



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**Validación con muestras de campo del límite superior de laborabilidad medido por el método de permeabilidad al aire.**

**POR:**

**JORGE SAMUEL LÓPEZ VELASCO**

**T E S I S**

**Presentada como Requisito Parcial para**

**Obtener el Título de:**

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.  
Marzo de 2007**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

Validación con muestras de campo del límite superior de laborabilidad  
mediante el método de permeabilidad al aire

Por:

**JORGE SAMUEL LÓPEZ VELASCO**

**TESIS**

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador como Requisito  
Parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Aprobada por el Comité de Tesis

Asesor Principal

---

Dr. Martín Cadena Zapata

Sinodal

Sinodal

---

M.C. Tomas Gaytan Muñiz

---

Ing. Mario Santos Ríos Camey

Coordinador de la División de Ingeniería

---

Dr. Raúl Rodríguez García.

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.  
Marzo de 2007

## **Agradecimientos**

*ADIOS:* Miro hacia atrás para ver el camino por donde me guiaste, he caminado un largo trecho donde tu luz me fue alumbrando cada día con mayor intensidad. Ahora me detengo un instante y miro hacia delante, a la luz de la aurora. Gracias, porque en mi caminar, nunca me abandonaste.

*A MI ALMA MATER:* Por recibirme en su seno y darme la oportunidad de formarme en sus aulas, ya que en ella siempre he encontrado el cobijo de su grandeza, la ternura de una madre, y los conocimientos para enfrentar los retos del mañana.

*Al Doctor Martín Cadena Zapata:* Por la oportunidad de realizar el presente trabajo, por su valioso tiempo que me brindó para la revisión y sugerencias durante la investigación, sobre todo por su amistad y la confianza que siempre me demostró.

*Al Ing. Mario Santos Ríos Camey:* Por su valiosa ayuda en la revisión, gracias por darme el tiempo necesario para hacerme recomendaciones y sugerencias tan importantes para llevar a buen término esta investigación. Gracias por tu amistad sincera.

*Al MC. Tomas Gaytan Muñiz:* Por Formar parte de este proyecto, por tener la delicadeza de transmitirme sus conocimientos. Gracias por brindarme su amistad.

Al MC. Héctor Uriel Serna Fernández: Por su sincera amistad y apoyo incondicional que siempre me brindó a lo largo de mi carrera.

A todos los maestros de la carrera: **Ing. Juan Arredondo Valdez, M.C. Juan A. Guerrero Hernández, Ing. Ramiro Luna Montoya, MC. Elizabeth de la Peña Casas, Ing. Rosendo Gonzalez Garza** por transmitirme sus conocimientos.

A mis compañeros de la generación CII de la carrera de Ingeniero Mecánico Agrícola: **Ismael Vargas, Teodoro, Refugio, Salvador, Humberto, Gabino, Ismael Torres, Tapia, Sabiel, Floriberto, Jorge Luís, Ángel, Andrés Garibi** por todos los momentos de alegría que pasamos juntos.

A mis amigos del municipio de La Independencia, Chiapas por haber pasado momentos inolvidables en especial a: **Rosemberg, Froy, Jorge Luís, Alermo y Alonso.**

# Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia que Dios me dio y que siempre creyeron en mí.

A mis Padres:

Sr. José David López Velasco.

Sra. Matilde Velasco García.

A tí Papa: Por ser la persona a quien admiro y respeto, por el apoyo incondicional que me has brindado en todo momento de mi existencia. Por tus consejos que siempre los llevo en mi mente, gracias a tu esfuerzo he logrado sobresalir en la vida. Doy gracias a Dios por darme un padre como tú.

A tí Mama: Por traerme a este mundo. Por ser la mujer más hermosa de mi vida, gracias por tu sacrificio, esfuerzo y desvelo y lo más valioso algo que nunca olvidare tus sabios consejos.

Gracias porque siempre han creído y confiado en mí, apoyándome en todas las decisiones que he tomado en la vida, mil gracias por enseñarme el camino correcto de la vida.

A mis hermanas:

Conchí: Por compartir mis triunfos, por ser mi confidente y apoyarme en todas las decisiones que he tomado.

Sisí: Por ser la consentida de la familia, por enseñarme cosas nuevas y hacerme reír en momentos de tristeza.

A ustedes por haber hecho que no exista la distancia y tenerme siempre en sus pensamientos.

A mis abuelos:

Felipe López López: Por ser la persona que más extraño a pesar del poco tiempo que tuviste junto a mí. No olvido ni una sola palabra tuya siempre te llevo en mi mente y en mi corazón. Gracias por haberme querido tanto.

Fernando Velasco y Concepción García: Gracias por sus consejos.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	¡Error! Marcador no definido.
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN .....	x
I. INTRODUCCIÓN .....	¡Error! Marcador no definido.
1.1 Laborabilidad del suelo .....	1
1.2 Compactación del suelo.....	2
1.3 Objetivo e Hipótesis.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 Límites de los estados de consistencia del suelo. ....	4
2.1.1 Límite de contracción.....	5
2.1.2 Límite plástico.....	6
2.1.3 Límite líquido.....	7
2.2 Investigaciones sobre laborabilidad del suelo.¡Error! Marcador no definido.	
2.3 Compactación del suelo.....¡Error! Marcador no definido.	
2.3.1 Origen de la compactación.....	9
2.3.2 Efectos de la compactación del suelo.....	10
2.3.3 Comportamiento mecánico del suelo en la compactación.....	10
2.3.4 Prevención de la compactación del suelo.....	11
2.3.4.1 Factores relacionados con la maquinaria.....	11

2.3.4.2 Factores relacionados con el suelo.....	12
---	----

2.3.5 Medidas que pueden ayudar a evitar el problemas de la compactación. ....	13
2.4 Métodos para estimar la permeabilidad al aire del suelo. ....	13
2.4.1 Método indirecto.....	13
2.4.2 Método de laboratorio. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.4</b>
2.4.2.1 Distribución del tamaño del agregado. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.4</b>
2.4.2.2 Pruebas de la columna.....	<b>¡Error! Marcador no definido.5</b>
2.4.3 Método de campo. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.5</b>
2.5 Métodos aproximados para estimar el límite superior de laborabilidad del suelo. ....	15
2.5.1 Método manual para calcular el límite inferior de plasticidad. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.5</b>
2.5.2 Capacidad de campo. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.6</b>
2.6 Método de la permeabilidad al aire para estimar el límite superior de laborabilidad. ....	17
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
3.1 Etapa I: Muestras de campo después del paso de maquinaria. ....	18
3.1.1 Identificación de una textura de suelo.....	18
3.1.2 Preparación del terreno y procesamiento de las muestras. ....	18
3.1.3 Contenido de humedad de las muestras.....	20
3.1.4 Permeabilidad al aire de las muestras. ....	21
3.1.5 Densidad aparente de las muestras.....	22
3.1.6 Porosidad del suelo.....	23
3.2 Etapa II: Muestras de campo y compactadas en laboratorio. ....	23
3.2.1 Identificación de una textura de suelo.....	23
3.2.2 Preparación del terreno y procesamiento de las muestras. ....	24
3.2.3 Contenido de humedad de las muestras.....	24
3.2.4 Compactación de las muestras. ....	25
3.2.5 Permeabilidad al aire de las muestras. ....	26
3.2.6 Densidad aparente.....	27

3.2.7 Porosidad del suelo.....	27
--------------------------------	----

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
4.1 Etapa I: Muestras de campo después del paso de maquinaria. ....	28
4.1.1 Características del sitio experimental .....	28
4.1.2 Comportamiento de la permeabilidad al aire en relación con la humedad. ....	28
4.1.3 Relación entre los cambios de densidad aparente con el contenido de humedad. ....	30
4.1.4 Comportamiento de la porosidad después de la compactación relacionada con la humedad.....	31
4.2 Etapa II: Muestras de campo y compactadas en laboratorio. ....	32
4.2.1 Comportamiento de la permeabilidad al aire en relación con la humedad. ....	32
4.2.2 Relación entre los cambios de densidad aparente con el contenido de humedad. ....	33
4.2.3 Comportamiento de la porosidad despues de la compactación relacionadad con la humedad.....	34
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	36
VI. LITERATURA CITADA.....	38
VII. ANEXOS .....	42
Anexo 1. Resultados obtenidos depermeabilidad al aire, densidad aparente y porosidad del suelo con muestras de campo después del paso de maquinaria.....	43
Anexo 2. Resultados obtenidos de permeabilidad al aire, densidad aparente y porosidad del suelo con muestras de campo y compactadas en laboratorio.....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Variación de la fuerza de cohesión y adhesión .....	5
Figura 3.1 Área donde se realizó la investigación .....	19
Figura 3.2 Parcela dividida en seis bloques .....	20
Figura 3.3 Tractor John Deere 2300 .....	20
Figura 3.4 Barrena tipo extractor de núcleos.....	21
Figura 3.5 Balanza de precisión .....	21
Figura 3.6 Estufa de secado.....	21
Figura 3.7 Permeámetro de aire y descripción de sus partes .....	23
Figura 3.8 Área donde se realizó el trabajo de investigación .....	24
Figura 3.9 Muestras tomadas en campo .....	25
Figura 3.10 Prensa neumática simuladora de compactación.....	26
Figura 3.11 Diagrama del simulador de compactación neumático alimentado por un compresor .....	26
Figura 3.12 Vernier.....	27
Figura 4.1 Suelo de textura migajón arcilloso.....	29
Figura 4.2 Límite superior de laborabilidad .....	30
Figura 4.3 Relación entre el contenido de humedad y densidad aparente...	31
Figura 4.4 Relación entre el contenido de humedad y la porosidad.....	32
Figura 4.5 Límite superior de laborabilidad .....	34
Figura 4.6 Relación entre el contenido de humedad y densidad aparente...	35
Figura 4.6 Relación entre el contenido de humedad y la porosidad.....	3

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Primer bloque (permeabilidad al aire).....	44
Tabla 1.2 Segundo bloque (permeabilidad al aire).....	44
Tabla 1.3 Tercer bloque (permeabilidad al aire) .....	44
Tabla 1.4 Cuarto bloque (permeabilidad al aire) .....	44
Tabla 1.5 Quinto bloque (permeabilidad al aire).....	45
Tabla 1.6 Sexto bloque (permeabilidad al aire).....	45
Tabla 1.7 Primer bloque (Densidad aparente y porosidad) .....	46
Tabla 1.8 Segundo bloque (Densidad aparente y porosidad) .....	46
Tabla 1.9 Tercer bloque (Densidad aparente y porosidad) .....	47
Tabla 1.10 Cuarto bloque (Densidad aparente y porosidad) .....	47
Tabla 1.11 Quinto bloque Densidad aparente y porosidad) .....	48
Tabla 1.12 Sexto bloque (Densidad aparente y porosidad) .....	48
Tabla 2.1 Presion 400 kp a(permeabilidad al aire).....	50
Tabla 2.2 Presion 600 kpa (permeabilidad al aire) .....	51
Tabla 2.3 Presion 800 kpa (permeabilidad al aire).....	51
Tabla 2.4 Presion 1000 kpa (permeabilidad al aire).....	52
Tabla 2.5 Presion 400 kpa (Densidad aparente y porosidad) .....	53
Tabla 2.6 Presion 600 kpa (Densidad aparente y porosidad) .....	53
Tabla 2.7 Presion 800 kpa (Densidad aparente y porosidad) .....	54
Tabla 2.8 Presion 1000 kpa (Densidad aparente y porosidad) .....	54

## RESUMEN

La agricultura en México tiene una producción escasa y fluctuante frente a un consumo en constante crecimiento que obliga a producir más y mejor en base a cultivos cada vez mas mecanizados, lo cual origina la degradación de los suelos. Sin embargo no se tiene actualmente una forma cuantitativa de determinar en que valores de humedad el suelo es todavía laborable antes de que ocurra compactación por el tráfico de maquinaria.

El presente trabajo se realizó para obtener el límite superior de laborabilidad (LSL) de una textura de suelo agrícola (migajón-arcilloso), del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) Saltillo, mediante el método de permeabilidad al aire.

La evaluación se realizó en dos etapas, la primera consistió en dividir una parcela en seis bloques iguales, posteriormente saturar de agua al suelo a una cierta lamina de agua, a los dos días después de haber saturado el suelo se pasó el tractor (John Deere 2300) en el primer bloque y se tomaron dos muestras a cada huella del mismo para hacerles la prueba de permeabilidad al aire. Este procedimiento se repitió a intervalos de 2, 4, 6, 8, 20 y 12 días después de haber saturado el suelo.

Los resultados obtenidos de esta evaluación fue que el suelo se comporta de manera igual en dos profundidades diferentes de 0-5 y de 15-20 cm respectivamente; la presión ejercida es la misma pero las humedades son diferentes; la profundidad de 0-5 cm se encuentra a una humedad de 10.15 % mientras que a una profundidad de 15-20 cm se encuentra a una humedad de 21.9 %. Esto explica el comportamiento del suelo ya que a una profundidad de 0-5 cm esta en contacto directo con los neumáticos del tractor aunque tenga un menor contenido de humedad comparado a la profundidad de 15-20 cm.

La segunda etapa consistió en preparar adecuadamente una parcela, posteriormente fue saturada de una cierta lámina de agua. Al segundo día de haber saturado el suelo, se tomó 48 muestras a una profundidad de 0 a 5 cm y llevados al laboratorio para hacerles las pruebas de compactación y de permeabilidad al aire. Para la

prueba de compactación, las muestras fueron comprimidas por medio de una prensa neumática, hasta alcanzar la presión deseada (400, 600, 800 y 1000 Kpa). Finalmente la permeabilidad al aire fue medida por medio de un permeámetro de aire, midiendo el tiempo en que tardó en recorrer cinco centímetros de la barra conductora y tomando la temperatura en ese momento.

