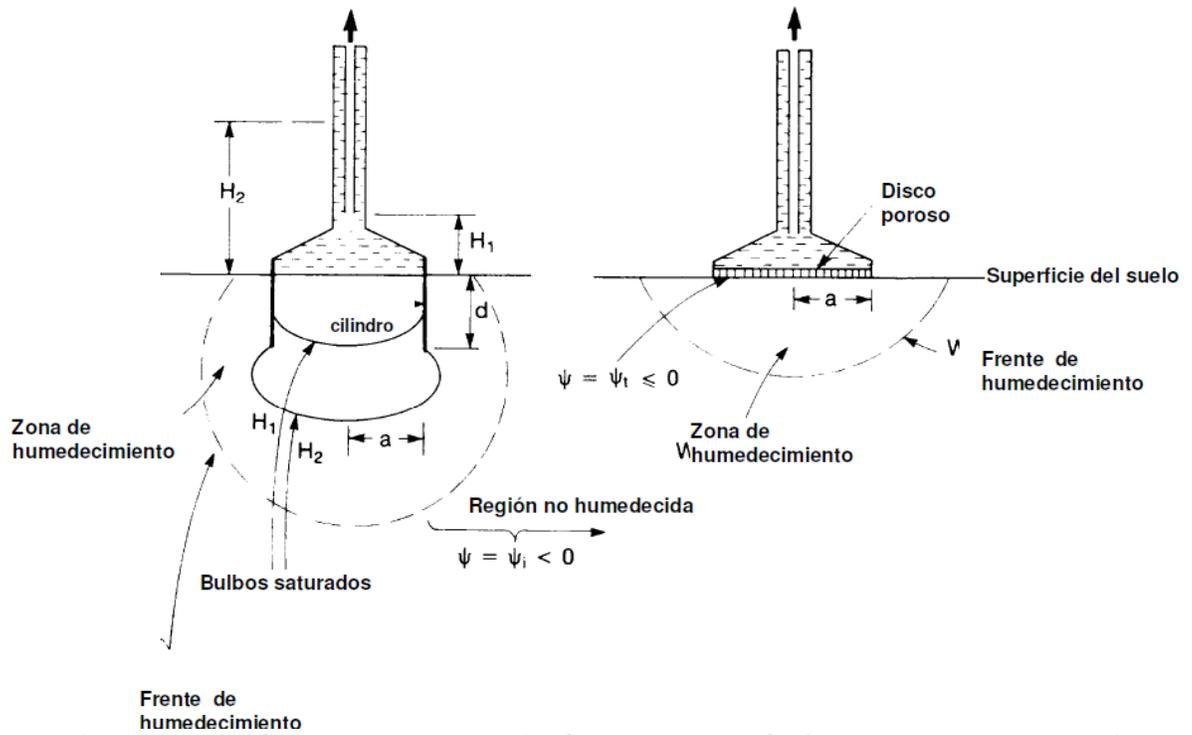
Donde:

$d (L)$ = *profundidad de inserción del anillo dentro del suelo*

**Tabla 2.** Categorías de medios porosos usados para la estimación de  $\alpha^*$

Categoría del medio poroso	Valor de $\alpha^*$ ( $m^{-1}$ )
Materiales compactados, materiales arcillosos o limosos poco estructurados, tales como sedimentos marinos o lacustrinos, materiales de relleno, etc.	1
Suelos que tienen textura fina y sin estructura	4
La mayor parte de los suelos estructurados desde arcillas, pasando por francos; además incluyendo arenas finas y gruesas desestructurados. Categoría más frecuentemente aplicada a suelos agrícolas	12
Suelos pedregosos y arenas gruesas, pueden además incluir algunos suelos con buena estructura con grandes grietas y macro poros	36

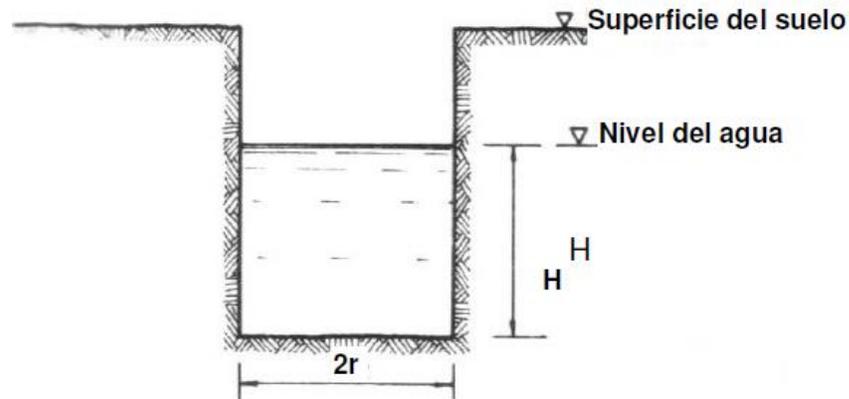
Fuente: Elrick *et al.*, (1989)



**Figura 7.** Infiltrómetro de disco e Infiltrómetro de tensión (Elrick y Reynolds, 1989)

#### 4.2.2.2.3 Método del pozo (invertido) (por encima del nivel freático)

En un pozo abierto por encima del nivel freático se vierte agua hasta cierto nivel y se mide la velocidad de descenso de dicho nivel (Figura 8). Constituye un método rápido y fácil de implementar.



**Figura 8.** Pozo invertido (barreno invertido) (Hartmann, 2000; Bower, 1978)

La conductividad hidráulica se puede calcular mediante la expresión:

$$K = \frac{r \ln[(1 + \frac{2H_0}{r}) / (1 + \frac{2H}{r})]}{2(t - t_0)}$$

Donde:

$H_0$  y  $H$  = las profundidades del nivel de agua en el pozo al inicio ( $t_0$ ) y después de un tiempo  $t$

$r$  = radio del pozo.

### 4.3 Interpretación de la conductividad hidráulica saturada

Para fines de interpretación de los valores de  $K_{sat}$  que se obtengan, el Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993) recomienda el uso de los límites críticos que se presentan en la tabla 3. Cabe recordar que como la infiltración básica del suelo se asimila a la  $K_{sat}$ , la información de la tabla mencionada también puede utilizarse para interpretar dicha infiltración.

**Tabla 3.** Clases de conductividad hidráulica del suelo saturado. (Tomadas de SSDS, 1993)

CLASE	RANGO DE VALORES DE $K_{sat}$		
	$\mu\text{m s}^{-1}$	$\text{cm h}^{-1}$	$\text{m día}^{-1}$
<b>Muy alta</b>	> 100	> 36	> 864
<b>Alta</b>	10 – 100	3.6 – 36	86.4 – 864
<b>Moderadamente alta</b>	1 – 10	0.36 – 3.6	8.64 – 86.4
<b>Moderadamente baja</b>	0.1 – 1	0.036 – 0.36	0.864 – 8.64
<b>Baja</b>	0.01 – 0.1	0.0036 – 0.036	0.0864 – 0.864
<b>Muy baja</b>	< 0.01	< 0.0036	< 0.0864

### 4.4 Prácticas de manejo de suelo que afectan la conductividad hidráulica

En un trabajo realizado en suelos arcillosos del Valle del Cauca, Jen y Quintero (1987) concluyeron en que sólo en aquellos suelos que presentaban capas compactadas, dentro del perfil, que restringían el desarrollo de la raíz, se obtenían

beneficios con el subsolado en la producción de caña de azúcar; así mismo, no encontraron ningún mejoramiento de la producción cuando subsolaron suelos arcillosos bien estructurados.

Castro (1996) también recomienda que antes de utilizar labranza se deben conocer muy bien propiedades del suelo como espesor total y de enraizamiento, contenido de materia orgánica, textura, estructura, densidad aparente, condición de drenaje, nivel freático, consistencia y limitantes químicos.

Castro y Amézquita (1991) no recomiendan que cada semestre se lleve a cabo prácticas de labranza en el suelo con cincel; antes deben hacerse evaluaciones físicas, siquiera anualmente para decidir cuándo se justifica su utilización, sobre todo desde el punto de vista de la infiltración del agua en el suelo.

Amézquita (1998) recomienda que antes de decidir el sistema de laboreo que se vaya a utilizar en un determinado suelo, se haga un diagnóstico de la condición física de él y evaluar sus posibilidades de soportar el desarrollo de las plantas que se piensan tener; en mini calicatas de 40 o más centímetros de profundidad, según el tipo de suelos, cuyo número depende de la variabilidad de los suelos presentes, se debe estudiar:

- Espesor del horizonte superficial
- Distribución y tipo de horizontes
- Textura y estructura
- Presencia de capas u horizontes endurecidos y su espesor
- Continuidad del espacio poroso
- Distribución del sistema radicular de la vegetación existente y profundidad en la cual es mayor su volumen
- Cambios en el contenido de humedad.

#### **4.4.1 Importancia de la labranza en la conductividad hidráulica en diferentes tipos de suelo y labranzas**

En el estudio realizado por Ohep *et al.*, (2002), concluyen que los sistemas de labranza conservacionista y convencional causaron cambios en los atributos físicos del suelo que efectuaron la producción del cultivo de maíz. La labranza conservacionista con aplicación de residuos vegetales, produjo modificaciones importantes, disminuyendo los valores de densidad aparente e incrementando la capacidad de aireación y la conductividad hidráulica del suelo.

La labranza cero o siembra directa y la labranza vertical, han resultado ser las técnicas conservacionistas más utilizadas y difundidas, aunque en nuestro país, debido a las particularidades de los suelos, es necesario probar sus ventajas en cuanto al aumento en retención de humedad, mismo que tendría como consecuencia, un aumento en la eficiencia del uso de este recurso al aumentar la relación entre rendimiento y agua utilizada por el cultivo (Hook y Gascho, 1988).

Uribe y Rouanet (2001), comparan el efecto de tres sistemas de labranza sobre la disponibilidad de un suelo Ultisol, para determinar si el tipo de labranza afecta el contenido de humedad en el perfil del suelo; utilizan tratamientos de cero labranza con quema, cero labranza sin quema y labranza tradicional. Concluyen que desde el punto de vista de la retención de humedad en el perfil del suelo Ultisol es recomendable utilizar cero labranzas sin quema de residuos.

La labranza de conservación es una de las opciones más viables para lograr la sustentabilidad de los recursos naturales suelo y agua, así como el rendimiento de los cultivos (Lal *et al.*, 1990), debido a que se protege el suelo de ser removido por el agua y el viento, reduciendo las pérdidas de nutrientes, además de incrementar la materia orgánica, velocidad de infiltración, flora y fauna del suelo así mismo como retener mayor cantidad de agua aprovechable para las plantas (Mannering y Fenster, 1983; Benites, 1992).