El resultado obtenido de esta evaluación fue que de 400 kpa el límite superior de laborabilidad ( $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ) se encontró a una humedad de 25.9 % con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0.98$  lo que indica que trabajar a una humedad superior a la señalada se puede tener problema de compactación.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Laborabilidad del suelo

Klenin et al (1986), menciona que el suelo presenta condiciones laborables cuando su contenido de humedad gravimétrica se encuentra entre 40% y 60% de la humedad a capacidad de campo. Por otro lado Braunack y Mcphee (1991), encontraron que en un suelo arcilloso la mejor cama de siembra se obtuvo cuando la humedad gravimétrica fue del 86% de la humedad del límite inferior de plasticidad (LIP).

La preparación de la cama de siembra es una operación requerida, el suelo debe ser considerado laborable cuando las condiciones sean convenientes y debe estar en un estado friable sin riesgo a la compactación (Rounsevell y Jones, 1993).

La laborabilidad del suelo indica la condición de cuando las operaciones de labranza pueden ser ejecutadas para la preparación de la estructura y forma deseada de la superficie (Goense, 1987).

La laborabilidad se determina según la textura / estructura / consistencia del suelo. Varía de suelo a suelo, de máquina a máquina y de una operación a otra (Simalenga, 1992).

La humedad juega un papel fundamental en cuanto a la calidad de la labor y posibilidad de daño al suelo.

Cuando el suelo se encuentra seco se dice que está en consistencia “cementada”. A medida que el suelo se humedece adquiere consistencia “friable”, luego “plástica” y por último “líquida”.

La condición ideal para preparar el suelo es la “friable”, ya que las necesidades de potencia y la posibilidad de daño al suelo son mínimas.

Dentro del estado friable la masa del suelo tiene mayor resistencia que los terrones, lo que significa que una herramienta de labranza puede romper los terrones con poca fuerza al mismo tiempo que la resistencia al deslizamiento es baja, facilitando así un buen laboreo; el límite inferior de plasticidad (LIP) es el contenido de humedad máxima que le permite a un suelo para ser laborado con maquinaria (Ularte, et al., 1979).

En los límites Plástico (LP) y Líquido (LL), la resistencia de los terrones sigue bajando, el deslizamiento requiere mayor fuerza, probablemente las herramientas no alcanzan un restregamiento y existe el peligro de compactar y dañar la estructura del suelo.

## **1.2 Compactación del suelo**

Al hacer un análisis del perjuicio que significa realizar labores agrícolas en un rango de humedad no adecuado, se debe tener en cuenta lo siguiente: la forma de consistencia friable es la condición que debe poseer el suelo para la labranza; cuando se sobrepasa ese contenido óptimo de humedad, el suelo pierde sus condiciones naturales y puede adquirir una consistencia plástica o de amasamiento. Muy frecuentemente se realiza las labores fuera del rango de humedad lo que lleva a que el suelo se vaya compactando poco a poco con el paso de la maquinaria.

La compactación del suelo ocurre cuando es sobrepasada su capacidad de soporte y se genera un aumento de su densidad aparente, se redistribuye el volumen poroso, afectando su funcionalidad expresado por la capacidad de conducir agua y aire, incrementándose el riesgo de compactación (Hartge y Horn, 1991; Hillel, 1998).

### **1.3 Objetivos e hipótesis**

#### **Objetivo general:**

Validar con muestras tomadas en campo el límite superior de laborabilidad de un suelo, obtenido en laboratorio mediante la técnica de la permeabilidad al aire.

#### **Hipótesis:**

El límite superior de laborabilidad obtenido en laboratorio por el método de permeabilidad al aire es igual al contenido de humedad al que el suelo empieza a compactarse con el paso de maquinaria.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Límites de los estados de consistencia del suelo.

Los estudios de Atterberg, mostraron por primera vez que los suelos presentan en general diferentes estados de consistencia, los cuales dependen del nivel de humedad presente en los mismos (Gandoy Bernasconi, 1991).

Conforme el nivel de humedad crece, cada partícula del suelo se recubre con una película de agua absorbida cada vez más gruesa, produciendo así la aparición progresiva de los siguientes estados de consistencia: Con bajo contenido de humedad, el suelo es duro y muy coherente. Este estado se llama duro. Con mayor humedad las partículas retienen agua sobre sus superficies debilitándose la coherencia, produciéndose así friabilidad en la masa del suelo. El suelo presenta entonces el estado de consistencia blanda o friable, siendo este el rango de humedad óptimo para la mayoría de las operaciones de labranza.

A mayor aumento de la humedad en el suelo existe un “colchón” de agua entre las partículas minerales que forman los agregados por lo que estas, prácticamente pierden atracción entre ellas, esto es la cohesión molecular, este parámetro es función del número de películas de agua entre ellas y varía inversamente proporcional con el contenido de humedad, la tensión de las películas de agua entre las partículas coloidales que da a los suelos sus propiedades de cohesión permite que el suelo quede permanentemente moldeado en cualquier forma deseada; este intervalo de humedad corresponde al estado plástico del suelo y la cantidad de agua es el contenido de humedad con el que el suelo deja de ser friable pasando al estado plástico. En este estado de consistencia de los agregados tienen su más baja resistencia a la fuerza que ejercen los implementos sobre ellos por lo que pueden ser fácilmente destruidas en su tamaño y arreglo sea perder completamente la estructura

del suelo, hasta llegar al punto de compactación. Según el tipo de suelo, puede presentarse entre el estado plástico y el viscoso, una condición de suelo pegajoso, que es la propiedad de adherirse a diversos objetos (Baver, et. al 1972).

### LÍMITES DE LOS ESTADOS DE CONSISTENCIA DEL SUELO.

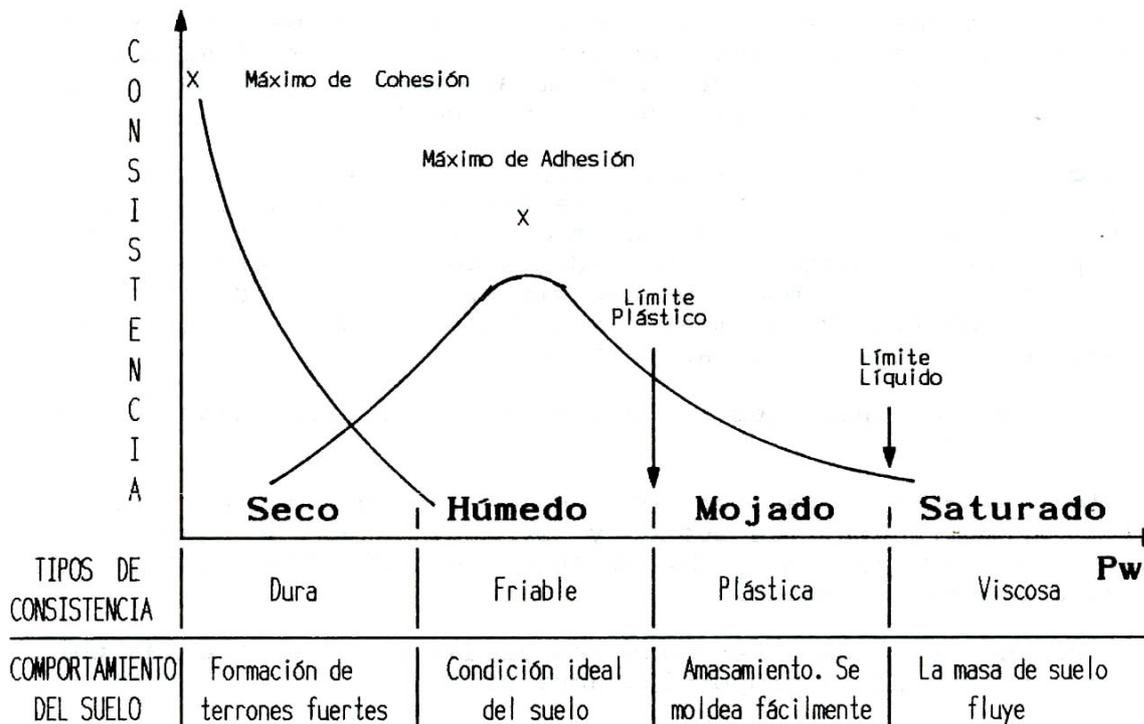


Figura 2.1: Variación de la Fuerza de cohesión y adhesión

#### 2.1.1 Límite de contracción

Se llama límite de contracción al contenido de humedad por debajo del cual el suelo ya no se contrae debido a la pérdida de agua por evaporación.

Entre las consistencias de cementado y friable se presenta el límite de contracción.

Este punto es alcanzable cuando al reducir el contenido de humedad a un nivel más bajo que este límite, se produce muy poca contracción es decir una vez drenado el

suelo hasta este punto la reducción posterior en volumen total del mismo es mínima así las partículas del suelo están prácticamente tocándose unidas muy fuertemente por las películas de agua (Ashburner y Sims 1984).

El límite de contracción (LC) y el límite inferior de plasticidad (LIP) es conocido en teoría como estado friable del suelo (Cadena, et al., 2002).

### **2.1.2 Límite plástico**

El límite inferior de plasticidad (LIP) marca la transición entre la consistencia plástica y la friable y es el contenido máximo de humedad, en el cual el suelo puede manejarse sin deteriorar sus propiedades físicas (Pla, 1976). Malagón, (1976) lo define al LIP como el momento cuando el contenido de humedad en el suelo permite que éste se deje amasar en cilindros de 3 a 4 mm de diámetro y de 5 a 6 cm de longitud, sin desmenuzarse.

El LIP es el contenido de humedad máxima que el permite a un suelo para ser laborado con maquinaria (Ularte, et al., 1979).

El suelo adquiere la capacidad de ser moldeado y mantiene su forma después que la presión deformable ha cesado, o representa el contenido de humedad máximo en el que un suelo se puede manejar sin deteriorar su estructura. El límite inferior de plasticidad representa el contenido de humedad en un suelo, por encima del cual es peligroso manipularlo con equipos de labranza y cultivo, ya que se pueden causar posibles efectos de compactación y sellado superficial. La ventaja principal de usar el concepto de límite plástico es la oportunidad de comprobar confiablemente el comportamiento del suelo en el campo. Sin embargo, este concepto tiene algunas desventajas. No es aplicable a los suelos carentes de cohesión y es difícil aplicarse si el límite plástico es pequeño (Dexter y Bird, 2001).

### **2.1.3 Límite líquido**

Se conoce también como el límite superior de plasticidad o límite de flujo.

El límite superior de plasticidad (LSP) es el contenido de humedad en el cual un suelo comienza a fluir bajo la acción de una fuerza aplicada (Malagón, 1976).

El límite superior de plasticidad está dado por la cantidad de agua que contiene un suelo en el momento en que comienza a comportarse como un fluido y deja de comportarse como una masa sólida (Gavande, 1973). Intervenirlo a esa humedad ocasiona rompimiento y cambios de la estructura del suelo de manera irreversible.

## **2.2 Investigaciones sobre laborabilidad del suelo**

Las decisiones de cuándo y cómo realizar las operaciones de labranza esta basado en criterios cualitativos, por lo que muchas veces se realiza en suelos que no están en humedades óptimas para ser laborados lo que lleva a un trabajo excesivo e innecesario, gasto de energía, tardanza operacional y un daño estructural al suelo exponiéndolo a compactación (Pineda et al., 1996).

La preparación de la cama de siembra es una operación requerida, el suelo se considera laborable cuando se encuentra en un estado friable sin riesgo a la compactación (Rounsevell y Jones, 1993).

La preparación de la cama de siembra comúnmente es realizada en condiciones sub óptimas, lo cual requiere al menos dos pasos de rastra para conseguir un suelo aceptable. Esto no solo conduce a un alto gasto de energía sino también deja al suelo propenso a erosión hídrica y eólica (Pineda et al., 1996).

En la evaluación del suelo, la laborabilidad es una cualidad del suelo que describe como este puede ser laborado fácilmente (FAO, 1983). Se determina según la textura / estructura / consistencia del suelo. La laborabilidad varía de suelo a suelo, de máquina a máquina y de una operación a otra (Simalenga, 1992). Esta variación es influenciada tanto por el contenido de agua transitorio como las características intrínsecas del suelo como la arcilla o la materia orgánica (Thomasson, 1982).

La información sobre los criterios de laborabilidad también carece para la planificación y la operación de opciones de cultivo para alcanzar los requerimientos oportunos (Moreno Rico et al., 1993).

Se han hecho pocas investigaciones sobre la laborabilidad del suelo en México; es un parámetro muy importante que se debe tomar en cuenta al introducir maquinaria agrícola a un suelo; a continuación se resumen algunas investigaciones realizadas:

Cadena Zapata, et. al (2002) realizaron estudios evaluando el rango de laborabilidad de los suelos en la zona tropical de Veracruz. Los experimentos se realizaron en dos tipos de suelos: en un suelo limoso y un suelo arcilloso. El rango laborable de los suelos en esta área fue cuantificado (al evaluar) en campo el efecto del implemento en la estructura del suelo y la energía específica aplicada por la combinación del tractor-implemento. Se hizo en un rango de contenido de humedad del suelo dentro y fuera del estado de consistencia friable, determinado por el límite de contracción (LC) y el límite plástico (LP).

A medida que el suelo se secaba, el efecto del implemento cambiaba de grado óptimo a sub-óptimo en el contenido de humedad arriba del límite de contracción, entonces el rango real laborable de campo era más pequeño que el estado teórico friable de los suelos.

Hoogmoed, et. al (2003) realizaron otro estudio en la zona tropical de Veracruz para determinar los rangos laborables del suelo. Este fue un trabajo de laboratorio, donde el límite seco de laborabilidad fue determinado mediante la prueba de la caída libre. Los resultados en términos de tensión de la humedad del suelo resultaron más bajos, comparables con los de campo. Para la determinación del límite superior de laborabilidad se realizó la prueba de permeabilidad al aire y una prueba de compresión. Ambas pruebas demostraron que los límites estaban muy cerca de los determinados en campo.

## **2.3 Compactación del suelo**

Para realizar sus actividades metabólicas la raíz requiere un ambiente físico-químico en el suelo que proporcione ciertos límites de temperatura del suelo, facilitando su crecimiento en el mismo y desde luego niveles adecuados de aire, agua y nutrientes en la zona radicular (Baver, Gardner 1972, Gavande 1982).

En la mayoría de los suelos la capacidad de abastecimiento de agua y oxígeno por el suelo es menor que los requisitos de los cultivos para un alto rendimiento (SEP, 1985) por lo que se busca promover un óptimo estado físico del suelo a través del manipuleo mecánico o labranza (Gavande 1982).

Cuando se realiza el acondicionamiento del suelo con cuidado y en condiciones adecuadas se producen buenos rendimientos de cultivo, también es conocido que en muchos lugares se están sobre cultivando los terrenos (Ashbuner, J. E. y Sims, B.G., 1984)

Muy frecuentemente al afectar las diferentes labores de labranza se esta poco a poco degradando el recurso suelo por compactación que no es más que:

- Un incremento de la densidad aparente del suelo.
- Un empaquetamiento de partículas más denso.
- Una disminución de la porosidad, especialmente en lo referente a macro poros (Glinski y Lipiec, 1990).

### **2.3.1 Origen de la compactación**

La compactación del suelo ocurre cuando es sobrepasada su capacidad de soporte y se genera un aumento de su densidad aparente, se redistribuye el volumen poroso, afectando su funcionalidad expresado por la capacidad de conducir agua y aire, incrementándose el riesgo de erosión hídrica (Hartge and Horn, 1991; Hillel, 1998).

La compactación del suelo corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él. Estas fuerzas externas, en la actividad agrícola, tienen su origen principalmente en:

- Implementos de labranza del suelo.
- Cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre.
- Pisoteo de animales (agroinformacion 2000).

### **2.3.2 Efectos de la compactación del suelo**

La compactación del suelo causa disminución de la macro porosidad y con ello afecta su capacidad de infiltración, lo cual dificulta la entrada y el flujo de agua y aire al interior del suelo, ocasionando un mayor escurrimiento superficial, y una menor capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del mismo (Lal & Greenland 1979; Leiva, 1998)

La compactación, y en especial las capas endurecidas y piso de arado, originan una barrera o impedimento mecánico para la penetración de la raíces, con ello disminuye su capacidad de exploración y extracción de agua y nutrientes. Por otra parte, la disminución de la macro porosidad restringe la aireación del suelo, limitando al sistema radical de las plantas. Finalmente, la pérdida de la estructura y compactación de los suelos afectan su calidad y, consecuentemente, los rendimientos de los cultivos (León-Arteta 2003).

### **2.3.3 Comportamiento mecánico del suelo en la compactación**

Según agroinformación (2000) el suelo presenta una resistencia a la deformación física, tanto a la compresión volumétrica como a la deformación lineal. Para un contenido de humedad dado, por lo general ambos tipos de resistencias a la deformación, aumenta la densidad aparente. Al aumentar el contenido de humedad un suelo será más susceptible a la deformación, de ahí la mayor vulnerabilidad a la compresión en suelos húmedos.

La resistencia del suelo a la deformación viene controlada por una serie de factores: distribución del tamaño de partículas, propiedades químicas y mineralógicas de arcillas, contenido y composición de la materia orgánica, contenido de agua.

La reordenación de partículas varía según se trate de suelos de textura poco uniforme o bien uniforme.

En el primer caso se puede llegar a un mayor grado de compactación al ser posible un mejor contacto entre partículas.

Las fuerzas aplicadas al suelo por un neumático dan lugar a modelos de distribución de presiones no uniformes, influenciados tanto por las condiciones del suelo como por las del neumático.

### **2.3.4 Prevención de la compactación del suelo**

La compactación del suelo es un fenómeno difícil de corregir y de un elevado costo. Por lo tanto, hay que tomar las medidas necesarias para que este fenómeno no ocurra.

Soane & van Ouwerkerk (1994) proponen el mínimo laboreo, ideal para prevenir y mejorar los suelos compactados. Es necesario pensar no solo en el corto plazo, sino además de solventar el problema de la compactación.

Agroinformación (2000) menciona los factores relacionados con la maquinaria, factores relacionados con el suelo y las medidas que pueden ayudar a evitar el problema de la compactación. A continuación se presentan los factores que van a incidir en el proceso de compactación del suelo y que deben tenerse en consideración al momento de comprar o arrendar maquinaria agrícola y al programar o realizar las labores agrícolas.

#### **2.3.4.1 Factores relacionados con la maquinaria**

- ***Peso de la maquinaria:*** A mayor peso de la maquinaria mayor posibilidad de compactar el suelo y mayor profundidad puede alcanzar la compactación.
- ***Distribución del peso de la maquinaria:*** Si el peso de la maquinaria es desuniforme, por ejemplo mayor peso en ruedas traseras, la presión ejercida por éstas sobre el suelo será mayor.

- **Ancho de los neumáticos:** Si el peso de la maquinaria se distribuye en un área mayor (neumáticos más anchos), la presión sobre el suelo será menor que en el caso de usar neumáticos más angostos.
- **Presión de inflado de los neumáticos:** Mientras más inflados los neumáticos, menor es el área del neumático que entra en contacto con el suelo y mayor es la presión sobre el suelo. Por lo tanto, se recomienda hacer las labores con presiones de inflada baja.
- **Patinaje de las ruedas:** En la medida que estos fenómenos se produzcan, el esfuerzo producido sobre el suelo es mayor. Se sugiere realizar el trabajo evitando el patinaje y zapateo de los neumáticos.
- **Velocidad de trabajo:** Cuando la presión sobre el suelo es mantenida por un mayor tiempo el fenómeno de compactación tiene una mayor posibilidad de producirse, por lo que sería adecuado realizar las labores a una velocidad lo más alta posible.
- **Número de pasadas de la maquinaria:** A mayor número de pasadas, mayor es la compactación que se produce en el suelo.
- **Profundidad de trabajo del implemento de laboreo de suelos:** El extremo inferior de cualquier implemento de laboreo de suelos va a ejercer un esfuerzo vertical sobre el suelo, por lo que mantener a una misma profundidad de laboreo va a producir la compactación del suelo bajo esta profundidad (pie de arado), por lo que es recomendable variar la profundidad de las labores.

#### 2.3.4.2 Factores relacionados con el suelo

- **Características físicas y propiedades mecánicas del suelo:** Textura, tipo y estabilidad de la estructura, densidad aparente, carga histórica, resistencia a la deformación.

- **Contenido de humedad del suelo:** A mayor contenido de humedad, el suelo puede deformarse y compactarse con menores presiones recibidas. Por lo tanto, las labores deben realizarse con el suelo lo más seco posible.

### 2.3.5 Medidas que pueden ayudar a evitar el problema de la compactación

#### 1. Incorporación de materia orgánica al suelo:

La materia orgánica incorporada al suelo actúa directa e indirectamente favoreciendo la formación y la estabilidad de la estructura del suelo, lo que puede ayudar a prevenir la compactación.

**2. Uso de cubiertas vegetales:** La penetración de las raíces y su posterior muerte producen poros continuos que ayudan al movimiento del aire y el agua en el suelo.

**3. Uso de camellones para la huella del tractor:** Al construir camellones para el paso de los neumáticos de la maquinaria se evita que el efecto de la compactación llegue a mayor profundidad.

**4. Ajustar maquinaria a una misma trocha:** Esta medida está orientada a reducir el área que es usada por la maquinaria, manteniendo una sola huella para el paso de las ruedas.

### 2.4 Métodos para estimar la permeabilidad al aire del suelo

El Cuerpo de Ingeniería del Ejército de los Estados Unidos (U.S Army Corps of Engineers, **USACE**), describe tres métodos para estimar la permeabilidad al aire de un suelo dado.

Los métodos que propone para estimar la permeabilidad al aire del suelo son: métodos indirectos, de laboratorio y métodos de campo.

#### 2.4.1 Método indirecto

La permeabilidad al aire puede ser estimada como una función de conductividad hidráulica saturada. La permeabilidad intrínseca puede ser obtenida de la definición de conductividad hidráulica saturada como:

$$k_i = \frac{K\nu}{\rho g}$$

Donde:

Ki = Permeabilidad intrínseca (m<sup>2</sup>)

K = Conductividad hidráulica saturada (m/s)

$\nu$  = Viscosidad dinámica del agua (gr/m-s)

$\rho$  = Densidad del agua (gr/cm<sup>3</sup>)

g = Constante de gravitación (m/s<sup>2</sup>)

## 2.4.2 Método de laboratorio

### 2.4.2.1 Distribución del tamaño del agregado

La permeabilidad al aire esta en función del radio medio del poro, se puede estimar muy aproximadamente a través del análisis del tamaño del agregado usando la siguiente relación:

$$K_i = 0.125r^2$$

Donde:

Ki = Permeabilidad intrínseca

r = Características del radio del poro, definido como:

$$r = c D_{15}$$

Donde:

$c$  = Constante empírica aproximadamente igual a 0.1 para arena y grava.

$D_{15}$  = Tamaño del agregado para el cual 15 % del peso de las partículas son pequeñas.

Obteniendo una ecuación final:

$$K = 1.25D_{15}^2$$

#### **2.4.2.2 Pruebas de la columna**

Consiste en que un permeámetro esta sujeto a un gradiente de presión y mediante esto se puede calcular la permeabilidad al aire.

Estos estudios se pueden limitar por dependencia de la escala, y así los resultados no se pueden extrapolar fácilmente a un diseño escala-campo. Realizadas en suelos de grano fino tales como estiércol y arcilla sugieren que es posible que circule poco o nada de aire. Sin embargo, los estudios de campo conducidos en estos tipos de suelo pueden revelar que la circulación de aire significativa puede ser alcanzada debido a los macro poros.

#### **2.4.3 Método de campo**

Dentro del método de campo están las pruebas de bomba neumáticas que ofrecen una alternativa a métodos indirectos y de laboratorio para calcular la permeabilidad al aire. Estas pruebas tienden a proporcionar las estimaciones más realistas de permeabilidad al aire y son capaces de caracterizar una parte más grande de la zona insaturada en cada posición de prueba. Un número de investigadores han desarrollado soluciones transitorias y fijas para el corriente de aire, que puede ser usado para el análisis de datos de prueba de bomba neumáticos.

### **2.5 Métodos aproximados para estimar el límite superior de laborabilidad del suelo**

#### **2.5.1 Método manual para calcular el límite inferior de plasticidad (LIP)**

El límite inferior de plasticidad determina la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de suelos de unos 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichos cilindros se desmoronen.

Se toman unos 20 gr de muestra de suelo a ensayar que pase por el tamiz 0.40 UNE 7050. Se amasa con agua destilada hasta formar con facilidad una bola, y se toma unos 15 gr como muestra para el ensayo.

Se moldea la mitad de la muestra en forma de elipsoide y, a continuación, se rueda entre los dedos de las manos y una superficie lisa, con la presión estrictamente necesaria para formar cilindros de 5 a 6 cms de longitud. El cilindro debe desmoronarse o romper con un diámetro de unos 3 mm. Si al llegar a los 3 mm el cilindro no se rompe se vuelve a hacer otro elipsoide y se repite la operación hasta que se desmorone a los 3 mm de diámetro. Si por el contrario, el cilindro se rompe antes de llegar a los 3 mm de diámetro deberá añadirse agua destilada a la muestra y repetir la operación hasta conseguir el resultado deseado (Montenegro, H. y Malagon D., 1990).

Para determinar el límite inferior de plasticidad se usa la siguiente fórmula:

$$LIP = ((P_{sh} - P_{ss}) / P_{ss}) * 100$$

Donde:

LIP = límite inferior de plasticidad (%)

P<sub>sh</sub> = Peso del suelo húmedo (g)

P<sub>ss</sub> = Peso del suelo seco (g).

### **2.5.2 Capacidad de campo**

Cuando se vacían todos los macro poros aún continúan llenos los poros capilares, se alcanza el punto denominado capacidad de campo. El agua contenida en el suelo entre su punto de saturación (tensión de 0 atm.) y la capacidad de campo (tensión de 1/3 atm.) se denomina agua gravitacional.

Luego que el suelo alcanza su capacidad de campo, el componente gravitacional deja de ser el factor principal del movimiento del. A medida que se extrae la humedad del suelo, disminuye el espesor de la película de agua alrededor de las partículas de suelo y aumenta su retención (Bidwell, R. G. S., 1979).

## **2.6 Método de la permeabilidad al aire para estimar el límite superior de laborabilidad**

El método de permeabilidad al aire esta basado principalmente en un permeámetro de aire, siguiendo el procedimiento que a continuación se describe.

Las muestras se preparan llenando completamente un cilindro de acero de 100 cm<sup>3</sup> puede ser suelo tamizado de 2.4 a 4.0 mm (una masa de aproximadamente 80 g) o bien suelo extraído con una barrena tipo extractor de núcleos tal y como se encuentra en campo. La muestra es comprimida gradualmente de arriba hacia abajo por medio de una prensa manual o automática, hasta alcanzar la presión deseada. La altura de la muestra después de la compresión se calcula midiendo la distancia de la parte de arriba del cilindro hasta el suelo comprimido con un micrómetro después de que el suelo rebote. Después de esto, la permeabilidad al aire es medida por medio de un permeámetro de aire (Perdok and Hendrikse, 1982).

Este método es mucho más confiable porque no aproxima los valores del limite superior de laborabilidad (LSL), sino que estima el área de poros en m<sup>2</sup> que el suelo tiene, tomando como límite máximo  $1 \times 10^{-12} \text{m}^2$ , mediante esto se puede establecer con mas precisión cuando debemos realizar las operaciones de labranza (Ríos Camey., 2004).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” que esta ubicada en la ex hacienda de Buenavista, localizada a 7 Km. al sur de la ciudad de Saltillo; en las coordenadas 100° 59' 57" longitud oeste y 25° 23' 42" latitud norte, a una altitud de 1743 msnm.