La menor cantidad de agua observada en la superficie en un tratamiento de labranza cero pudo deberse a una mayor pérdida por evaporación y a una reducción en la cantidad de agua ingresada por infiltración como consecuencia de la compactación detectada en la superficie. La presencia de residuos vegetales en la superficie y los canales generados por las lombrices, raíces y otros organismos del suelo favorecen la infiltración y la retención del agua (Dao 1993; Mahboubi *et al.*, 1993). El efecto mejorador de las propiedades del suelo bajo pastura en el tratamiento de labranza convencional y la labor profunda realizada en la labranza vertical permitieron una mayor capacidad de almacenaje de agua en el suelo a comparación con la labranza cero.

La labranza convencional produjo efectos adversos en los atributos físicos del suelo. El efecto de la rastra de disco provocó compactación, incidiendo en la densidad aparente, capacidad de aireación y conductividad hidráulica. Para efectos de retención de humedad, el factor profundidad y labranza influyen de manera benéfica debido a que a estratos más profundos existe más almacenamiento de agua disponible para el cultivo. Los sistemas de labranza de conservación favorecen la retención de humedad evitando pérdidas por percolación o evaporación (Demuner, 2012).

#### **4.4.2 Investigaciones realizadas de la conductividad hidráulica con relación a diferentes manejos del suelo**

Con relación a la conductividad hidráulica del suelo se ha señalado (Saunders *et al.*, 1978) que este es un parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo y, consecuentemente para solucionar problemas que envuelven irrigación, drenaje, recarga y conservación del suelo. La conductividad hidráulica es afectada por la textura y estructura del suelo, (Reichardt, 1985) siendo mayor en suelos altamente porosos, fracturados o agregados y menor en suelos densos y compactados.

En las investigaciones que se han realizado en relación a los efectos de la labranza sobre la conductividad hidráulica, algunas veces los resultados son contradictorios, muchos investigadores coinciden que en aquellos sistemas donde se perturba el suelo se consiguen generalmente mejores propiedades físicas (mayor macro porosidad y conductividad hidráulica, y menor densidad aparente) en la capa sometida a laboreo que en la mayoría de los sistemas conservacionistas. Sin embargo, el efecto de la labranza sobre dichos parámetros puede ser transitorio ya que, por impacto de las gotas de lluvia, el suelo puede recompactarse y disminuir la macro porosidad, lo cual tiene una influencia muy fuerte sobre el comportamiento del agua del suelo (Adeoye, 1982; Lindstrom y Onstad, 1984).

Relacionando la conductividad hidráulica con otras propiedades físicas. El servicio Norteamericano de Conservación de Suelos, llevó a cabo estudios intensivos acerca del efecto de la alteración de los suelos sobre la conductividad hidráulica, en varios Estados y uno de sus colaboradores O`Neal (1949), hizo 96 ensayos en muestras de suelos de campos distintos, con la menor alteración posible de su volumen y estructura. Concluyó que la estructura es el factor primordial en la evaluación de la conductividad hidráulica aunque no sea el único. Otras características físicas como la textura, la cuantía y dirección de la superposición de los agregados, influye considerablemente. La textura por sí sola no es un factor determinante aunque generalmente los suelos de textura gruesa se asocian con una conductividad hidráulica alta.

Muchos investigadores concuerdan con que la densidad, tamaño y distribución de los poros, tendencia de los suelos a dispersarse, cambios de volumen en los poros de los agregados formados por montmorillonita, son factores que pueden cambiar el valor de la conductividad hidráulica (Baver, 1938).

## 4.5 Densidad Aparente

La densidad aparente se define como la masa de suelo por unidad de volumen ( $\text{g cm}^{-3}$  o  $\text{t m}^{-3}$ ). Describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso (Keller y Håkansson, 2010). Es una forma de evaluar la resistencia del suelo a la elongación de las raíces. También se usa para convertir datos expresados en concentraciones a masa o volumen, cálculos muy utilizados en fertilidad y fertilización de cultivos extensivos. La densidad aparente varía con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica; puede variar estacionalmente por efecto de labranzas y con la humedad del suelo sobre todo en los suelos con arcillas expandentes (Taboada y Alvarez, 2008).

La densidad aparente puede ser incluida dentro de un grupo reducido de parámetros cuya medida es necesaria para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica al enraizamiento y la cohesión del mismo (Doran y Parkin, 1994). Cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre densidad aparente y la porosidad total.

Para medir la densidad aparente se retira del campo una muestra de suelo de volumen conocido y se seca en el horno a  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , hasta que alcanza un peso constante. La densidad aparente se calcula dividiendo el peso seco del suelo por el volumen que ocupaba en el campo:

$$\text{D. a. (g cm}^{-3} \text{ o Mg m}^{-3} \text{ )} = \frac{\text{peso de los sólidos de la muestra o peso seco}}{\text{Volumen de los sólidos} + \text{Volumen de poros}}$$

Los valores que puede tomar la densidad aparente dependen de muchos factores, incluyendo la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo, así como del manejo del mismo. En contraste con la densidad real, que es más o menos constante, la densidad aparente es altamente variable debido a variaciones

en la cantidad/calidad del espacio poroso. Los suelos de textura fina, bien estructurados y con altos contenidos de materia orgánica presentan valores más bajos de densidad aparente que los suelos de textura gruesa, poco estructurados y con bajos contenidos de materia orgánica (Doran y Parkin, 1994).

La densidad aparente es muy variable según el suelo, incluso en cada uno de los horizontes porque depende del volumen de los poros. Si el suelo es compacto, la densidad sube. Algunos valores de referencia, con relación a la textura se presentan en el cuadro 4 (Luque *et al.*, 1989).

**Tabla 4.** Valores de  $D_a$  con relación a la textura del suelo

<b>Textura</b>	<b>Densidad Aparente (g cm<sup>3</sup>)</b>
Arenoso	1.50 – 1.80
Franco arenoso	1.40 – 1.60
Franco	1.30 – 1.50
Franco arcilloso	1.30 – 1.40
Arcilloso	1.20 – 1.30

#### **4.6 Métodos para determinación de la densidad aparente**

La determinación de la densidad aparente es uno de los métodos más prácticos para evaluar la efectividad de las labores culturales y su impacto en la porosidad y en el mejoramiento o deterioro de la estructura, a la vez que puede ser importante para evaluar el grado de compactación de los suelos.

La importancia de una adecuada estimación del valor de esta propiedad del suelo deriva, por un lado, de la necesidad de expresar en términos de volumen (o superficie) las concentraciones de constituyentes del suelo, a efectos de [1] efectuar balances bio-geoquímicos de elementos en el suelo y [2] evaluar adecuadamente la disponibilidad de agua o nutrientes para las plantas, dado que los sistemas radiculares exploran volúmenes y las concentraciones volumétricas pueden diferir notablemente de las gravimétricas.

Existen diversos métodos para determinar la densidad aparente del suelo. Los más utilizados son:

#### **4.6.1 Método del cilindro metálico**

Es el método más sencillo y consiste en tomar un volumen fijo de suelo sin perturbar y pesarlo una vez seco, por calentamiento en el horno a 105 °C durante 24 horas. Para ello se suele utilizar un cilindro metálico con un volumen conocido. En uno de sus extremos se le coloca un cabezal cilíndrico, que se irá golpeando con un mazo de goma para poder presionar e introducir el cilindro o anillo toma de muestras dentro del suelo sin afectar a la muestra. Una vez clavado completamente, se extrae el cilindro del suelo, cortando con una herramienta apropiada, que nos permitirá eliminar el sobrante del extremo que se ha clavado. Una vez el cilindro esté lleno y enrasado en ambos extremos, se le coloca dos tapaderas de plástico a ambos extremos. Ya en el laboratorio se extrae el suelo contenido, cuyo volumen corresponde con el del cilindro y que es conocido, se deseca y se pesa. La densidad viene determinada por la relación entre el peso seco obtenido y el volumen correspondiente.

El principal inconveniente que presenta el método del cilindro es la presencia de piedras, por lo que solo puede utilizarse adecuadamente en suelos poco pedregosos que, por lo menos en sistemas forestales, son los menos. Asimismo, cuando se toman muestras sub-superficiales con una barrena que contiene los cilindros se corre el riesgo de compactar el suelo por la mera adherencia del mismo al deslizarse sobre las paredes de los cilindros (Page-Dumroese *et al.*, 1999; Grossman *et al.*, 2002; Brye *et al.*, 2004).

#### **4.6.2 Método del terrón (conjunto de agregados)**

Consiste en tomar un agregado del suelo, lo más grande posible, desecarlo y pesarlo para conocer su masa. Se ata con un hilo y se sumerge en parafina

fundida para impermeabilizar su superficie, y una vez solidificada ésta puede volver a pesarse. El agregado parafinado se introduce en una probeta graduada y llena de agua en la que se mide el incremento de volumen sufrido por el agua como consecuencia de la introducción del agregado, que corresponde con el volumen de éste. De esta forma conocemos los dos parámetros necesarios para el cálculo de la densidad. Aunque la capa de parafina es muy tenue y su volumen despreciable, puede estimarse en función de su densidad y del incremento de peso sufrido por el agregado tras el proceso de impermeabilización.

El principal inconveniente de este método es que no puede precisar el volumen de las grietas y de los huecos interpedales. Mas como quiera que todos ellos desaparecen al humedecerse el suelo, si sirve para determinar el comportamiento del suelo húmedo.

Es también difícil de usar en suelos con alto contenido de materiales gruesos (gravas y piedras), (Page-Dumroese *et al.*, 1999; Grossman *et al.*, 2002; Brye *et al.*, 2004).

#### **4.6.3 Método de excavación y determinación del volumen extraído**

Este tipo de método consiste en cavar un hoyo y, conservando toda la tierra retirada del hoyo como muestra, determinar el volumen de la muestra de suelo vertiendo en el hoyo del cual se extrajo la muestra un volumen de arena seca o agua. Por último, la muestra de suelo retirada es secada para determinar el peso seco del suelo extraído.