Este trabajo de investigación, se realizó en dos etapas que a continuación se describen:

#### 3.1 Etapa I: Muestras de campo después del paso de maquinaria

##### 3.1.1 Identificación de una textura de suelo

Para iniciar la investigación se identificó una textura de suelo de uso agrícola. El área donde se realizó el trabajo tiene una extensión de 15 x 6 m (Fig. 3.1)



Figura 3.1 Área donde se realizó la investigación

##### 3.1.2 Preparación del terreno y procesamiento de las muestras

Una vez identificado el suelo, se dividió en seis bloques iguales como se muestra en la figura 3.2 y posteriormente se saturó uniformemente con el fin de que la humedad

llegara a 20 cm. de profundidad. Al segundo día después de haber saturado el suelo se pasó el tractor John Deere 2300 (figura 3.3) en el primer bloque.



Figura 3.2 Parcela dividida en seis bloques.



Figura 3.3 Tractor JD 2300

Las características del tractor son las siguientes:

Fuente de potencia:

Tractor John Deere 2300 2WD, con una fuerza máxima de tiro de 45 kN, Motor 4 cilindros, Dirección hidrostática y TDF independiente con flecha de 6 estrías a 540 rpm, peso total en posición estática: 33.12 kN.

Después de haber pasado el tractor se tomaron dos muestras a cada huella del mismo de 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm de profundidad, utilizando la barrena tipo extractor de núcleos (figura 3.4) y colocados en cilindros de 100 cm<sup>3</sup> de volumen para ser llevados al laboratorio.

Este procedimiento se hizo para cada bloque, a intervalos de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 días después de haber saturado el suelo.



Figura 3.4 Barrena tipo extractor de núcleos

### 3.1.3 Contenido de humedad de las muestras

Las muestras fueron tomadas en campo y llevadas al laboratorio para determinar el contenido de humedad, fue calculado por medio del método gravimétrico, por lo tanto las muestras se pesaron con la balanza de precisión a 0.1 gr (Figura 3.5) obteniendo así el peso del suelo húmedo (Psh). Para obtener el peso del suelo seco (Pss) se colocaron a la estufa de secado (figura 3.6) a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, una vez transcurrido el tiempo se retiraron de la estufa y fueron pesadas nuevamente para obtener el peso del suelo seco.



Figura 3.5 Balanza de precisión



Figura 3.6 Estufa de Secado

Para determinar el contenido de humedad se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%H = \frac{psh - pss}{pss} \times 100$$

Donde:

%H = Porcentaje de humedad.

Psh = Peso del suelo húmedo.

Pss = Peso del suelo seco.

### 3.1.4 Permeabilidad al aire de las muestras

Cada muestra fue colocada en el permeámetro de aire (Figura 3.7), se midió el tiempo que tardó el flotador en recorrer cinco centímetros de la barra conductora, así mismo se tomo la temperatura ambiente en ese momento.

La permeabilidad al aire fue calculada por medio de la fórmula, Knoch (1962):

$$Ka = \frac{V}{n L t} A^{-1} P^{-1}$$

Donde:

Ka = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire en m<sup>2</sup>

V = Volumen de aire del flotador en m<sup>3</sup>

na = Viscosidad dinámica del aire en Pa \* s

L = Longitud de la muestra del cilindro en m.

t = Tiempo que tardó el flotador en recorrer 5 cm en seg.

A = Área de la sección transversal de la muestra (cilindro) en m<sup>2</sup>

P = Presión del aire del flotador en N/m<sup>2</sup>

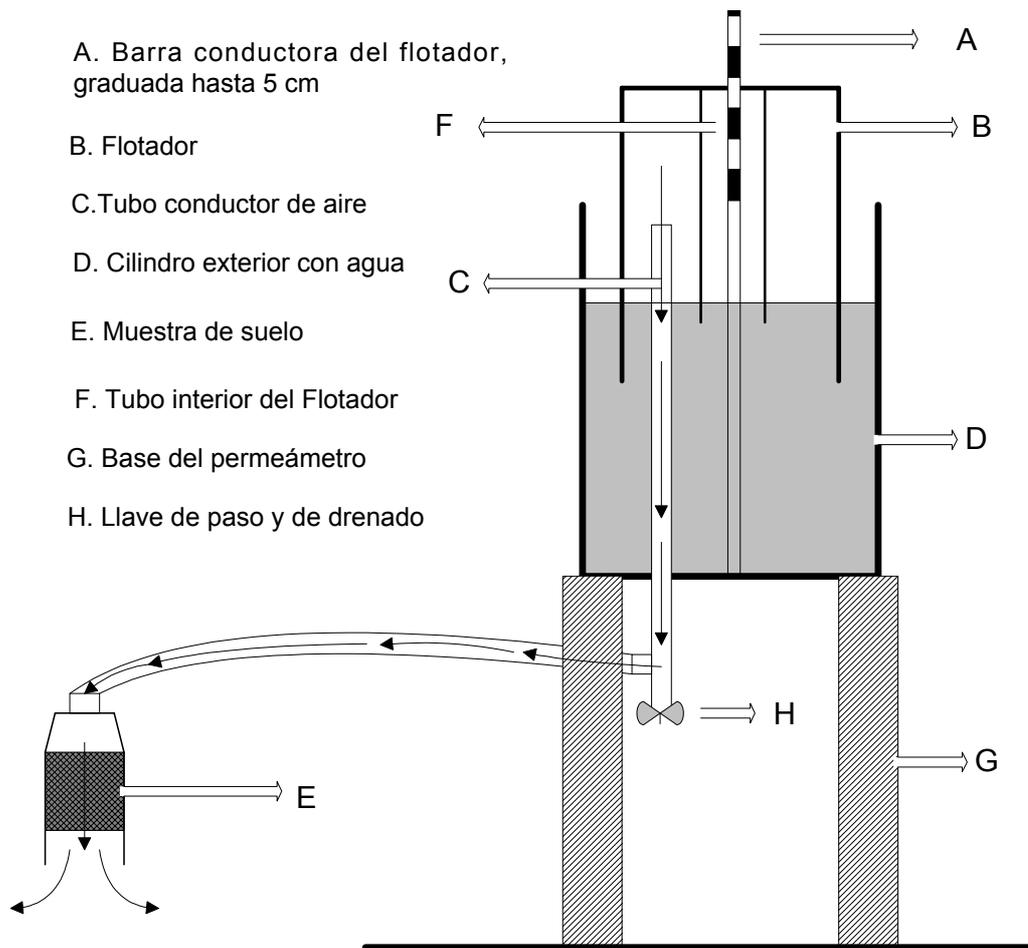


Figura. 3.7 Permeámetro de aire y descripción de sus partes

### 3.1.5 Densidad aparente de las muestras

Una vez obtenido los datos: porcentaje de humedad, peso del suelo húmedo y peso del suelo seco se procedió a calcular la densidad aparente de cada muestra.

Para determinar la densidad aparente se utilizó la siguiente fórmula:

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_t}$$

Donde:

Da = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

Pss = Peso del suelo seco (gr)

Vt = Volumen total de suelo (cm<sup>3</sup>)

### 3.1.6 Porosidad del suelo

Para obtener el porcentaje de porosidad se necesita conocer la densidad real para este caso se tomó como constante con un valor de 2.65 gr/cm<sup>3</sup>.

Para calcular el porcentaje de porosidad se usó la siguiente fórmula:

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

Donde:

f = Espacio poroso (%).

Da = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

Dr = Densidad real (igual a 2.65 gr/cm<sup>3</sup>)

## 3.2 Etapa II: Muestras de campo y compactadas en laboratorio

### 3.2.1 Identificación de una textura de suelo

Dentro del campo experimental se identificó una textura de suelo de uso agrícola. El área donde se realizó la investigación tiene una extensión de 6 m<sup>2</sup> (Fig. 3.8).



Figura 3.8 Área donde se realizó el trabajo de investigación.

### 3.2.2 Preparación del terreno y procesamiento de las muestras

El área donde se realizó la investigación fue preparada adecuadamente formando bordos a cada uno de sus lados extremos, para posteriormente ser saturado con una cierta lámina de agua. Se dejó reposar durante dos días con el propósito que el agua se infiltrara hasta 20 centímetros de profundidad. Al segundo día de haber saturado el suelo, se tomaron 48 muestras (Figura 3.9) y se llevaron al laboratorio para hacerles las pruebas de compactación y de permeabilidad al aire.

Las muestras fueron extraídas con las barrenas especiales a una sola profundidad, de 0 a 5 centímetros y colocadas en cilindros de 100 cm<sup>3</sup> de volumen. Para esto se tuvo que conocer el peso de los cilindros y los capacillos donde fueron colocadas las muestras.



Figura 3.9 Muestras tomadas en campo

### 3.2.3 Contenido de humedad de las muestras

Después de haber tomado las 48 muestras en campo, fueron llevadas al laboratorio para determinar el contenido de humedad; fue calculado por medio del método gravimétrico, por lo tanto se pesaron las muestras con la balanza de precisión, obteniendo así el peso del suelo húmedo (Psh). Se realizaron las pruebas de

compactación y de permeabilidad al aire antes de poner el suelo a la estufa de secado a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, una vez transcurrido el tiempo se retiraron de la estufa y fueron pesadas nuevamente para obtener el peso del suelo seco.

Para determinar el contenido de humedad se utilizó el mismo procedimiento descrito en el apartado 3.1.4.

### 3.2.4 Compactación de las muestras

El mismo día en que se tomaron las muestras, fueron llevadas a la prensa neumática (figura 3.10), para cada presión a la que fue calibrada la prensa (400, 600, 800 y 1000 kpa), fue puesta dos muestras para obtener diferentes grados de compactación. Este procedimiento se repitió a intervalos de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 días después de haber saturado el suelo.



Figura 3.10 Prensa neumática simuladora de compactación.

El equipo consiste en un compresor de medio caballo de fuerza (38.02 kgf-m/s) que alimenta a la prensa, el aire pasa por dos reguladores de presión. El primero regula a 70 lb mientras que el segundo hace el ajuste más fino de la presión requerida con la cual trabajará la prensa (Figura 3.11).

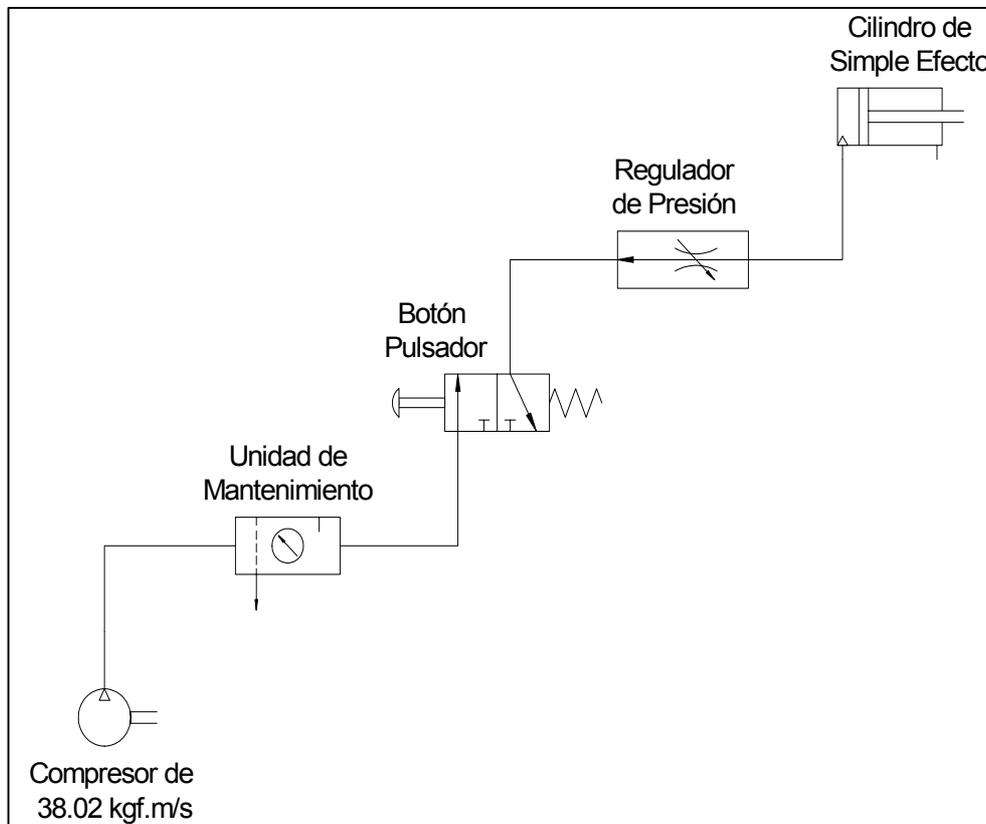


Figura 3.11 Diagrama del simulador de compactación neumático alimentado por un compresor.

### 3.2.5 Permeabilidad al aire de las muestras

La muestra, previamente compactada fue llevada al permeámetro de aire, para esto se midió el tiempo que tardó el flotador en recorrer cinco centímetros de la barra conductora, así mismo se tomo la temperatura ambiente en ese momento.

Para calcular la permeabilidad al aire se necesita conocer la longitud de la muestra comprimida, para esto se midió la distancia de la parte de arriba del cilindro hasta el suelo comprimido por medio de un vernier (figura 3.12).

La permeabilidad al aire fue calculada con el mismo procedimiento descrito en el apartado 3.1.5.



Figura 3.12 Vernier

### **3.2.6 Densidad aparente de las muestras**

Al igual que en el procedimiento de campo, al obtener los resultados del contenido de humedad, peso del suelo húmedo y peso del suelo seco se procedió a calcular las densidades de cada muestra.