Una variante de este método, introducida por Müller y Hamilton en 1992, consiste en determinar el volumen inalterado de suelo extraído fabricando un molde exacto de la oquedad con espuma de poliuretano. Básicamente, el método consiste en 1) fabricar un hueco más o menos regular con el utensilio que sea más adecuado a las características del suelo y al volumen del mismo que se quiere muestrear,

transfiriendo cuantitativamente el material extraído a un recipiente hermético; 2) rellenar el hueco con espuma de poliuretano aplicada de forma circular y sin alcanzar el borde; 3) colocar un tope (cartón con peso) para evitar el rebosamiento de la espuma; 4) dejar curar la espuma durante al menos 3-4 horas, antes de enrasar y retirar el molde; 5) determinar el volumen del molde de poliuretano por desplazamiento de agua en un contenedor graduado.

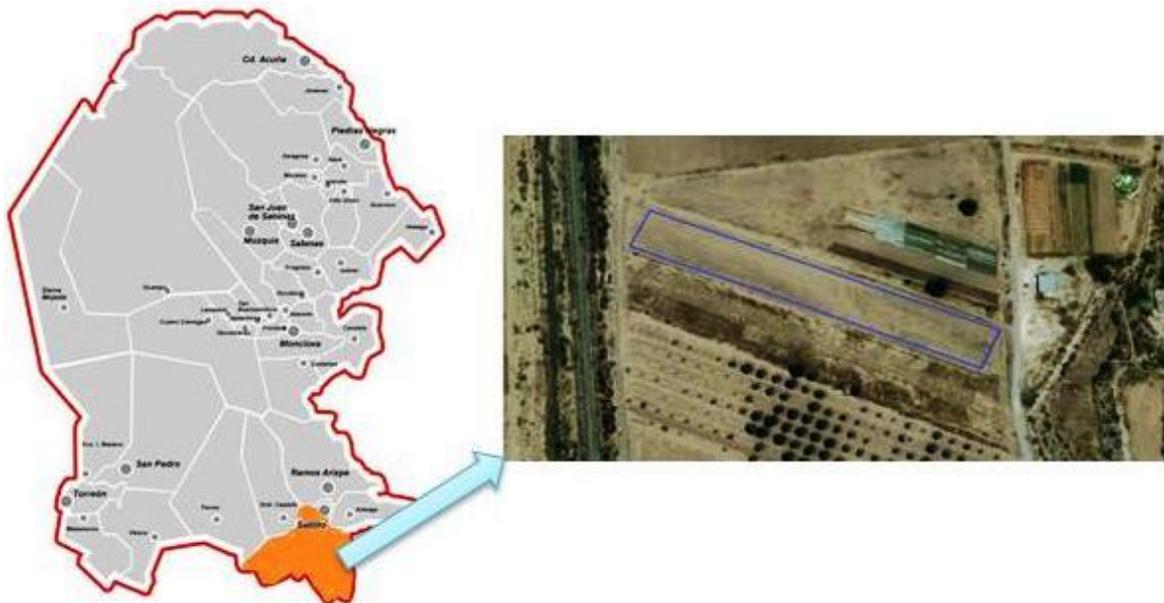
Las ventajas de este método, según describen sus autores son: 1) En suelos pedregosos sus resultados son similares a otros métodos de excavación/relleno (por ejemplo con arena o agua) y mejores que los obtenidos por el método del cilindro. 2) Este método es muy útil en zonas con marcada inclinación del terreno e incluso en caras verticales donde fallan los otros dos métodos de relleno citados (arena y agua) y 3) en sitios alejados de vías de comunicación este método permite efectuar determinaciones evitando el transporte de sustancias pesadas como arena o agua hasta los puntos de muestreo así como de otros utensilios distintos de los elementos de excavación. El reducido peso de los moldes de poliuretano permite transportar de decenas de ellos sin soportar pesos significativos (< 1 kg).

Trabajos posteriores han confirmado la utilidad y su fiabilidad del método en las situaciones indicadas tales como suelos pedregosos y/o muy inclinados y/o poco accesibles (Page-Dumroese *et al.*, 1999; Grossman *et al.*, 2002; Brye *et al.*, 2004).

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Localización geográfica

La presente investigación se está realizando dentro del campo experimental denominado el “Bajío” ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), la cual se encuentra ubicada en la ex hacienda de Buenavista, localizada a siete kilómetros al Sur de la Ciudad de Saltillo, Coahuila México. Las coordenadas geográficas extremas que la delimitan son: 100°59'57" de longitud Oeste, 25°23'42" de latitud Norte y una altitud de 1743 metros sobre el nivel del mar (msnm). De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1973), el clima de Buenavista se expresa bajo la fórmula: BS0kx'(w)(e'), que significa seco – árido, templado con verano fresco largo, con régimen de lluvias escasas todo el año tendiendo a llover más en el verano y clima extremoso. La temperatura media anual es de 16.9 °C, con una precipitación media anual de 435 milímetros, la evaporación media anual oscila entre los 1956 milímetros. Los vientos predominantes tienen una dirección noreste, con velocidades de 25.5 km h<sup>-1</sup> (Servicio Meteorológico Nacional 2012).



**Figura 9.** Ubicación geográfica del sitio experimental

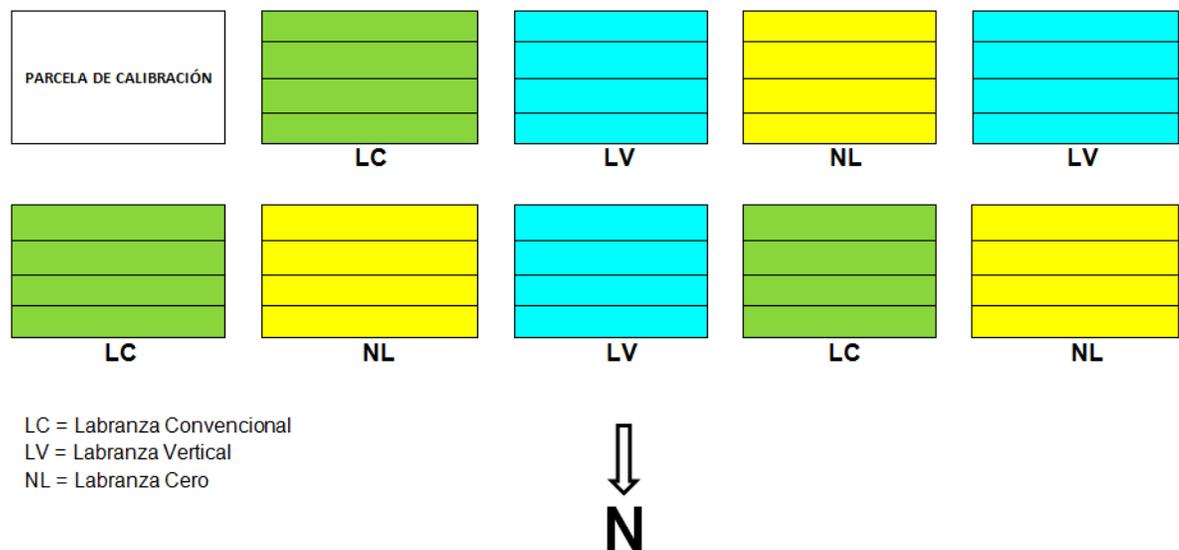
## 5.2 Geología

En el área de estudio se encuentran suelos de origen aluvial, provenientes de los materiales; como arenisca y caliza que al ser acarreados en épocas anteriores siendo depositados en el valle del terreno. Por lo general los materiales más finos se encuentran en las partes más alejadas del valle, esto es debido por su tamaño y por la facilidad de ser arrastrado.

## 5.3 Distribución de parcelas

Para su estudio se consideró un arreglo experimental de parcelas divididas con 9 parcelas de 40 metros de largo por 12 metros de ancho y en cada una de las parcelas se fue dividida en sub parcelas, como se observa en la figura.

Se utilizaron tres sistemas de labranza: convencional (**LC**), vertical (**LV**) y cero (**NL**).



**Figura 10.** Distribución del terreno experimental

Para la preparación del suelo en el sistema de labranza convencional se utilizó el arado y la rastra de discos, en el sistema de labranza vertical el arado de cinceles y en la labranza cero solo la sembradora, como se indica siembra directa.

Después de la cosecha, utilizando el permeámetro de Guelph se tomaron muestras en todas las parcelas para determinar la conductividad hidráulica que se tiene en cada una de estas con los distintos sistemas de labranza utilizados.

## **5.4 Conductividad Hidráulica por el método del permeámetro de Guelph**

### **5.4.1 Equipo utilizado**

El equipo empleado para el desarrollo de este trabajo son los que a continuación se mencionan.

#### **5.4.1.1 Instrumento**

Equipo: Permeámetro Guelph

Compañía: Soilmoisture Equipment Corp

Modelo: 2800K1



**Figura 11.** Permeámetro Guelph 2800K1

## 5.4.1.2 Piezas del Equipo

### 5.4.1.2.1 Instrumentos para Perforar



Figura 12. Instrumentos para Perforar

No.	Instrumento	Descripción
1	Perforador	Permite realizar una perforación manualmente.
2	Cilindro N°1	Funciona como un taladro, removiendo el suelo más firme, con este cilindro se perfora la profundidad tal que se requiere.
3	Cepillo	Una vez que ha finalizado la perforación del agujero, este instrumento se utiliza para remover la capa compactada que se genera durante la perforación en suelos húmedos.
4	Cilindro N°2	Se utiliza después de la perforación del agujero para obtener una geometría uniforme en la perforación (un fondo parejo y un diámetro de 6 cm. aproximadamente).

### 5.4.1.2.2 Permeámetro

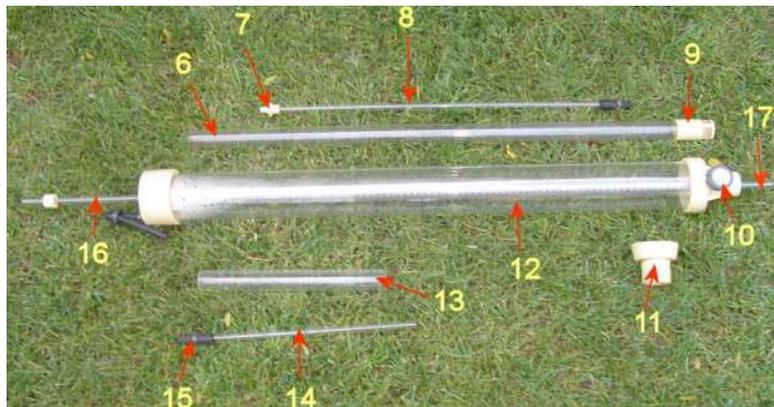


Figura 13. Cuerpo del Permeámetro

No.	Instrumento	Descripción
6	Tubo de Soporte	Sirve de soporte para la estructura del permeámetro y permite conducir el agua desde los reservorios principales hacia el punto de salida.
7	Punto para entrada de aire	Se utiliza para regular el nivel de agua dentro del agujero y permite o impide el flujo de agua desde los recipientes
8	Tubo de Aire Inferior	Permite el flujo de aire en el permeámetro
9	Punto para salida de agua	Se encuentra en la base del permeámetro, contiene una rejilla de goma que permite dispersar la energía de la salida del agua, para evitar la erosión en el agujero
10	Válvula de Recipientes	Si el indicador de la válvula apunta hacia arriba el flujo de agua sale desde ambos reservorios y si apunta hacia abajo el flujo sólo proviene desde el reservorio interior
11	Soporte deslizante	Permite ajustar la estructura del permeámetro (Tubo de Soporte) al trípode para montar el equipo en terreno
12	Reservorios Interior y Exterior	Almacenan el agua dentro del permeámetro
13	Regleta	Su escala se encuentra en centímetros y permite medir el nivel de agua dentro del agujero
14	Tubo de Aire Superior	Permite el flujo de aire en el permeámetro
15	Unión para los tubos	Dispositivo de goma que permite unir todos los tubos de aire internos
16-17	Tubo de Aire Medio	Permite el flujo de aire en el permeámetro

#### 5.4.1.2.3 Trípode

El trípode se utiliza para soportar el permeámetro en agujeros de infiltración con una profundidad no mayor a 38 cm.



**Figura 14.** Elementos del Trípode

No.	Instrumento	Descripción
18	Tubos (patas del trípode)	Permiten montar el permeámetro en terreno y le otorgan estabilidad al equipo
19	Base	La base permite ajustar las patas del trípode. Como se encuentra hecha de un material flexible permite ajustar el permeámetro a las inclinaciones del terreno
20	Soporte deslizante	Permite ajustar la estructura del permeámetro (Tubo de Soporte) al trípode para montar el equipo en terreno.
21	Cadena	Se introduce dentro de los orificios de los tubos del trípode, otorgándole mayor estabilidad a la estructura del equipo

#### 5.4.1.2.4 Recipiente y sonda para llenar de agua el permeámetro



Figura 15. Recipiente para llenado

### 5.4.2 Procedimiento

#### 5.4.2.1 Perforación del agujero para la muestra

Paso 1. Utilizando el cilindro número uno se hace la perforación con una profundidad de 30.48 cm (1 ft). La profundidad se mide con flexómetro.



**Figura 16.** Perforación con el cilindro no. 1

Paso 2. Una vez que se tenga el agujero se utiliza el cilindro número dos para obtener una geometría uniforme en la perforación (figura 17).



**Figura 17.** Cilindro no. 2 para un fondo parejo

Paso 3. Teniendo ya el agujero con la geometría indicada, con el cepillo se remueve la capa compactada que se genera durante la perforación del suelo (figura 18).



**Figura 18.** Cepillado para remover la capa compactada

#### **5.4.2.2 Armado del Instrumento**

Para el armado o ensamblaje de las piezas del equipo es conveniente seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Insertar las patas del trípode en la base de éste y luego insertar el seguro a través de los orificios que se encuentran en cada una de las patas. Una vez armado colóquelo sobre el agujero donde se tomaran los datos (figura 19).



**Figura 19.** Trípode armado

Paso 2: Se conectan el tubo de aire inferior con el tubo de aire medio, mediante la conexión de goma diseñada para unir los dos tubos. Se presiona firmemente el tubo de aire inferior contra la conexión hasta quedar lo más firme posible. La

conexión de ambos tubos puede no quedar completamente rígida y tener cierta flexibilidad horizontal, lo importante es que la conexión se mantenga firme cuando el permeámetro se encuentre en la vertical.

Paso 3: Se une el tubo de soporte con los recipientes interior y exterior, procurando que quede firmemente unido a la base de los recipientes, para evitar la entrada y salida de aire.

Paso 4: Se conecta el tubo de aire superior con el tubo de aire medio mediante una segunda conexión de goma.

Paso 5: Se inserta firmemente la regleta para medir el nivel de agua sobre la tapa de los recipientes. Para insertarla adecuadamente hay que tener en cuenta que el "0" en la regleta deberá estar aproximadamente 5 mm por debajo del tope de la tapa de los reservorios interior y exterior.

Paso 6: Se monta el permeámetro dentro del trípode y se lleva el soporte deslizante hasta ajustarlo en la base del trípode y el fondo del agujero (Figura 20). Para instalar el equipo en el agujero de infiltración, simplemente se debe bajar lentamente el permeámetro a través del trípode y procurar que el tubo de soporte no golpee las paredes del agujero.



**Figura 20.** Permeámetro armado y ensamblado

### 5.4.2.3 Llenado del Permeámetro

Para llenar el permeámetro se debe retirar el tapón presente en la parte superior de la tapa del reservorio, asegurándose que la válvula reguladora del flujo esté con su indicador hacia arriba para mantener conectados el reservorio interior y exterior.

Utilizando la sonda y el recipiente contenedor de agua, para rellenar se puede utilizar el pie ejerciendo presión en contra del recipiente o bien rellenar directamente levantando el recipiente.



**Figura 21.** Llenado del Permeámetro

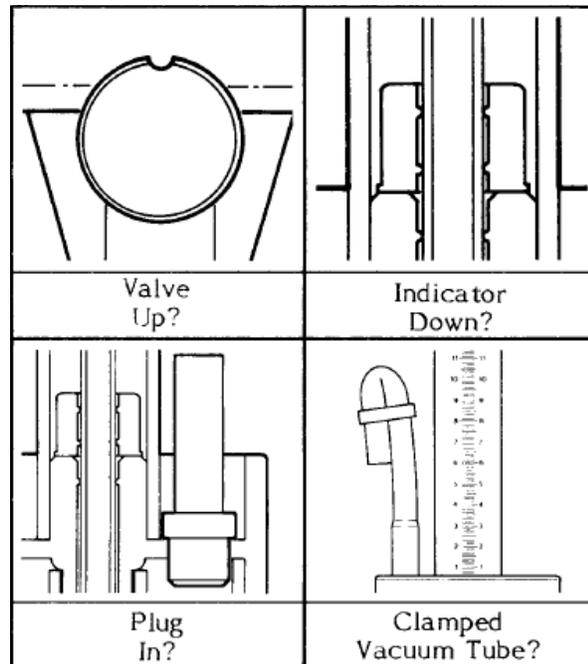
### 5.4.2.4 Recolección de Datos

Para determinar la tasa de infiltración en el suelo se debe utilizar el siguiente procedimiento:

Paso 1: Se verifica la configuración del permeámetro (figura 22):

- La válvula de la base del recipiente debe estar con su indicador hacia arriba.
- El indicador de nivel de agua debe estar asentado a la base de la tapa del permeámetro.

- El orificio para llenar el permeámetro debe estar tapado.
- El tubo de vacío debe estar correctamente sellado.



**Figura 22.** Verificación del permeámetro

Paso 2: Se establece la altura del nivel de agua en el agujero

Se levanta suavemente el tubo de aire superior hasta que el indicador de altura de agua en el pozo marque la altura de 5 cm. En este punto se debe tener cuidado con levantar el tubo de aire muy rápidamente puesto que se pueden generar turbulencias que ocasionan erosión en las paredes y en el fondo del agujero y además puede producirse que el nivel de agua suba bruscamente rebalsando el agujero.

Paso 3: Se determina la tasa de infiltración

Se debe seguir el comportamiento del nivel de agua dentro del permeámetro determinando la tasa de infiltración mediante el descenso de niveles en un intervalo de tiempo de 2 minutos, el tiempo es tomado con un cronometro. La tasa

de infiltración se determina hasta que existan al menos tres tasas sucesivas iguales, lo que indica que el sistema se encuentra en régimen permanente.

El descenso de los niveles que se da en cada intervalo de tiempo se anota en el formato correspondiente para el registro de datos.

Paso 4. Se establece una segunda altura del nivel de agua en el agujero

Levantar suavemente el tubo de aire superior hasta que el indicador de agua en el pozo marque 10 cm.

Paso 5. Determinar tasa de infiltración en la segunda altura

Se sigue el comportamiento del nivel de agua dentro del permeámetro determinando la tasa de infiltración mediante el descenso de niveles en un intervalo de tiempo de 1 minuto, el tiempo es tomado con un cronometro, se determina al menos hasta que existan tres tasas sucesivas iguales, indicando que el sistema se encuentra en régimen permanente.

El descenso de los niveles que se da en cada intervalo de tiempo se anota en el formato (figura 23) correspondiente para el registro de datos.

Date: \_\_\_\_\_  
 Tratamiento: \_\_\_\_\_  
 Repetición: \_\_\_\_\_

Depth of well: \_\_\_\_\_  
 Comb. Reserv. (X) = \_\_\_\_\_  
 Inner Reserv. (Y) = \_\_\_\_\_

H1 = 5 cm

H2 = 10 cm

Reding number	[1] Time (min)	[2] $\Delta$ time (min)	[3] Water level (cm)	[4] $\Delta$ Water level (cm)	[5]=[4]/[2] Rate of change (cm/min)
1	0	-			
2	1	1			
3	2	1			
4	3	1			
5	4	1			
6	5	1			
7	6	1			
8	7	1			
9	8	1			
10	9	1			
11	10	1			
12	11	1			
13	12	1			
14	13	1			
15	14	1			
16	15	1			

Reding number	[1] Time (min)	[2] $\Delta$ time (min)	[3] Water level (cm)	[4] $\Delta$ Water level (cm)	[5]=[4]/[2] Rate of change (cm/min)
1	0	-			
2	1	1			
3	2	1			
4	3	1			
5	4	1			
6	5	1			
7	6	1			
8	7	1			
9	8	1			
10	9	1			
11	10	1			
12	11	1			
13	12	1			
14	13	1			
15	14	1			
16	15	1			

**Figura 23.** Formato para el registro de datos

Cada sistema está dividido en cuatro sub parcelas, para lo cual se tomaron datos en cada sub parcela. Una vez que se tenían las tres o cuatro tasas de infiltración iguales, se obtiene el promedio de estas últimas en cm/min para cada carga, 5 cm y 10 cm.