Para obtener el volumen de suelo seco ( $V_{ss}$ ) se utilizó el dato de la altura de compresión medida por el micrómetro,

La densidad aparente fue calculada con el mismo procedimiento descrito en el apartado 3.1.6

### **3.2.7 Porosidad del suelo**

Para calcular el porcentaje de porosidad se utilizó el procedimiento descrito en el apartado 3.1.7

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Etapa I: Muestras de campo después del paso de maquinaria

#### 4.1.1 Características del sitio experimental

Los resultados del suelo (Fig. 4.1) bajo estudio, muestran que contiene 32.5 % de arena, 33.4 % de limo y 34.1 % de arcilla. De acuerdo al triángulo de texturas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) corresponde a un suelo **migajón-arcilloso** con 2.09 % de materia orgánica, por lo que se considera medianamente rico, en este aspecto.



Figura. 4.1 Suelo de textura migajón-arcilloso

#### 4.1.2 Comportamiento de la permeabilidad al aire en relación con la humedad

En la figura 4.2 se muestra la relación entre la humedad y permeabilidad al aire.

Los datos se ajustaron a una curva de primer orden (una recta).

En la gráfica se observa que el suelo se comporta de manera igual en dos profundidades diferentes de 0-5 y de 15-20 cm respectivamente.

La presión ejercida es la misma pero las humedades son diferentes; la profundidad de 0-5 cm se encuentra a una humedad de 10.15 hasta 19% aproximadamente, mientras que a una profundidad de 15-20 cm se encuentra a una humedad de 21.9 hasta 25.3% aproximadamente.

Esto explica el comportamiento del suelo en relación al valor de permeabilidad al aire ya que a una profundidad de 0-5 cm esta más en contacto directo con los neumáticos del tractor por lo que aunque tenga un menor contenido de humedad comparado a la profundidad de 15-20 cm tiene prácticamente el mismo valor de permeabilidad, es decir se da la misma compactación.

La tendencia de la grafica indica que a mayor contenido de humedad, la permeabilidad al aire disminuy

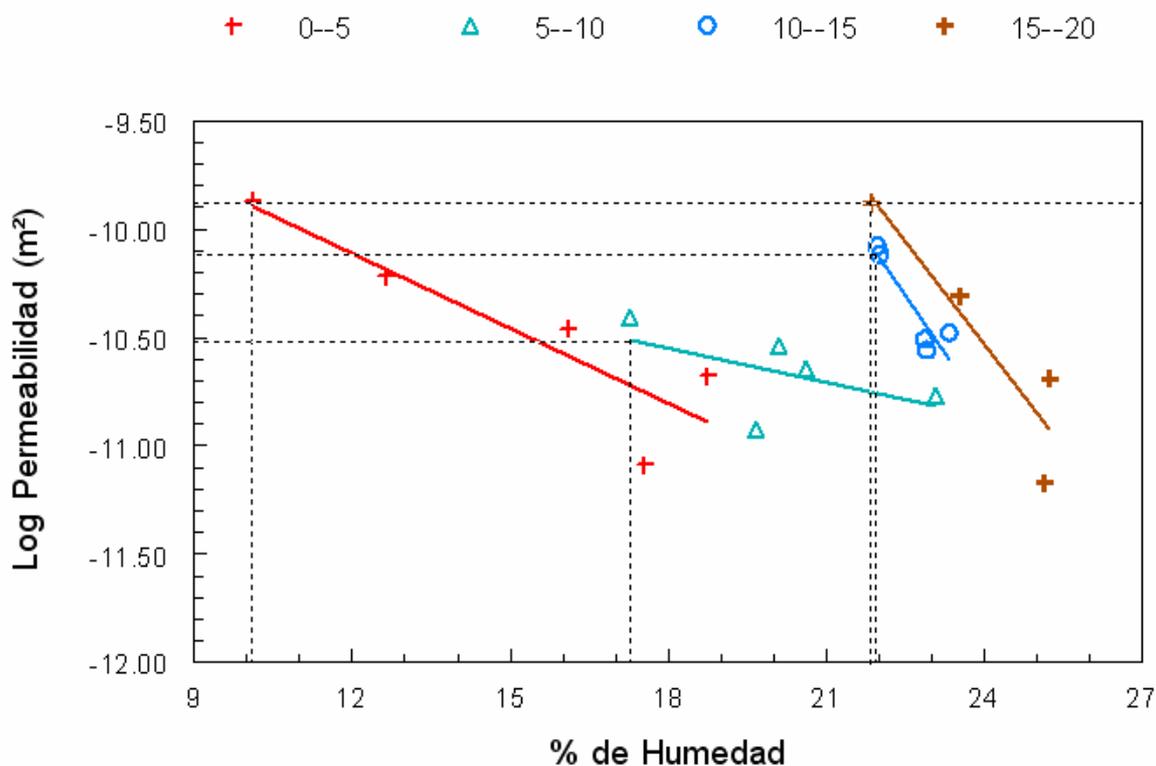


Figura 4.2 Limite superior de laborabilidad.

### 4.1.3 Relación entre los cambios de densidad aparente con el contenido de humedad

En la figura 4.3 se muestra el comportamiento de la densidad aparente con respecto al contenido de humedad del suelo.

Los datos fueron ajustados a una curva de primer orden (una recta). En la gráfica se observa que a una profundidad de 0 a 5 cm tiene un rango de 9 a 18 % en contenido de humedad aproximadamente, por lo que no afecta significativamente a la densidad aparente del suelo con el paso de maquinaria.

Para una profundidad de 5 a 10 cm corresponde una humedad de 17.2 a 23 % aproximadamente; al pasar el tractor, aumentó la densidad aparente de 1.12 a 1.18  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

La grafica indica la tendencia de las cuatro profundidades que a mayor contenido de humedad, la densidad aparente tiende a aumentar su valor.

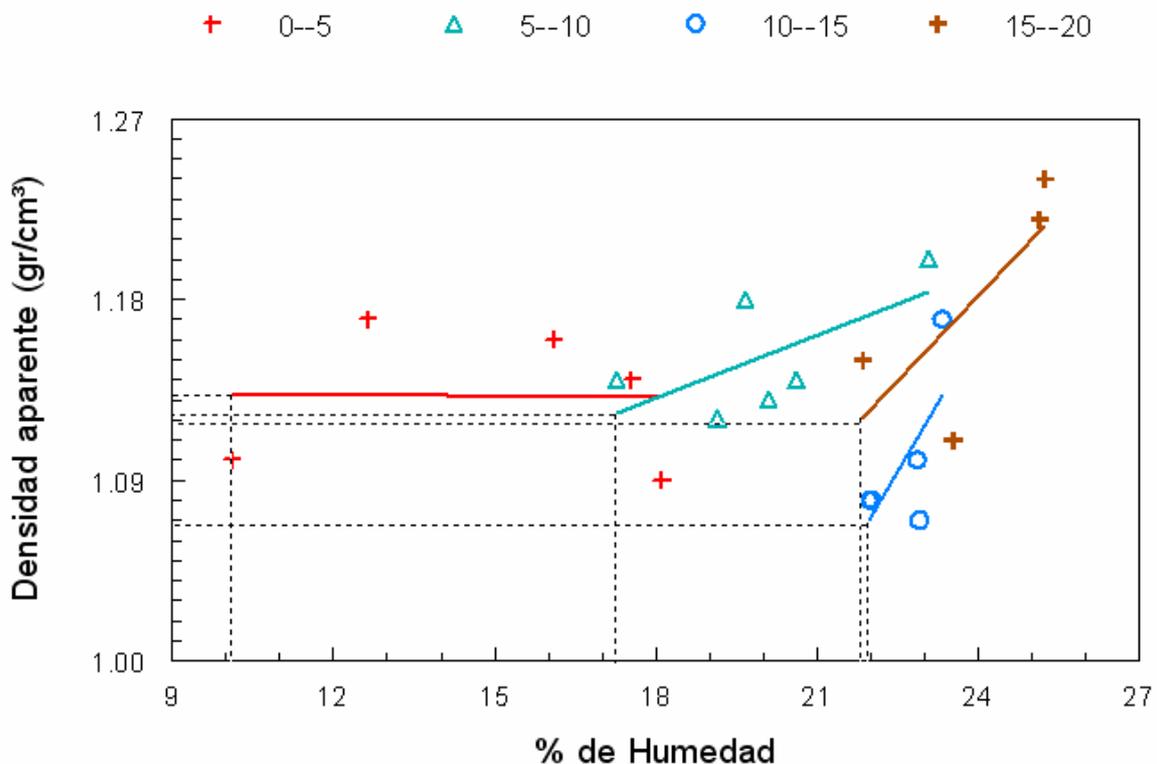


Figura 4.3 Relación entre el contenido de humedad y densidad aparente

#### 4.1.4 Comportamiento de la porosidad después de la compactación relacionada con la humedad

En la figura 4.4 ilustra el comportamiento de la porosidad con respecto al contenido de humedad.

Los datos fueron ajustados a una curva de primer orden (una recta).

La grafica de la profundidad de 0 a 5 cm indica que el espacio poroso no se vió afectado significativamente debido a la poca humedad que presentó el suelo. A mayor profundidad se encuentra mayor contenido de humedad como indica la grafica de 5 a 10 cm que a una humedad de 17.2 % presenta 56.95 % de espacio poroso aproximadamente, conforme aumentó el contenido de humedad disminuyó la porosidad del suelo hasta llegar a 54.3 % aproximadamente.

A diferencia de la densidad aparente, la porosidad disminuye conforme aumenta el contenido de humedad como se observa en la grafica.

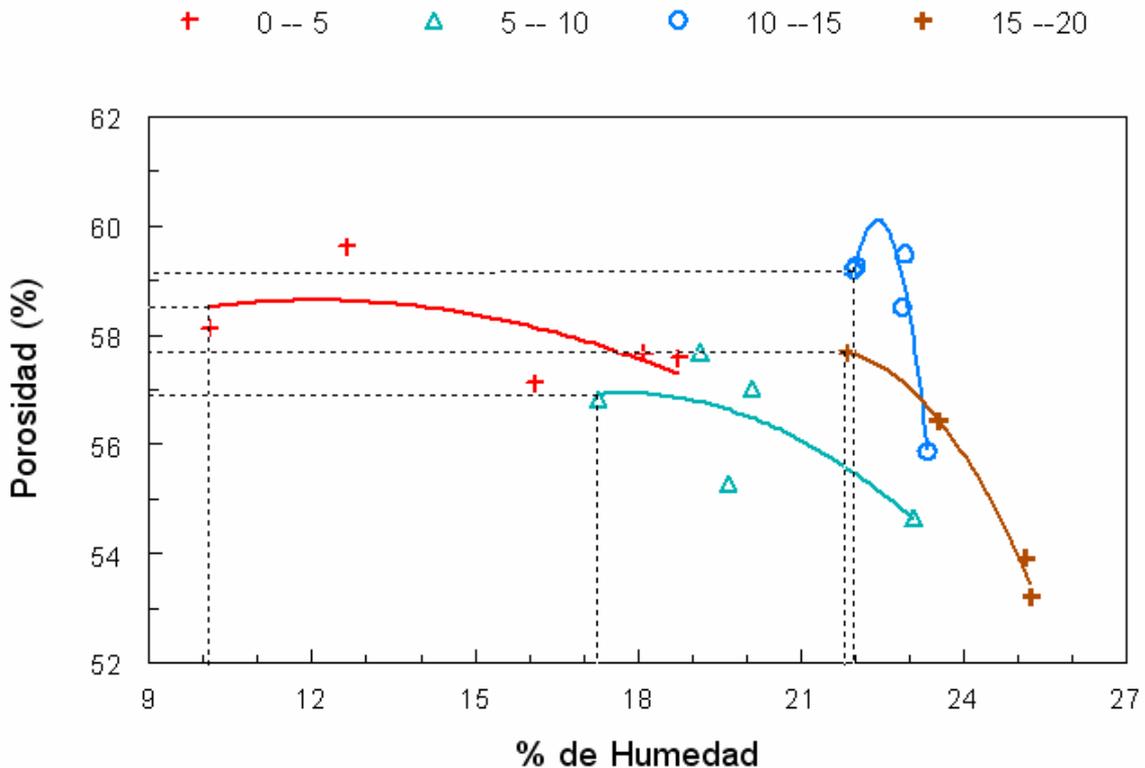


Figura 4.4 Relación entre el contenido de humedad y la porosidad

## **4.2 Etapa II: Muestras de campo y compactadas en laboratorio**

### **4.2.1 Comportamiento de la permeabilidad al aire en relación con la humedad**

En la figura 4.5 se muestra la relación entre la humedad y la permeabilidad al aire.

La prueba de compactación se hizo a cuatro diferentes presiones; en el resultado de la grafica se observa que a medida que va aumentando la humedad va disminuyendo la permeabilidad al aire hasta llegar al valor límite que es  $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ , de esta manera se puede predecir a que humedad se encuentra el límite superior de laborabilidad.

Los datos que se sometieron a 400 kpa se ajustaron a un polinomio de segundo orden con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0.98$ . Este valor nos indica que existe buena relación entre las variables estudiadas y se pueden hacer predicciones con precisión. El límite superior de laborabilidad (LSL) para dicha presión se encontró a una humedad de 25.9 % , con este dato se puede afirmar que este suelo se puede laborar por debajo de este valor, de lo contrario tendremos problemas de compactación.

Al trabajar con presiones mas altas el valor límite máximo de la humedad es mas próximo como se observa en la grafica que para una presión de 800 Kpa el límite superior de laborabilidad se encuentra a un contenido de humedad de 24.2 %, finalmente para una presión de 1000 Kpa, la humedad máxima a la que puede ser laborado este suelo es a 23.4%.