Los promedios obtenidos en  $\text{cm min}^{-1}$  en ambas cargas son los utilizados para obtener la conductividad hidráulica en mm/h, la obtención de estos se hace en el programa con solo proporcional ambas cargas obtenidas en cada sub parcela. Teniendo la conductividad hidráulica que se obtuvo en cada sub parcela se procede a promediar estas, teniendo al final un solo dato de conductividad hidráulica por parcela, los cuales son los que se analizaron y se mostraran.

## **5.5 Densidad aparente por el método del extractor de núcleos**

La densidad aparente del suelo (densidad bruta) se refiere a la cantidad de masa de sólidos contenida en una cantidad unitaria de volumen total del suelo, es decir, además de considerar al volumen que ocupan los sólidos, se considera el espacio poroso existente entre ellos. La densidad aparente es un valor necesario para diferentes cálculos, entre ellos, el contenido volumétrico de humedad del suelo, el espacio poroso, lámina de riego, suelo perdido por erosión, cantidad de nutrimentos presentes en el suelo, etc. Para calcular la densidad aparente se utiliza el método del extractor de núcleos que se describe a continuación:

- i. Se pesan los cilindros a utilizar y se mide el diámetro interior y la altura con el vernier anotando posteriormente los datos.
  
- ii. Se limpia la superficie del suelo en el sitio de muestreo.
  
- iii. Con la barrena de extractor de núcleos se sacan las muestras a la profundidad deseada (0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm y 15-20 cm), colocándola de manera perpendicular a la superficie del muestreo, sujetándola firmemente y haciendo presión sobre la parte superior.
  
- iv. Se saca cuidadosamente el extractor cuidando que no se pierda la muestra.
  
- v. Se coloca una mano en la boca del extractor para desenroscarlo.
  
- vi. Se enrasa con la espátula las partes exteriores del cilindro y se coloca en las cajas transportadoras de muestras.
  
- vii. En laboratorio se ponen a secar las muestras en la estufa a una temperatura entre 105-110 °C durante veinticuatro horas.

viii. Transcurridas las veinticuatro horas se pesan las muestras una vez que están secas.

Se calcula la densidad aparente mediante las siguientes fórmulas: Para masa de sólidos:

$$ms = (\text{peso de muestra en seco} - \text{peso del cilindro})$$

Para volumen total:

$$Vt = \pi \left( \frac{d^2}{4} \right) h$$

Donde:

*Vt*: Volumen total (cm<sup>3</sup>)

*d*: Diámetro interno del cilindro (cm)

*h*: Altura del cilindro (cm)

Para densidad aparente:

$$Da = \frac{ms}{Vt}$$

Donde:

*Da*: Densidad Aparente (gr cm<sup>-3</sup>)

*ms*: Masa de sólidos (gr)

*Vt*: Volumen total (cm<sup>3</sup>)

## 5.6 Porosidad

La porosidad total del suelo es el volumen de éste que no está ocupado por sólidos; es el volumen que hay disponible en el suelo para los líquidos y los gases. La porosidad se calculó a partir de la densidad aparente (**Da**), se usó un valor de densidad real (**Dr**) de  $2.65 \text{ g cm}^{-3}$  mediante la fórmula siguiente:

$$P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

*Donde:*

*P: Porosidad total: %.*

*Da: Densidad aparente:  $\text{g cm}^{-3}$ .*

*Dr: Densidad real:  $\text{g cm}^{-3}$ .*

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Conductividad Hidráulica

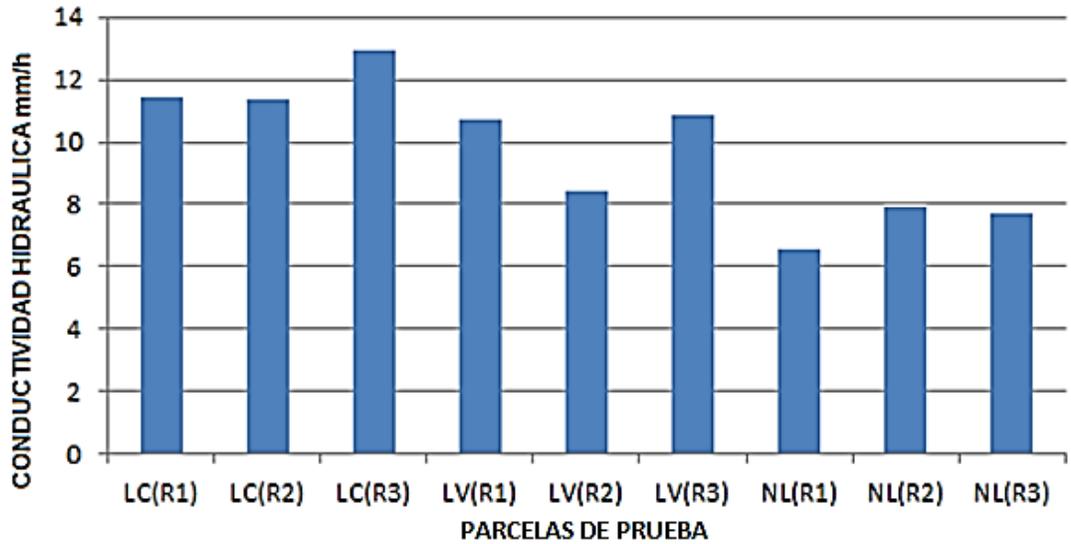
Con base en los resultados obtenidos en campo con el permeámetro de Guelph se procedió a evaluar el efecto de diferentes sistemas de labranza en la conductividad hidráulica ( $K$ ) del suelo, para analizar estadísticamente los datos se utilizó un arreglo completamente al azar; para así determinar la variación de los valores de la conductividad hidráulica para cada sistema.

En la tabla 5 se muestran los resultados de conductividad hidráulica obtenidos en cada sistema de labranza y sus respectivas repeticiones.

**Tabla 5.** Resultados de conductividad hidráulica ( $K$ ) en cada parcela

<b>CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA POR PARCELA</b>				
	<b>Sistema de labranza</b>	<b>Repetición</b>	<b>K (mm h<sup>-1</sup>)</b>	<b>K(cm h<sup>-1</sup>)</b>
<b>1</b>	LC	R1	11.42	1.142
<b>2</b>	LC	R2	11.37	1.137
<b>3</b>	LC	R3	12.96	1.296
<b>4</b>	LV	R1	10.71	1.071
<b>5</b>	LV	R2	8.44	0.844
<b>6</b>	LV	R3	10.86	1.086
<b>7</b>	NL	R1	6.57	0.657
<b>8</b>	NL	R2	7.90	0.790
<b>9</b>	NL	R3	7.69	0.769

La figura 24 nos muestra la conductividad hidráulica que se obtuvo en cada parcela dada en mm/h.



**Figura 24.** Conductividad hidráulica obtenida en cada parcela

De acuerdo a las clases de conductividad hidráulica saturada que presenta la SSDS (1993), los valores de los datos obtenidos en este experimento, se encuentran en la clase moderadamente alta, en esta clase el rango de valores de la conductividad hidráulica van de 0.36 a 3.6 cm h<sup>-1</sup>. Los datos obtenidos están en un rango de valor más bajo de 0.657 cm h<sup>-1</sup> en **NL** y el más alto de 1.296 cm h<sup>-1</sup> en **LC**, los cuales indican estar todos dentro de la clase moderadamente alta.

En los valores que muestran Clapp y Homberger (1978) con respecto a la conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas de suelos se observa que para suelos con textura franco arcillosa como lo es donde se estableció el experimento, un valor típico de conductividad hidráulica es de 0.9 cm h<sup>-1</sup>.

Para realizar el análisis estadístico y conocer si existen diferencias significativas en los resultados de la conductividad para cada tratamiento de labranza, se utilizó un arreglo completamente al azar;

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad , \quad i=1,2,\dots,t; \quad j=1,2,\dots,r$$

Donde:

$Y_{ij}$ : Denota la  $j$ -ésima medición del tratamiento  $i$ -ésimo.

$\mu$  : Media general.

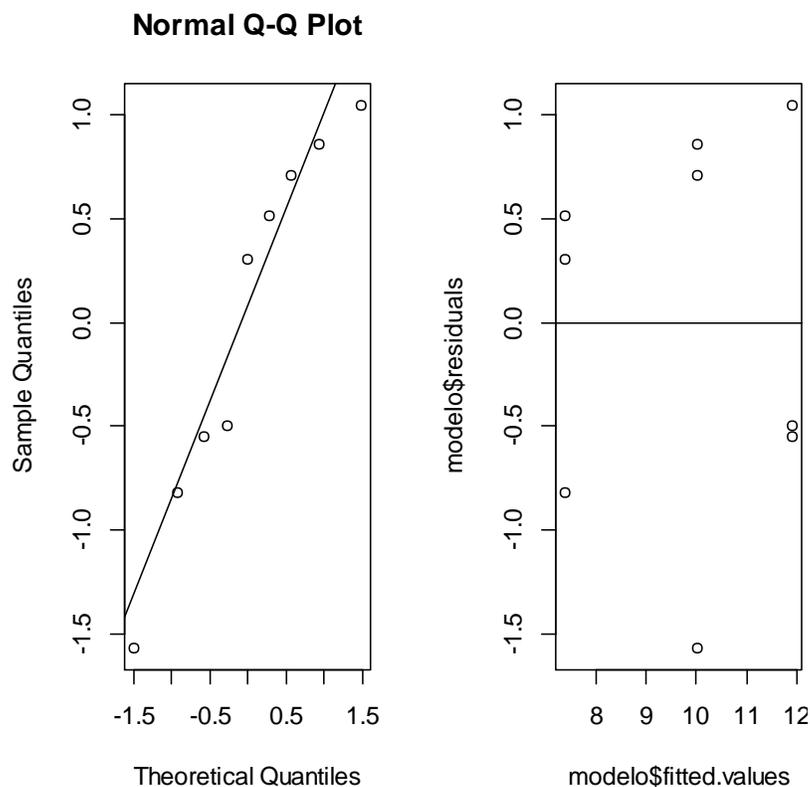
$\tau_i$  : Efecto del  $i$ -ésimo tratamiento.

$\varepsilon_{ij}$  : Error experimental de la  $j$ -ésima medición del  $i$ -ésimo tratamiento.

El análisis del modelo  $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$  tiene la finalidad de comparar los efectos de los  $t$  tratamientos.

Para ese fin se propone la hipótesis nula  $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_t$ .

Primero se verifico que los datos se distribuyeran de forma normal para proceder con su respectivo análisis, tal como se muestra en la Figura 25 existe una distribución normal. Si durante el análisis  $p$ -value da un valor mayor a 0.05 indica una distribución normal de los datos en esta ocasión el valor obtenido fue de  $p$ -value = 0.4643.



**Figura 25.** Distribución normal de los datos para su análisis

En la tabla 6 se muestra el análisis de varianza con respecto a la conductividad hidráulica para cada sistema de labranza, esto es para determinar si existe diferencia significativa entre tratamientos de labranza, el cual muestra que si se presenta una diferencia entre estos.

**Tabla 6.** Análisis de varianza con respecto a la conductividad hidráulica (K)

ANÁLISIS DE VARIANZA (K)						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
<b>Sistema de labranza</b>	2	31.0287	15.5143	14.697	0.004872	**
<b>Residuals</b>	6	6.3338	1.0556			

Los tres sistemas de labranza estudiados (convencional, vertical y cero) registraron diferencias significativas sobre la conductividad hidráulica del suelo.

Para la comparación de medias con una significancia de 0.05 (tabla 7), se encontró en los sistemas de labranza convencional y vertical se presentan valores de conductividad muy parecidos, debido a la intensidad de labranza del suelo con respecto al sistema de labranza cero. Así mismo en la figura 26 donde nos muestra la comparación de medias obtenidas en la conductividad hidráulica de cada sistema de labranza.

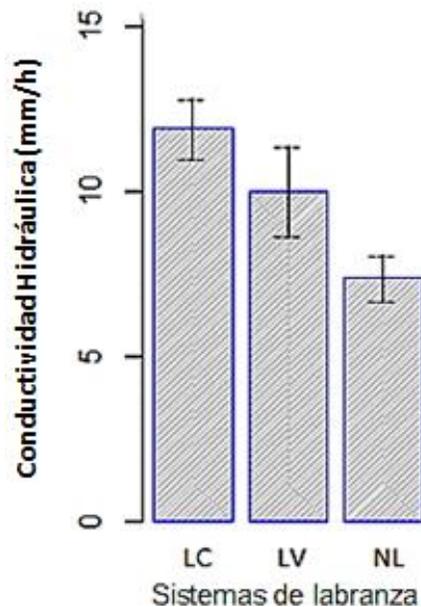
**Tabla 7.** Comparación de medias con respecto a la conductividad hidráulica del suelo en cada sistema de labranza

COMPARACIÓN DE MEDIAS (K)		
Grupos	Tratamientos	Medias K (mm/h)
a	LC	11.92
a	LV	10
b	NL	7.387

NIVEL DE SIGNIFICANCIA= 0.05

Lampurlanés y Cantero-Martínez (2006), indican que con la adopción de **NL** puede haber una disminución de la conductividad hidráulica debido a la reducción en la porosidad del suelo. Este efecto negativo de **NL** en la infiltración puede ser

contrarrestado por la presencia de residuos sobre la superficie del suelo, lo que resulta en un mayor almacenamiento de agua.



**Figura 26.** Comparación de medias respecto a la conductividad hidráulica en cada sistema de labranza

En suelos pesados sin labranza comúnmente en la superficie se encuentra una capa compactada. Dicha capa puede afectar el crecimiento de la raíz y la infiltración de agua en el suelo (Martínez *et al.*, 2008).

Una mayor cobertura de residuos en la superficie bajo siembra directa ayuda en la conservar el agua, a pesar de las indicaciones de baja conductividad hidráulica. Para superar las condiciones de baja infiltración y alta evaporación en suelos bajo no laboreo se recomienda levantar una parte de los residuos antes de la siembra o puede ser necesaria la labranza superficial durante la siembra (Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2006).

La estructura, según Montenegro (1990), tiene influencia en la mayoría de los factores de crecimiento de las plantas, siendo así considerada como la propiedad física clave para el desarrollo en determinados casos y además de ser un factor limitante de la producción.

El tamaño y la estabilidad de los agregados pueden ser indicativos de los efectos de los sistemas de labranza y de cultivo sobre la estructura del suelo. Suelos bien agregados proporcionan mayor retención de agua, adecuada aireación, fácil penetración de raíces y buena permeabilidad (FAO, 2000).

Esto explica parte del porque se tuvo una mejor conductividad hidráulica en la labranza vertical y labranza convencional ya que en estas se perturba el suelo generando espacios porosos a comparación con el sistema de labranza cero donde se aplica la siembra directa dejando el suelo sin modificar temporalmente su estructura, tomando en cuenta también que este sistema no es recomendable en suelos arcillosos.

## 6.2 Densidad Aparente

Los resultados de densidad aparente obtenidos con el extractor de núcleos se evaluaron para determinar el efecto en cada sistema de labranza y relacionarlos con la conductividad hidráulica, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

En la tabla 8 se muestra el análisis de varianza con respecto a la densidad aparente obtenida en las diferentes profundidades y en los diferentes sistemas de labranza, esto para determinar si existe diferencia significativa entre tratamientos, la cual muestra que si existe diferencia entre estos.

**Tabla 8.** Análisis de varianza con respecto a la densidad aparente en los sistemas de labranza y profundidades

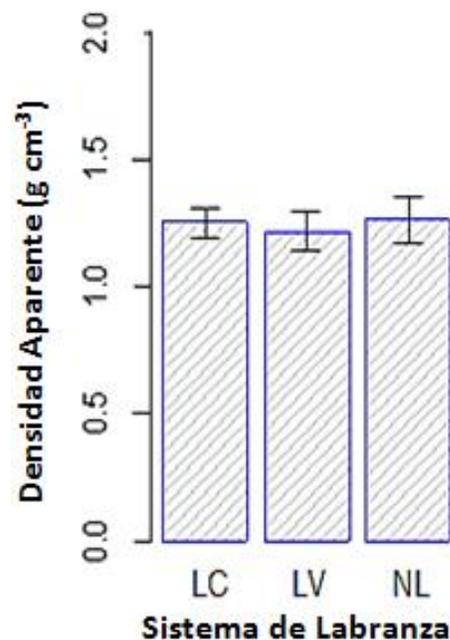
ANÁLISIS DE VARIANZA (Da)					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<b>Sistema de labranza</b>	2	0.2436	0.121807	9.8229	7.55e-05 ***
<b>Profundidades</b>	3	0.2200	0.073339	5.9142	0.0006337 ***
<b>Residuals</b>	278	3.4473	0.012400		

La tabla 9 nos muestra los resultados de densidad aparente obtenidos para cada sistema de labranza, mostrando una mayor densidad en el sistema de labranza cero, pero sin mostrar mucha diferencia con la labranza convencional. Tal como se muestra también en la Figura 27.

**Tabla 9.** Comparación de medias respecto a  $D_a$  obtenidas en cada sistema de labranza

COMPARACIÓN DE MEDIAS ( $D_a$ )		
Grupo	Tratamientos	Medias $D_a$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
a	NL	1.265
a	LC	1.252
b	LV	1.218

Con respecto a los valores de  $D_a$  con relación a la textura del suelo mostrados por Luque *et al.*, (1989), encontramos que los datos obtenidos en nuestra investigación están dentro del rango de suelos con textura arcillosa, ya que en esta el rango es de 1.20 a 1.30  $\text{g cm}^{-3}$ . Con estos datos nos damos cuenta que los valores de  $D_a$  obtenidos entran en el rango más bajo, lo cual representa una baja  $D_a$  en todos los sistemas de labranza.



**Figura 27.** Comparación de medias respecto a la  $D_a$  en cada sistema de labranza

Los valores que puede tomar la densidad aparente dependen de muchos factores, incluyendo la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo, así como del manejo del mismo.

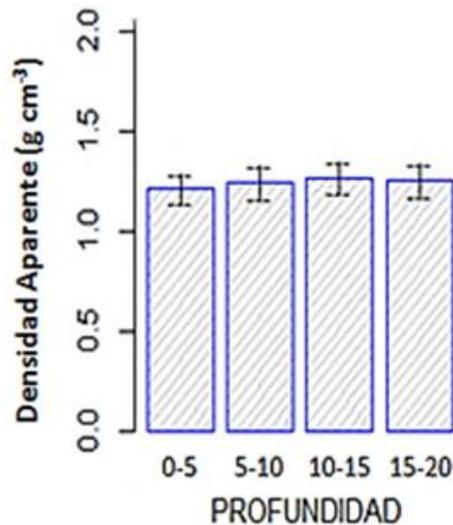
En la tabla 10 se observa la densidad aparente obtenida de las muestras a las diferentes profundidades, en el cual se observa una mayor densidad aparente a un profundidad de 10 a 15 cm.

**Tabla 10.** Comparación de medias respecto a la densidad aparente en la profundidad

COMPARACIÓN DE MEDIAS (Da)		
Grupos	Profundidades (cm)	Medias Da (g cm <sup>-3</sup> )
a	10-15	1.266
a	15-20	1.256
ab	5-10	1.241
b	0-5	1.216

Un estudio realizado por Martínez *et al.*, (2008), muestran en los resultados de este que los sistemas de gestión en el sistema **NL** afectan las propiedades físicas del suelo predominantemente en los 5 cm superiores del suelo. En particular, el sistema **NL** mejorada la estabilidad de los agregados del suelo. Por el contrario, la infiltración de agua en el suelo y la porosidad gruesa disminuyeron en **NL**, en comparación con la **LC**.

En **NL** sólo se prepara el sitio donde va a colocarse la semilla, dejando el resto del suelo sin manipular. Para que este sistema funcione adecuadamente, se requiere que el suelo tenga unas excelentes condiciones físicas. Este mecanismo podría explicar por qué se presenta mayor densidad aparente en la labranza cero, sabiendo que en este sistema de labranza el suelo no se perturba quedando una corteza sobre la superficie del suelo.



**Figura 28.** Comparación de medias en las diferentes profundidades

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces. Los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar anegamiento, anoxia y que las raíces tengan dificultades para elongarse y penetrar hasta alcanzar el agua y los nutrientes necesarios. En estas condiciones, el desarrollo y crecimiento de las plantas es impedido o retardado consistentemente (Donoso, 1992).

### 6.3 Porosidad

A continuación se muestran los resultados de porosidad (**P**) obtenidos a partir de la densidad aparente, mostrando el efecto en cada sistema de labranza.

La tabla 11 nos muestra el análisis de varianza con respecto a la porosidad obtenida en las diferentes profundidades y en los diferentes sistemas de labranza, esto para determinar si existe diferencia significativa entre tratamientos, la cual muestra que si existe diferencia entre estos.