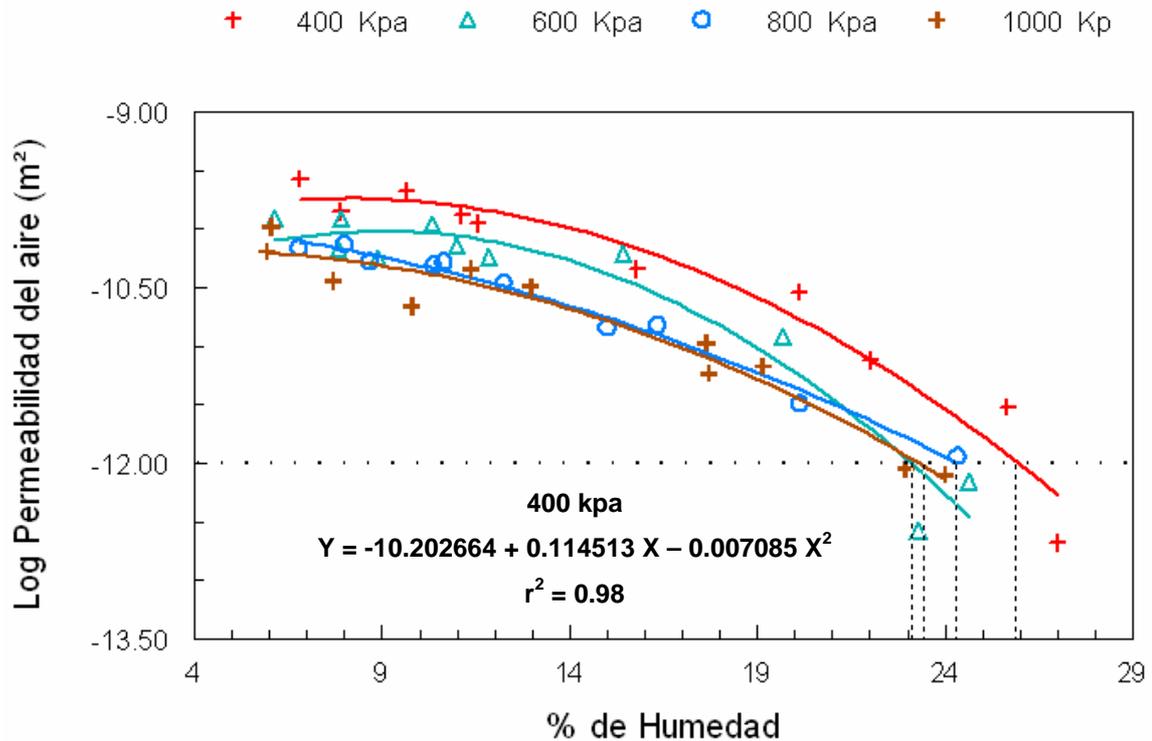


Figura 4.5 Limite superior de laborabilidad

En la grafica se observa que a mayor contenido de humedad, la permeabilidad al aire tiende a disminuir.

#### 4.2.2 Relación entre los cambios de densidad aparente con el contenido de humedad

Los datos de densidad aparente de la figura 4.6, fueron ajustados a un polinomio de tercer orden. Para encontrar el valor de la densidad aparente se debe tomar como referencia el valor del contenido de humedad que se obtuvo en la relación entre el contenido de humedad y la permeabilidad del aire (25.9 % de humedad).

Para la presión de 400 Kpa se puede observar como fue aumentando el valor de densidad aparente conforme fue aumentando el porcentaje de humedad del suelo hasta encontrar el valor de densidad aparente entre 1.32 y 1.34 gr/cm<sup>3</sup> aproximadamente con respecto al contenido de humedad al que puede ser trabajado este tipo de suelo (25.9 % de humedad).

Sabiendo que el límite superior de laborabilidad para una presión de 800 Kpa se encuentra a 24.2 % del contenido de humedad, podemos decir que el valor de densidad aparente esta en 1.42 gr/cm<sup>3</sup>.

Si se pretende trabajar a una presión de 1000 Kpa, sabiendo que el límite superior de laborabilidad se encuentra a 23.4 % de humedad, se encontrara un valor de densidad aparente entre 1.48 y 1.50 gr/cm<sup>3</sup>.

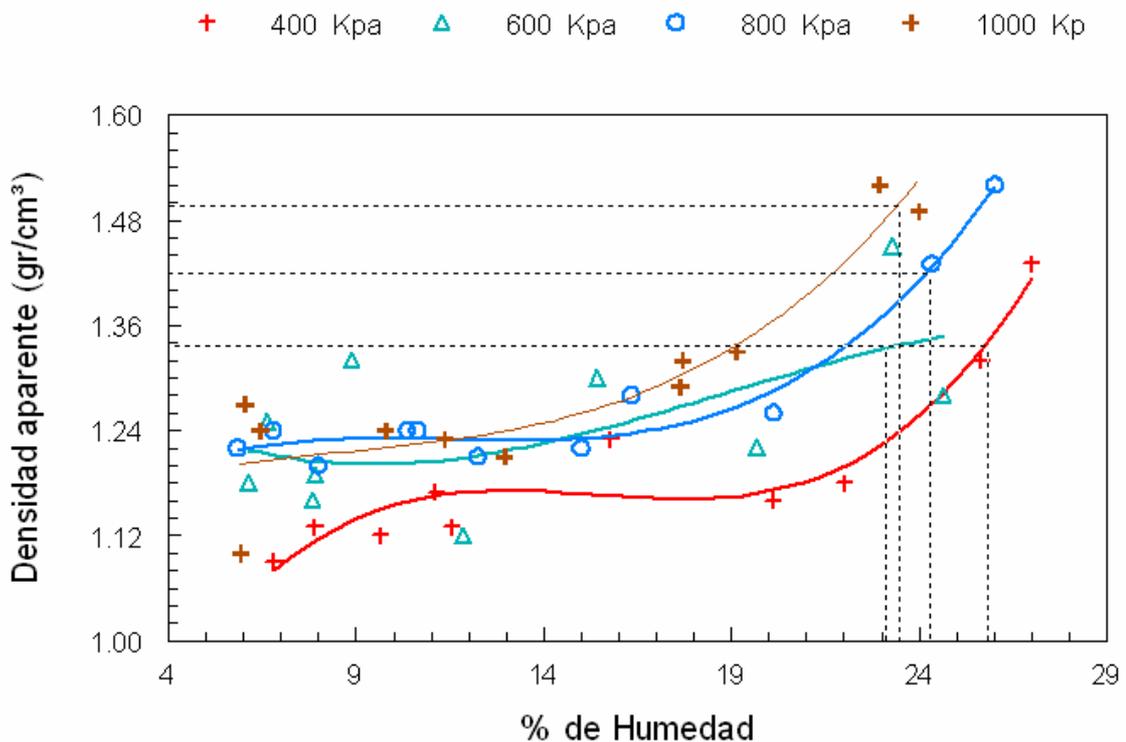


Figura 4.6 Relación entre el contenido de humedad y densidad aparente

#### 4.2.3 Comportamiento de la porosidad después de la compactación relacionada con la humedad

Los datos de la figura 4.6 fueron ajustados a un polinomio de segundo orden.

Al observar la grafica se puede ver claramente que a un mismo contenido de humedad pero a diferente presión, el comportamiento del porcentaje de porosidad es diferente.

Para una presión de 400 Kpa a la humedad máxima a la que puede ser trabajado este tipo de suelo (25.9 % de humedad) se encuentra el valor entre 49 y 50 % de espacio poroso.

Si se trabaja a una presión de 1000 Kpa, tomando como límite superior de laborabilidad el contenido de humedad de 23.4 %, el espacio poroso para esta presión estará entre 43 y 44 %.

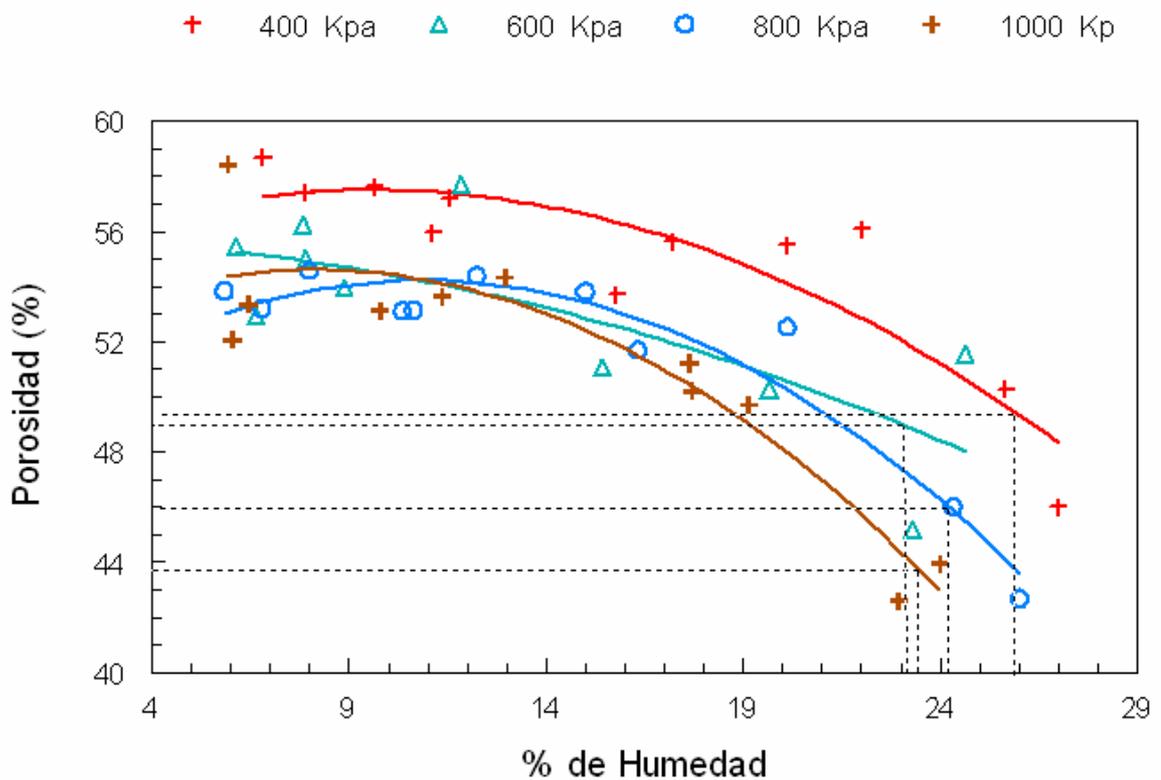


Figura 4.7 Relación entre el contenido de humedad y la porosidad

Se han hecho investigaciones y se ha llegado a la conclusión que a un cierto contenido de humedad y al ser sometido el suelo a cualquier presión tiende a subir nuevamente su porcentaje de porosidad, esto se debe a que los pocos poros se encuentran llenos de agua, por lo que esta no se puede comprimir totalmente lo que hace que ejerzan una reacción igual a la presión que esta siendo sometida.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Con base a los resultados obtenidos entre la humedad y permeabilidad al aire medida con muestras compactadas en campo con el paso de maquinaria, se puede concluir que la estimación del límite superior de laborabilidad por el método de permeabilidad es una opción adecuada ya que la tendencia de las graficas es que el limite superior de laborabilidad tomado como permeabilidad al aire de  $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  para el suelo bajo estudio estará entre 26 y 27 % de humedad en base a peso.
- En relación a las muestras de campo y compactadas en laboratorio, para la determinación de la permeabilidad al aire se obtuvo un coeficiente de determinación  $r^2 = 0.98$  para una presión de 400 kPa considerada en otros estudios como la presión que puede ejercer la maquinaria, el valor de humedad a la cual se alcanzó  $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  de permeabilidad fue de 25.9% lo que da un valor muy cercano al obtenido con las muestras compactadas directamente en campo con el tractor.
- En relación al valor de humedad (20.67% en base a peso) al cual se alcanzó el valor de  $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  de permeabilidad con 400 kPa en un estudio anterior con muestras disturbadas de un suelo con textura prácticamente igual, resultó diferente al contenido de humedad (25.9% en base a peso) para la misma presión pero con muestras sin disturbar tomadas en campo.

## **Recomendaciones**

- Es recomendable realizar más estudios de permeabilidad al aire con muestras obtenidas en campo (muestras no disturbadas) para complementar esta investigación, además de obtener un banco de información disponible para hacer recomendaciones a los productores.
- Se sugiere obtener el rango laborable para este tipo de suelo, ya que lo que se obtuvo es el límite superior de laborabilidad a la que puede ser laborado este suelo, faltaría determinar el límite mínimo de laborabilidad.
- Se recomienda hacer más investigaciones del rango laborable con este tipo de suelo para validar los valores obtenidos.

## VI. LITERATURA CITADA

**Agroinfomacion, (2000).** “La compactación del suelo” (documento web), [http://www.abcagro.com/riego/compactacion\\_suelos.asp](http://www.abcagro.com/riego/compactacion_suelos.asp) (consultado el 03 de Febrero 2007).

**Ashbuner, J. E. Y Sims, B:G: 1984.** Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura, San José, Costa Rica, 473 pp.

**Baver, L. D., Gardner W. H. and Gardner W. R.. 1972.** Soil Physics. John Wilwy & Sons, New York. Fourth Edition. 489 pp.

**Bidwell, R.G.S., 1979.** Plant Physiology. New York: MacMillan Publishing Co. Inc. pp 247-50.

**Braunack M. V. and J. E. McPhee., 1991:** “The effect of initial soil water content and tillage implement on seedbed formation”, *Soil & Tillage Research*, 20, pp. 5-17.

**Cadena Zapata, M., Hoogmoed, W: B., Perdok, U: D: (2002).** Field studies to asses the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, México. *Soil and Tillage research* pp. 68, 83-92.

**Dexter A.R. and Bird N.R.A. 2001.** Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research* 57, 203-212.

- Ellies, A. 1995.** Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque (Chile)* 16 (2) : 101-110.
- FAO, 1983.** Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture. Rome, FAO Soils Bulletin 52.
- Gandoy Bernasconi (1991).** Manual de laborabilidad para el manejo físico de suelos: limites de Atterberg. 1ª edición depto. De publicaciones de la dirección de difusión cultural de la UACH. Pp 123-129.
- Gavande, S. 1973.** Física de suelos. Principios y aplicaciones. México. Ed Limusa-Willey S.A. 351 p.
- Gavande Sampat, A., 1982.** Física de suelos. Principios y aplicaciones. Limusa. Composición mecánica del suelo pp 34-38  
Textura del suelo
- Glinsky J. y J. Lipiec. 1990.** Compaction as a factor of soil degradation. In: Transactions. of 14<sup>th</sup> International Con-gress of Soil Science. Kyoto. Japan Vol. I. pp. 101-106.
- Goense, D., 1987.** mechanized farming in the humid tropics with special reference to soil tillage, workability and time liness of farm operations. A case study for the Zanderij area of Suriname. PhD Thesis Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Harte, K.H., Horn, R. 1991.** Einführung in die Bodenphysik, 2., überarbeitete Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, Germany. 303 p.
- Hilliel, D. 1998.** Environmental soil physics. Academic Press, San Diego, CA. 771 p.

- Hoogmoed, W: B., Cadena Zapata, M., Perdok, U. D. (2003)** Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. Soil and Tillage research. pp 74, 169-178
- Horn, R. 2002.** stress strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. 17th World congress of soil science, 14-21 August 2002, Bangkok, Thailand.
- Klenin, N. I., 1986:** Agricultural machines: Theory of operation, computation of controlling parameters and the conditions of operation, pp.9-60, Ed. A.A. Balkema/Rotterdam, USSR.
- Lal RJ, Greeland DJ (1979)** Soil physical properties and crop production in the tropics. John Wiley & Sons Ltd. 545 pp.
- Leiva FR (1998)** Sostenibilidad de sistemas agrícolas. Agronomía Colombiana. Vol. XV No. 2: 181-193.
- León-Arteta R (2003)** Manual edafológico de campo. 2a. Ed. Textos Universitarios, Universidad Veracruzana. México. 205 pp.
- Malagon, D. 1976.** Física de suelos. Bogotá, Cali, Col.IGAC. 622 p.
- Montenegro, H. y Malagon D., 1990.** Propiedades físicas de los suelos. Bogotá, Col. IGAC. 813 p.
- Moreno Rico, D., Cadena Zapata, M., Jacome Maldonado, S., 1993.** Proyecto para un centro nacional de prueba y evaluación de maquinaria agrícola. SARH. INIFAP, campo Experimental Cotaxtla, 25 pp.

- Perdok U. D., Hendrikse L. M., 1982.** Workability test procedure for arable land. Proceedings of the Ninth International Conference on ISTRO, Osijek, Yugoslavia, June 21-25, 1982, pp. 511-519
- Pineda, M.T., Ramirez, A.J.M., Chavez, A.N., Fagundo, G.P., 1996.** Efecto del contenido de humedad sobre operaciones de labranza. Revista Chapingo 1996. Ingeniería Agrícola 3, pp. 91-96.
- Pla, I. 1976.** Conservación de aguas y tierras. Relaciones suelo-agua. Mérida, Ven. CIDIAT. 25 p.
- Rios Camey M. S.** Determinación del límite superior de laborabilidad de dos texturas del suelo del DDR de Saltillo basado en el método de la permeabilidad al aire. Tesis Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, 2004. pp 17
- Rounsevell, M. D. A. and R. J. A. Jones, 1993.** A soil and agroclimatic model for estimating machinery work-days: the basic model and climatic sensitivity. Soil tillage Res., 26: 179-191.
- Simalenga, T. E. y H. Have. 1992.** Estimation of soil tillage workdays in a semi-arid area. Journal of Agric. Eng. Res. 51: 81-89.
- Soane, D. B. and Van Ouwerkerk, c. (1994)** Soil compaction problems in world agriculture. In soil compaction in crop production, pp. 1-21. Eds B.D.
- Thomasson, A. J., 1982.** Soil and climatic aspects of workability and trafficability. Proceeding of the 9<sup>th</sup> Int Conf. ISTRO, Osijek, Yugoslavia. Pp. 551-557
- U. S. Army Corps of Engineers, 2002,** Apendice D. (Documento web), <http://www.usace.army.mil/net/usace-docs/eng/manuals/em1110-1-4001/a-d.pdf> (consultada el 22 de febrero de 2007)

# **VII. ANEXOS**

## **ANEXO I**

**Resultados obtenidos de permeabilidad al aire, densidad aparente y porosidad del suelo con muestras de campo después del paso de maquinaria.**

## Resultados de permeabilidad al aire.

Tabla 1.1  
Primer bloque

0 – 5 cm		5 – 10 cm		10 –15 cm		15 –20 cm	
Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )	Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )	Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )	Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )
136 K	7.63E-12	314 K	2.35E-11	155 K	5.75E-12	79 K	7.07E-12
282 K	1.29E-11	300 K	5.63E-12	75 K	8.24E-12	153 K	5.18E-12
77 K	7.35E-12	62 K	3.18E-11	317 K	3.12E-12	68 K	4.48E-12
309 K	4.31E-12	44 K	6.44E-12	65 K	1.29E-11	55 K	1.02E-11

Tabla 1.2  
Segundo bloque

0 -- 5 cm		5 – 10 cm		10 –15 cm		15 –20 cm	
Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )						
68 K	2.02E-11	63 K	1.12E-11	305 K	6.65E-11	300 K	6.04E-11
74 K	9.86E-12	58 K	2.84E-11	156 K	3.34E-11	153 K	1.39E-11
41 K	2.22E-11	62 K	2.73E-12	147	4.70E-12	295 K	3.47E-12
49 K	3.18E-11	77 K	5.03E-12	317 K	2.71E-11	282 K	3.85E-12

Tabla 1.3  
Tercer bloque

0 -- 5 cm		5 – 10 cm		10 –15 cm		15 –20 cm	
Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )						
75 K	1.54E-11	127	1.32E-11	285 K	2.23E-11	129 K	1.80E-11
46 K	2.27E-10	303 K	4.18E-11	302 K	2.23E-11	300 K	6.03E-11
60 K	1.22E-11	307 K	5.21E-11	298 K	7.18E-11	157 K	1.67E-11
66 K	3.37E-11	306 K	7.84E-12	291 K	7.54E-12	48 K	1.06E-11

Tabla 1.4  
Cuarto bloque

0 -- 5 cm		5 – 10 cm		10 –15 cm		15 –20 cm	
Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )						
150 K	4.91E-11	149 K	2.64E-11	151	1.65E-11	78 K	1.31E-10
128 K	2.44E-11	52 K	1.23E-11	130 K	1.45E-11	283 K	2.86E-11
61 K	3.70E-11	297 K	1.34E-11	138 K	2.73E-11	289 K	1.43E-11
69 K	2.77E-11	42 K	3.81E-11	143 K	8.06E-11	121 K	2.23E-11

Tabla 1.5  
Quinto bloque

0 -- 5 cm		5 – 10 cm		10 –15 cm		15 –20 cm	
Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )						
140 K	1.85E-11	319 K	1.41E-10	64 K	4.84E-11	123 K	3.32E-11
56 K	1.44E-11	286 K	3.05E-11	45 K	1.60E-10	160 K	1.33E-10
293 K	4.09E-11	144 K	4.77E-11	137 K	6.14E-11	139 K	2.06E-10
299 K	1.69E-10	125 K	5.25E-11	159	3.07E-11	53 K	1.59E-10

Tabla 1.6  
Sexto bloque

0 -- 5 cm		5 – 10 cm		10 –15 cm		15 –20 cm	
Cilindro	Ka (m <sup>2</sup> )						
41 K	3.06E-11	49 K	5.06E-11	62 K	1.56E-11	77 K	6.32E-11
74 K	9.85E-11	282 K	2.26E-11	305 K	1.89E-10	156 K	3.44E-11
147	3.98E-10	317 K	4.48E-11	68 K	2.83E-11	63 K	3.85E-11
300 K	1.56E-11	153 K	3.60E-11	295 K	9.64E-11	79 K	1.22E-10

Ka = Permeabilidad al aire a profundidades de 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm.

### Resultados de densidad aparente y porosidad del suelo

Tabla 1.7  
Primer bloque

prof	cilindro	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Dr (gr/cm <sup>3</sup> )	% f
0-5 cm	136 K	1.20	2.65	54.58
	282 K	1.10	2.65	58.62
	77 K	1.12	2.65	57.58
	309 K	1.16	2.65	56.39
5-10 cm	314 K	1.21	2.65	54.27
	300 K	1.26	2.65	52.35
	62 K	1.20	2.65	54.70
	44 K	1.13	2.65	57.24
10-15 cm	155 K	1.16	2.65	56.16
	75 K	1.25	2.65	52.85
	317 K	1.26	2.65	52.35
	65 K	1.25	2.65	52.81
15-20 cm	79 K	1.26	2.65	52.47
	153 K	1.35	2.65	48.97
	68 K	1.23	2.65	53.43
	55 K	1.04	2.65	60.81

Tabla 1.8  
Segundo bloque

prof	cilindro	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Dr (gr/cm <sup>3</sup> )	% f
0-5 cm	68 K	1.13	2.65	57.20
	74 K	1.14	2.65	57.01
	41 K	1.14	2.65	56.97
	49 K	0.95	2.65	64.24
5-10 cm	62 K	1.22	2.65	54.20
	77 K	1.15	2.65	56.24
	127	1.14	2.65	54.08
	303 K	1.14	2.65	56.62
10-15 cm	305 K	1.13	2.65	57.51
	156 K	1.20	2.65	54.58
	147	1.19	2.65	55.24
	317 K	1.16	2.65	56.16
15-20 cm	300 K	1.18	2.65	55.58
	153 K	1.17	2.65	55.70
	295 K	1.33	2.65	49.66
	282 K	1.27	2.65	51.93

Da = Densidad aparente, Dr = Densidad real, % f = porcentaje de porosidad

Tabla 1.9  
Tercer bloque

Prof	cilindro	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Dr (gr/cm <sup>3</sup> )	% f
0-5 cm	75 K	1.13	2.65	57.54
	46 K	1.04	2.65	60.93
	60 K	1.11	2.65	57.97
	66 K	1.09	2.65	58.81
5-10 cm	127	1.14	2.65	57.01
	303 K	1.14	2.65	56.85
	307 K	1.13	2.65	57.51
	306 K	1.12	2.65	57.81
10-15 cm	285 K	1.13	2.65	57.43
	302 K	1.13	2.65	57.51
	298 K	1.12	2.65	57.74
	291 K	1.03	2.65	61.31
15-20 cm	129 K	1.12	2.65	57.58
	300 K	1.13	2.65	57.31
	157 K	1.15	2.65	56.54
	48 K	1.10	2.65	58.43

Tabla 1.10  
Cuarto bloque

Prof	cilindro	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Dr (gr/cm <sup>3</sup> )	% f
0-5 cm	150 K	1.16	2.65	56.20
	128 K	1.14	2.65	57.12
	61 K	1.14	2.65	57.16
	69 K	1.20	2.65	54.62
5-10 cm	149 K	1.14	2.65	56.89
	52 K	1.20	2.65	54.81
	297 K	1.12	2.65	57.70
	42 K	1.09	2.65	58.74
10-15 cm	151	1.07	2.65	59.58
	130 K	1.08	2.65	59.35
	138 K	1.12	2.65	57.85
	143 K	1.03	2.65	61.08
15-20 cm	78 K	1.10	2.65	58.50
	283 K	1.10	2.65	58.58
	289 K	1.08	2.65	59.31
	121 K	1.16	2.65	56.27

Da = Densidad aparente, Dr = Densidad real, % f = porcentaje de porosidad

Tabla 1.11  
Quinto bloque

Prof	cilindro	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Dr (gr/cm <sup>3</sup> )	% f
0-5 cm	140 K	1.20	2.65	54.77
	56 K	1.13	2.65	57.43
	293 K	1.20	2.65	54.58
	299 K	1.16	2.65	56.35
5-10 cm	319 K	1.11	2.65	57.97
	286 K	1.18	2.65	55.35
	144 K	1.13	2.65	57.47
	125 K	1.06	2.65	59.89
10-15 cm	64 K	1.09	2.65	58.89
	45 K	1.01	2.65	61.93
	137 K	1.11	2.65	58.27
	159	1.11	2.65	57.93
15-20 cm	123 K	1.16	2.65	56.35
	160 K	1.20	2.65	54.74
	139 K	1.06	2.65	59.89
	53 K	1.20	2.65	54.74

Tabla 1.12  
Sexto bloque

Prof	cilindro	Da (gr/cm <sup>3</sup> )	Dr (gr/cm <sup>3</sup> )	% f
0-5 cm	41 K	1.02	2.65	61.39
	74 K	1.12	2.65	57.66
	147	1.11	2.65	58.01
	300 K	1.15	2.65	56.62
5-10 cm	49 K	1.14	2.65	56.97
	282 K	1.20	2.65	54.77
	317 K	1.13	2.65	57.31
	153 K	1.11	2.65	58.27
10-15 cm	62 K	1.06	2.65	60.08
	305 K	1.07	2.65	59.58
	68 K	1.16	2.65	56.39
	295 K	1.04	2.65	60.70
15-20 cm	77 K	1.15	2.65	56.77
	156 K	1.14	2.65	57.01
	63 K	1.08	2.65	59.39
	79 K	1.13	2.65	57.54

Da = Densidad aparente, Dr = Densidad real, % f = porcentaje de porosidad

## **ANEXO II**

**Resultados obtenidos de permeabilidad al  
aire, densidad aparente y porosidad del  
suelo con muestras de campo y  
compactadas en laboratorio**