**Tabla 11.** Análisis de varianza con respecto a la porosidad en los sistemas de labranza y profundidades

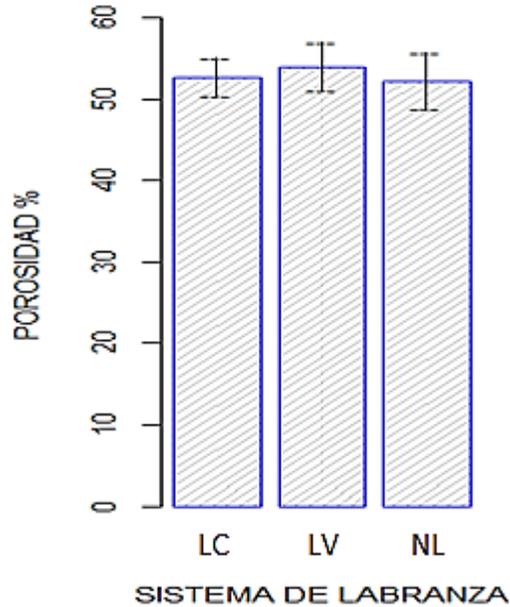
ANÁLISIS DE VARIANZA (P)						
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
<b>Sistema de labranza</b>	2	161.49	80.746	9.7385	8.17e-05	***
<b>Profundidades</b>	3	145.83	48.610	5.8627	0.000679	***
<b>Residuals</b>	278	2305.01	8.291			

La tabla 12 nos muestra los resultados de porosidad obtenidos para cada sistema de labranza, mostrando mayor porcentaje de esta en el sistema **LV**, se presenta diferencia solo entre este sistema a comparación con el sistema **LC** y **NL** donde no se presenta diferencia entre estos. Tal como se muestra también en la Figura 29.

**Tabla 12.** Comparación de medias respecto a la porosidad obtenida en cada sistema de labranza

COMPARACIÓN DE MEDIAS (P)		
Grupo	Tratamientos	Medias Porosidad (%)
<b>a</b>	LV	54.03
<b>b</b>	LC	52.74
<b>b</b>	NL	52.26

Teóricamente se acepta como buena una porosidad total promedia de alrededor de 50%. Según la calificación de Kaurichev (1984), indica que en los tres sistemas de labranza se presenta una porosidad satisfactoria, ya que él califica esta en un porcentaje de 50 a 55%.



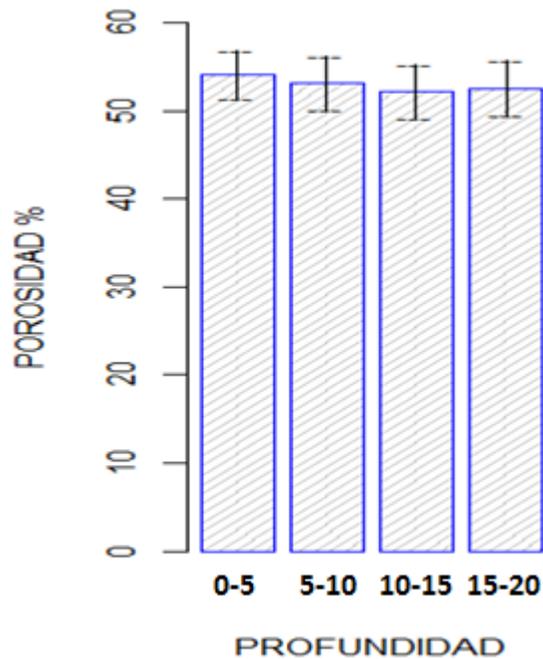
**Figura 29.** Comparación de medias respecto a la porosidad en cada sistema de labranza

En la tabla 13 se observa la porosidad obtenida en las diferentes profundidades, el cual nos muestra una mayor porosidad a un profundidad de 0 a 5 cm sin mostrar diferencia en la profundidad de 5 a 10 la cual también se comporta igual con las profundidades de 10 a 15 y 15 a 20 cm.

**Tabla 13.** Comparación de medias respecto a la porosidad en la profundidad

COMPARACIÓN DE MEDIAS (P)		
Grupos	Profundidades (cm)	Medias Porosidad (%)
a	0-5	54.1
ab	5-10	53.16
b	10-15	52.59
b	15-20	52.21

Es importante analizar, como en el caso de la densidad aparente, la distribución de la porosidad a través del perfil, para identificar posibles horizontes limitantes del drenaje, de la aireación, del aporte de humedad a la planta y/o del crecimiento de las raíces (IGAC, 1977).



**Figura 30.** Comparación de medias respecto a la porosidad en las diferentes profundidades

La distribución interna de la porosidad del suelo es un parámetro que debe ser evaluado periódicamente, sobre todo en suelos sometidos a usos intensivos. Los cambios en esta propiedad pueden ser indicativos de deterioro físico del suelo, como lo muestran los resultados presentados por Boels (1982), Klute (1982) y Centurion y Dematté (1985), así como los encontrados por García (1991), en suelos franco limosos del Valle del Sinú, sometidos a laboreo con discos durante 25 años.

## VII. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en los diferentes sistemas de labranza (**LC**, **LV** y **NL**), se puede decir que existe una conductividad hidráulica moderadamente alta en los tres sistemas estudiados sin mostrar mucha diferencia, dentro de estos sistemas se presentaron valores aún mayores de **K** en **LC** y **LV**, por la menor densidad de suelo y mayor espacio poroso comparados con el sistema **NL** .

Con respecto a la comparación de medias en la densidad aparente obtenida en cada sistema de labranza, se obtuvo mayor valor en **NL** debido a que el suelo no se perturba el valor de la densidad aunque un poco mayor a los otros sistemas, sigue siendo adecuado para el desarrollo de los cultivos.

La porosidad se presenta con mayor porcentaje en **LV**, pero los valores son también satisfactorios en los tres sistemas considerando en que en todos es mayor al 50%.

A tres años de labranza la **Da** y **P** no muestran mucha diferencia en los sistemas estudiados.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Adeoye, K. B.** 1982. Effect of tillage depth on physical properties of a tropical soil on yield of maize, sorghum and cotton. *Soil Tillage Res.* 2:225-231.
- Amézquita, E.** 1998. Propiedades físicas de los suelos de los llanos orientales y sus requerimientos de labranza. En: *Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación*. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 145-174.
- Baver, L.** 1938. Soil permeability in relation to non capillary porosity. *Soil Sci. American. Proc.* N° 3. pág 52-56.
- Benites, J. R.** 1992. Clasificación de los sistemas de labranza, pp 7-8. *In: Manual de sistemas de labranza para América Latina*. Boletín de suelos No 66. Food and Agricultural Organization (FAO). Roma, Italia.
- Boels, D.** 1982. Physical soil degradation in the Netherlands. *Technical Bulletins new series No. 12*. Institute for Land and Water Managements Research. Wageningen. Separata de: *Land Use Seminar on Soil Degradation*. pp. 47-65.
- Bouwer, H.** 1978. *Groundwater Hydrology*. New York, Mc.Graw-Hill Book Company, 480 p.
- Bouwer, H.** 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. En: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Monograph No 9, Madison, p 825-844.

- Brye, K. R., Morris, T. L., Miller, D. M., Formica, S. J., and Van Eps, M.A.** 2004. Estimating bulk density in vertically exposed stoney alluvium using a modified excavation method. *J. Environ. Qual.* 33:1937-1942.
- Castro, H.** 1996. Bases técnicas para el conocimiento y manejo de los suelos del Valle cálido del Alto Magdalena. *Corpoica Regional 6.* Ibagué. 107 p.
- Castro, H., y Amézquita, E.** 1991. Sistemas de labranza y producción de cultivos en suelos con limitantes físicos. *Suelos Ecuatoriales* 21 (1): 21-28.
- Clapp R. B., and Homberger G.M.** 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Res.* 14: 601.
- Centurion, J. F., y Dematté, J. L. I.** 1985. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de un solo sob cerrado cultivado com soja. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 9: 263-266.
- Dao, H.** 1993. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage. *Soil Science Society of America Journal.* 57: 1586-1595.
- Demuner M. G., Zapata C. M., Campos M. S. G., Zermeño G. A., y Sánchez P. F.** 2012. Efecto de tres sistemas de labranza y mejoradores de un suelo en la disponibilidad de humedad y volumen de exploración de raíces. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción. UAAAN. 117 p.
- Donoso Zegers, C.** 1992. *Ecología forestal.* Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.

- Doran, J. W., and Parkin, T. B.** 1994. Defining and assessing soil quality. SSSA special publication, 35, 3-3.
- Elrick, D. E., Reynolds, W. D., and Tan, K. S.** 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monit. Rev.* 9: 184-193.
- Elrick, D. E., and Reynolds, W. D.** 1992. Infiltration from constant head well permeameters and infiltrometers. En: G.C.Topp, W.D.Reynolds and R.E. Green, (Eds.) *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice.* SSSA Spec. Publ. 30. Soil Science Society of America, Madison, WI. p 1-24.
- FAO.** 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. *Boletín de tierras y aguas de la FAO.* 8: 220 p.
- García, J.** 1991. Efectos del laboreo en algunas propiedades físicas de los suelos algodoneros del valle medio del Sinú. *Suelos Ecuatoriales.* 21(1): 51-54.
- Grossman, R. B., and Reinsch, T. G.** 2002. Bulk density and linear extensibility. p. 201-254. In J. H. Dane and G. C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis* p. 9.-15. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Hanks, R. J. and G. L. Ashcroft.** 1980. *Applied soil physics: Soil water and temperature applications.* Springer-Verlag. Berlín. 159 p.
- Hartmann, R.** 2000. *Soil Physics. Lecture notes,* Dept of Soil Management and Soil Care, Ghent University, Belgium.
- Hillel, D.** 1998. *Environmental soil physics.* Academic Press. San Diego. 771 p.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC.** 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid (Departamento de Cundinamarca). IGAC. Bogotá. 513 p.
- Klute, A.** 1982. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Michigan. Cap. 3. pp. 29-43.
- Hook, J.E., and Gascho J. G.** 1988. Multiple cropping for efficient use of water and nitrogen. In: Hrgrofe, W. L. (Ed). Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. ASA Special Publication. America Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA. 51: 7-20.
- IICA-BID-PROCIANDINO.** 1989. XI seminario. Labranza de conservación de maíz. Ed. Por Barreto, H., Raab, R., Tasistro A. y Violic, A. D. Batán, México. PROCIANDINO. Pp. 5.
- Jaramillo Jaramillo, D. F.** 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia facultad de Ciencias Medellín. 613 p.
- Jen, S. y Quintero, R.** 1987. Efecto de los métodos de preparación del suelo en el desarrollo y producción de la caña de azúcar en el Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 17 (2): 64-71.
- Kaurichev, I. S.** 1984. Prácticas de edafología. 1ª. Ed. en español. Ed. Mir. Moscú. 280 p.
- Keller, T., and Håkansson, I.** 2010. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. Geoderma 154: 398-406