## RESULTADOS DE PERMEABILIDAD AL AIRE

TABLA 2.1

Presión: 400 kpa

Cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	$\eta_a$ (Pa*s)	L (m)	V(m <sup>3</sup> )	A(m <sup>2</sup> )	t(s)	P(N/m <sup>2</sup> )	Ka(m <sup>2</sup> )
156 K	150.1	118.2	26.99	18.3	1.80E-05	0.0421	4.65E-04	1.96E-03	2634.78	323.24	2.11E-13
75 K	133.2	106	25.66	21.7	1.81E-05	0.0410	4.65E-04	1.96E-03	180.88	323.24	3.02E-12
123 K	126.6	108	17.22	17.4	1.79E-05	0.0468	4.65E-04	1.96E-03	2.8	323.24	2.20E-10
76 K	131.3	113.4	15.78	17.4	1.79E-05	0.0471	4.65E-04	1.96E-03	13.43	323.24	4.62E-11
304 K	117.9	105.7	11.54	15	1.78E-05	0.0475	4.65E-04	1.96E-03	5.54	323.24	1.12E-10
286 K	112.4	102.3	9.87	14.9	1.78E-05	0.0448	4.65E-04	1.96E-03	6.76	323.24	8.67E-11
152 K	113.6	103.6	9.65	16.9	1.79E-05	0.047	4.65E-04	1.96E-03	2.92	323.24	2.12E-10
62 K	119.9	107.9	11.12	17.1	1.79E-05	0.0471	4.65E-04	1.96E-03	4.73	323.24	1.31E-10
60 K	113.5	105.2	7.89	17.6	1.79E-05	0.0475	4.65E-04	1.96E-03	4.42	323.24	1.42E-10
147	120.3	112	7.41	17.6	1.79E-05	0.0484	4.65E-04	1.96E-03	3.47	323.24	1.84E-10
77 K	111.3	104.2	6.81	18.4	1.80E-05	0.0485	4.65E-04	1.96E-03	2.4	323.24	2.67E-10
311 K	127.3	122.6	3.83	18.2	1.80E-05	0.0481	4.65E-04	1.96E-03	3.13	323.24	2.03E-10

Psh=Peso del suelo seco, Pss=Peso del suelo seco, %H=Porcentaje de humedad, T=Temperatura,  $\eta_a$ = Viscosidad dinámica del aire, L= longitud de la muestra del cilindro, V= Volumen de aire del flotador, A= Área de la sección transversal de la muestra, t= Tiempo que tardó el flotador en recorrer 5 cm de la barra conductora, P= Presión del aire del flotador, Ka= Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.

TABLA 2.2

Presión: 600 kpa

Cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	$\eta$ (Pa*s)	L (m)	V(m <sup>3</sup> )	A(m <sup>2</sup> )	t(s)	P(N/m <sup>2</sup> )	Ka(m <sup>2</sup> )
153 K	137.1	111.2	23.29	19.1	1.80E-05	0.039	4.65E-04	1.96E-03	1946.45	323.24	2.65E-13
283 K	120.9	97	24.64	18.3	1.80E-05	0.0385	4.65E-04	1.96E-03	726.63	323.24	6.99E-13
45 K	135.4	117.3	15.43	17.3	1.79E-05	0.0461	4.65E-04	1.96E-03	9.92	323.24	6.12E-11
295 K	147.5	133.7	10.32	17.3	1.79E-05	0.046	4.65E-04	1.96E-03	5.57	323.24	1.09E-10
145 K	132.4	121.6	8.88	14.9	1.78E-05	0.047	4.65E-04	1.96E-03	10.89	323.24	5.65E-11
151	105.8	94.6	11.84	14.9	1.78E-05	0.043	4.65E-04	1.96E-03	9.74	323.24	5.77E-11
320 K	105	94.6	10.99	17.1	1.79E-05	0.0489	4.65E-04	1.96E-03	9.18	323.24	7.01E-11
306 K	120.2	110.4	8.88	17.1	1.79E-05	0.0461	4.65E-04	1.96E-03	11.38	323.24	5.33E-11
129 K	110	102	7.84	17.6	1.79E-05	0.0448	4.65E-04	1.96E-03	8.68	323.24	6.80E-11
144 K	118.7	110	7.91	17.5	1.79E-05	0.047	4.65E-04	1.96E-03	5.01	323.24	1.24E-10
299 K	125.3	117.5	6.64	18.2	1.80E-05	0.048	4.65E-04	1.96E-03	10.84	323.24	5.84E-11
310 K	117.8	111	6.13	18.2	1.80E-05	0.0479	4.65E-04	1.96E-03	5.28	323.24	1.20E-10

TABLA 2.3

Presión: 800 kpa

Cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	$\eta$ (Pa*s)	L (m)	V(m <sup>3</sup> )	A(m <sup>2</sup> )	t(s)	P(N/m <sup>2</sup> )	Ka(m <sup>2</sup> )
282 K	139	110.3	26.02	18.2	1.80E-05	0.0370	4.65E-04	1.96E-03	3488.55	323.24	1.40E-13
159	125.7	101.1	24.33	19.4	1.80E-05	0.0360	4.65E-04	1.96E-03	417.48	323.24	1.14E-12
63 K	133.9	115.1	16.33	17.3	1.79E-05	0.0458	4.65E-04	1.96E-03	39.41	323.24	1.53E-11
122 K	118.8	103.3	15.00	17.4	1.79E-05	0.0430	4.65E-04	1.96E-03	38.79	323.24	1.46E-11
303 K	125.7	113.9	10.36	14.9	1.78E-05	0.0467	4.65E-04	1.96E-03	12.57	323.24	4.86E-11
135 K	123.8	110.3	12.24	14.9	1.78E-05	0.0465	4.65E-04	1.96E-03	17.55	323.24	3.47E-11
154 K	122.7	110.9	10.64	17.2	1.79E-05	0.0455	4.65E-04	1.96E-03	11.3	323.24	5.30E-11
143 K	124.9	113.1	10.43	17.2	1.79E-05	0.0458	4.65E-04	1.96E-03	11.05	323.24	5.45E-11
67 K	135.3	124.5	8.67	17.5	1.79E-05	0.0481	4.65E-04	1.96E-03	11.98	323.24	5.29E-11
58 k	118.9	110.1	7.99	17.6	1.79E-05	0.0466	4.65E-04	1.96E-03	8.28	323.24	7.41E-11
74	114.1	107.8	5.84	18.1	1.80E-05	0.0449	4.65E-04	1.96E-03	12.54	323.24	4.72E-11
57 K	118	110.5	6.79	18.2	1.80E-05	0.0454	4.65E-04	1.96E-03	8.71	323.24	6.88E-11

TABLA 2.4

Presión: 1000 kpa

Cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	$\eta_a$ (Pa*s)	L (m)	V(m <sup>3</sup> )	A(m <sup>2</sup> )	t(s)	P(N/m <sup>2</sup> )	Ka(m <sup>2</sup> )
51 K	140.6	113.4	23.99	17.8	1.80E-05	0.039	4.65E-04	1.96E-03	640.08	323.24	8.01E-13
138 K	143.1	116.4	22.94	17.7	1.80E-05	0.039	4.65E-04	1.96E-03	579.35	323.24	8.87E-13
308 K	126.8	107.8	17.63	17.5	1.79E-05	0.043	4.65E-04	1.96E-03	52.14	323.24	1.07E-11
288 K	121	102.8	17.70	17.4	1.79E-05	0.040	4.65E-04	1.96E-03	88.5	323.24	5.91E-12
313 K	133.1	120.3	10.64	14.8	1.78E-05	0.046	4.65E-04	1.96E-03	11.07	323.24	5.43E-11
300 K	122.3	111.4	9.78	14.9	1.78E-05	0.046	4.65E-04	1.96E-03	27.55	323.24	2.17E-11
61 K	115.1	101.9	12.95	17.5	1.79E-05	0.043	4.65E-04	1.96E-03	17.33	323.24	3.26E-11
69 K	117.6	105.6	11.36	17.3	1.79E-05	0.044	4.65E-04	1.96E-03	12.65	323.24	4.56E-11
49 K	134.4	124.8	7.69	17.5	1.79E-05	0.047	4.65E-04	1.96E-03	17.25	323.24	3.60E-11
149 K	114.1	107.2	6.44	17.5	1.79E-05	0.044	4.65E-04	1.96E-03	19.2	323.24	3.03E-11
146 K	93	87.8	5.92	18.1	1.80E-05	0.041	4.65E-04	1.96E-03	8.29	323.24	6.46E-11
291 K	122.9	115.9	6.04	18	1.80E-05	0.047	4.65E-04	1.96E-03	5.87	323.24	1.04E-10

Psh=Peso del suelo seco, Pss=Peso del suelo seco, %H=Porcentaje de humedad, T=Temperatura,  $\eta_a$ = Viscosidad dinámica del aire, L= longitud de la muestra del cilindro, V= Volumen de aire del flotador, A= Área de la sección transversal de la muestra, t= Tiempo que tardó el flotador en recorrer 5 cm de la barra conductora, P= Presión del aire del flotador, Ka= Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.

## RESULTADOS OBTENIDOS DE DENSIDAD APARENTE Y PORCIENTO DE POROSIDAD

TABLA 2.5  
Presión: 600 kpa

Cilindros	Psh (grs)	Pss (grs)	% H	T ( ° C )	Da gr/cm <sup>3</sup>	Dr gr/cm <sup>3</sup>	% f
156 K	150.1	118.2	26.99	18.3	1.43	2.65	46.01
75 K	133.2	106	25.66	21.7	1.32	2.65	50.29
123 K	126.6	108	17.22	17.4	1.18	2.65	55.63
76 K	131.3	113.4	15.78	17.4	1.23	2.65	53.70
304 K	117.9	105.7	11.54	15	1.13	2.65	57.21
286 K	112.4	102.3	9.87	14.9	1.16	2.65	56.09
152 K	113.6	103.6	9.65	16.9	1.12	2.65	57.62
62 K	119.9	107.9	11.12	17.1	1.17	2.65	55.95
60 K	113.5	105.2	7.89	17.6	1.13	2.65	57.41
147	120.3	112	7.41	17.6	1.18	2.65	55.50
77 K	111.3	104.2	6.81	18.4	1.09	2.65	58.69
311 K	127.3	122.6	3.83	18.2	1.30	2.65	50.99

TABLA 2.6  
Presión: 400 kpa

Cilindros	Psh (grs)	Pss (grs)	% H	T ( ° C )	Da gr/cm <sup>3</sup>	Dr gr/cm <sup>3</sup>	% f
153 K	137.1	111.2	23.29	19.1	1.45	2.65	45.17
283 K	120.9	97	24.64	18.3	1.28	2.65	51.55
45 K	135.4	117.3	15.43	17.3	1.30	2.65	51.07
295 K	147.5	133.7	10.32	17.3	1.48	2.65	44.11
145 K	132.4	121.6	8.88	14.9	1.32	2.65	50.25
151	105.8	94.6	11.84	14.9	1.12	2.65	57.70
320 K	105	94.6	10.99	17.1	0.99	2.65	62.80
306 K	120.2	110.4	8.88	17.1	1.22	2.65	53.95
129 K	110	102	7.84	17.6	1.16	2.65	56.22
144 K	118.7	110	7.91	17.5	1.19	2.65	55.00
299 K	125.3	117.5	6.64	18.2	1.25	2.65	52.93
310 K	117.8	111	6.13	18.2	1.18	2.65	55.44

TABLA 2.7  
Presión: 800 kpa

Cilindros	psh (grs)	Pss (grs)	% H	T ( ° C )	Da gr/cm <sup>3</sup>	Dr gr/cm <sup>3</sup>	% f
282 K	139	110.3	26.02	18.2	1.52	2.65	42.68
159	125.7	101.1	24.33	19.4	1.43	2.65	46.00
63 K	133.9	115.1	16.33	17.3	1.28	2.65	51.68
122 K	118.8	103.3	15.00	17.4	1.22	2.65	53.81
303 K	125.7	113.9	10.36	14.9	1.24	2.65	53.10
135 K	123.8	110.3	12.24	14.9	1.21	2.65	54.39
154 K	122.7	110.9	10.64	17.2	1.24	2.65	53.13
143 K	124.9	113.1	10.43	17.2	1.26	2.65	52.52
67 K	135.3	124.5	8.67	17.5	1.32	2.65	50.23
58 k	118.9	110.1	7.99	17.6	1.20	2.65	54.57
74	114.1	107.8	5.84	18.1	1.22	2.65	53.83
57 K	118	110.5	6.79	18.2	1.24	2.65	53.20

TABLA 2.8  
Presión: 1000 kpa

Cilindros	Psh (grs)	Pss (grs)	% H	T ( ° C )	Da gr/cm <sup>3</sup>	Dr gr/cm <sup>3</sup>	% f
51 K	140.6	113.4	23.99	17.8	1.49	2.65	43.95
138 K	143.1	116.4	22.94	17.7	1.52	2.65	42.61
308 K	126.8	107.8	17.63	17.5	1.29	2.65	51.23
288 K	121	102.8	17.70	17.4	1.32	2.65	50.21
313 K	133.1	120.3	10.64	14.8	1.33	2.65	49.71
300 K	122.3	111.4	9.78	14.9	1.24	2.65	53.13
61 K	115.1	101.9	12.95	17.5	1.21	2.65	54.33
69 K	117.6	105.6	11.36	17.3	1.23	2.65	53.64
49 K	134.4	124.8	7.69	17.5	1.35	2.65	49.05
149 K	114.1	107.2	6.44	17.5	1.24	2.65	53.36
146 K	93	87.8	5.92	18.1	1.10	2.65	58.42
291 K	122.9	115.9	6.04	18	1.27	2.65	52.07

Psh=Peso del suelo húmedo, Pss=Peso del suelo seco, % H=Porcentaje de humedad, Da=Densidad aparente, Dr=Densidad real, % f=Porcentaje de porosidad