- Lal, R., Eckert, D. J., Fausey, N. R. and Edwards, W. M.** 1990. Conservation tillage in sustainable agriculture. 203-225 p.In: Sustainable agricultural systems. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa.
- Lampurlanes J., and Cantero-Martínez C.** 2006. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. Soil and Tillage Research 85. Pp. 13-26.
- Leitón S., y Santiago, J.** 1985. Riego y drenaje. Primera edición. Editorial UNED. San José Costa Rica. Pp. 153.
- Lindstrom, M. J., and Onstad, C. A.** 1984. Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting. Journal of Soil Water Conservation. 32: 149-152.
- Luque, A., Vazquez, J., y Luque, L.** 1989. Drenaje agrícola y desagüe de áreas inundables. Ed. Hemisferio sur. Buenos Aires Argentina.
- Mahboubi, A. A., Lal, R. and Faussey, and N. R.** 1993. Twenty eight years of tillage effects on two soils in Ohio. Soil Science Society American Journal. 57: 506-512
- Mannering, J. V., and Fenster, C. R.** 1983. What is conservation tillage. Journal of Soil and Water Conservation. 38: 141-143.
- Martínez E., Fuentes J. P., Silva P., Valle S., and Acevedo E.** 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. Soil and Tillage Research 99. Pp. 232–244.

- Montenegro, H. y Malagón, D.** 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 813 p.
- Motta de M. B. et al.** 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5ª. Ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- Muller R. N. and Hamilton M. E.** 1992. A simple, effective method for determining the bulk density of stony soils. *Communications in soil science and plant analysis* 23: 313-319.
- Navarro Bravo, A., Figueroa Sandoval, B., Ordaz Chaparro, V. M., y González Cossio, F. V.** 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo de maíz y frijol. Colegio de post graduados. Montecillo México. Pág 61.
- Ohep, C., Felipe, M., Spiridione, P. y Colenárez, C.** 2002. Efectos de la labranza conservacionista en los atributos físicos del suelo que influyen sobre el rendimiento del maíz. *Bioagro*. Barquisimeto. Venezuela. 14(1): 37-45.
- O'neal, A.** 1949. Soil characteristic significant in evaluating permeability. *Soil Sci.* Vol 67 N° 5. Pág 403-409.
- Page-Dumroese, D.S., Jurgensen, M.F., Brown, R.E., and Mroz, G.D.** 1999. Comparison of methods for determining bulk densities of rocky forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:379-383.
- Pinot, R, H.** 2000. *Manual de Edafología*. Ed.Computec. Chile.
- Perroux, K., and White, I.** 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52:1205-1215.

- Reichardt, K.** 1985. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4ed. Piracicaba. Fundação Cargill. 445p.
- Reichardt, K., and Timm, C. L.** 2004. Solo, planta e atmosfera. Conceitos, Processos e Aplicações. Editora Manole. SP (Brasil). 478 p.
- Reynolds, W. D., Elrick, D. E., and Topp, G. C.** 1983. A re-examination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.* 136 (4): 250- 268.
- Reynolds, W. D., Elrick, D.E., Youngs, E.G., Amoozegar, A., Booltink, H. W. G., and Bouma, J.** 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters. In: *Methods of Soil Analysis, Part 4-Physical Methods*, Dane, J.H. & Topp, G.C. (Eds). Soil Science Society of America. Madison, USA. p. 797-878.
- Romero, C. G.** 2002. Fundamentos básicos en la utilización de máquinas y equipos para laboreo del suelo, establecimiento y mantenimiento de cultivos. Puerto Carreño Vichada, Colombia. Pág. 34 y 37.
- Rowell, D. L.** 1994. *Soil Science: Methods and application*. Department of Soil Science. University of Reading. Edit. Longman Scientific & Technical. UK. p. 60-107.
- Saunders, L., Libardi, P., and Reichardt, K.** 1978. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 2: 164-7.
- SSDS (Soil Survey Division Staff).** 1993. *Soil survey manual*. Handbook No. 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D. C. 437 p.

**Stephens D. B.** 1996. Vadose zone hydrology. Lewis Publisher. USA. 347p.

**Taboada, M. A., y Alvarez, C. R.** 2008. Fertilidad física de los suelos. 2da Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

**Talsma, T., and Hallam, P. M.** 1980. Hydraulic conductivity measurement of forest catchments. *Soil Research*, 18(2), 139-148.

**Uribe, C. H., y Rouanet M. J. L.** 2001. Efecto de tres sistemas de labranza sobre el nivel de humedad en el perfil del suelo. *Agricultura Técnica*. Chile. 62 (4): 555-564.

**Vásquez, V. A.** 2000. Manejo de cuencas alto andinas. Tomo 2. Lima-Perú. 516 p.

**Wiley, J., and Sons, Inc.** 1985. Irrigation principles and practices (3 edition). New York, U.S.A. pp. 348.

#### **PÁGINA WEB CONSULTADA**

FUNPROVER [En línea] [Fecha de consulta] 17 de enero de 2014.  
<<http://www.funprover.org/formatos/manualTomate/Propiedades%20Fisica%20del%20Suelo.pdf>>

## IX. ANEXOS

### Script para el análisis de los datos de conductividad hidráulica en el programa R

```
# conductividad hidráulica maíz-frijol 2013

#datos
dat=read.csv("C:/r/filtración-maiz-frijol2013.csv")
attach(dat)
dat

#prueba de normalidad de los datos
shapiro.test(Variable)

# analisis de varianza
modelo=lm(Variable~Factor.A)
anova(modelo)

me=mean(Variable)
me

df=anova(modelo)[2,1]
df

mserror=anova(modelo)[2,3]
mserror

cv=(sqrt(mserror)/me)*100
cv

# analisis de residuales
par(mfrow=c(1,2))
qqnorm(modelo$residuals)
qqline(modelo$residuals)
plot(modelo$fitted.values,modelo$residuals)
abline(h=0)
shapiro.test(modelo$residuals)

library(agricolae)

# Factor A
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.A,df,mserror,group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.A")
```

```
bar.err(comparacion$means, variation="std", ylim=c(0,3), density=20, borde="blue", yl
ab="CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA mm/h", xlab="SISTEMA DE LABRANZA")
```

## Script para el análisis de los datos de densidad aparente en el programa R

```
# densidad aparente maiz-frijol 2013
```

```
#datos
dat=read.csv("C:/r/densidad-maiz-frijol2013.csv")
attach(dat)
dat
```

```
#prueba de normalidad de los datos
shapiro.test(Variable)
```

```
#analisis de varianza
modelo=lm(Variable~Factor.A+Factor.B+Factor.C+Factor.D)
anova(modelo)
```

```
me=mean(Variable)
me
```

```
df=anova(modelo)[5,1]
df
```

```
mserror=anova(modelo)[5,3]
mserror
```

```
cv=(sqrt(mserror)/me)*100
cv
```

```
#analisis de residuales
par(mfrow=c(1,2))
qqnorm(modelo$residuals)
qqline(modelo$residuals)
plot(modelo$fitted.values, modelo$residuals)
abline(h=0)
shapiro.test(modelo$residuals)
```

```
library(agricolae)
```

```
# Factor A
comparacion=HSD.test(Variable, Factor.A, df, mserror, group=TRUE, main="Prueba
de Tukey:Factor.A")
bar.err(comparacion$means, variation="std", ylim=c(0,3), density=20, borde="blue", yl
ab="DENSIDAD APARENTE gr/cm3", xlab="SISTEMA DE LABRANZA")
```

```

# Factor B
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.B,df,merror, group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.B")
bar.err(comparacion$means,variation="std",ylim=c(0,3),density=20,borde="
blue",ylab=" DENSIDAD APARENTE gr/cm^3",xlab="MEJORADORES")

# Factor C
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.C,df,merror, group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.C")
bar.err(comparacion$means,variation="std",ylim=c(0,3),density=20,borde="blue",yl
ab=" DENSIDAD APARENTE gr/cm^3",xlab="ROTACION C1-MONOCULTIVO
C2")

# Factor D
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.D,df,merror, group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.D")
bar.err(comparacion$means,variation="std",ylim=c(0,3),density=20,borde="blue",yl
ab=" DENSIDAD APARENTE gr/cm^3",xlab="PROFUNDIDAD")

```

### **Script para el análisis de los datos de porosidad en el programa R**

```

# porosidad maiz-frijol 2013

#datos
dat=read.csv("C:/r/porosidad-maiz-frijol2013.csv")
attach(dat)
dat

#prueba de normalidad de los datos
shapiro.test(Variable)

#analisis de varianza
modelo=lm(Variable~Factor.A+Factor.B+Factor.C+Factor.D)
anova(modelo)

me=mean(Variable)
me

df=anova(modelo)[5,1]
df

merror=anova(modelo)[5,3]
merror

cv=(sqrt(merror)/me)*100
cv

```

```

# analisis de residuales
par(mfrow=c(1,2))
qqnorm(modelo$residuals)
qqline(modelo$residuals)
plot(modelo$fitted.values,modelo$residuals)
abline(h=0)
shapiro.test(modelo$residuals)

library(agricolae)

# Factor A
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.A,df,merror,group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.A")
bar.err(comparacion$means,variation="std",ylim=c(0,60),density=20,borde="blue",
ylab="POROSIDAD %",xlab="SISTEMA DE LABRANZA")

# Factor B
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.B,df,merror, group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.B")
bar.err(comparacion$means,variation="std",ylim=c(0,60),density=20,borde="
blue",ylab="POROSIDAD %",xlab="MEJORADORES")

# Factor C
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.C,df,merror, group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.C")
bar.err(comparacion$means,variation="std",ylim=c(0,60),density=20,borde="blue",
ylab="POROSIDAD %",xlab="ROTACION C1-MONOCULTIVO C2")

# Factor D
comparacion=HSD.test(Variable,Factor.D,df,merror, group=TRUE,main="Prueba
de Tukey:Factor.D")
bar.err(comparacion$means,variation="std",ylim=c(0,60),density=20,borde="blue",
ylab="POROSIDAD %",xlab="PROFUNDIDAD")

```