

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Determinación del límite superior de laborabilidad de dos texturas de suelo del Distrito de Desarrollo Rural (DRR) Saltillo, basado en el método de la permeabilidad del aire.

Por:

Mario Santos Ríos Camey

T E S I S

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. Tomás Gaytán Muñiz
Casas**

Ing. B. Elizabeth de la Peña

Coordinador de la División de Ingeniería

M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2004.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a **Dios** por haberme dado el don maravilloso de la vida, por guiarme siempre por el buen camino, que es el de su luz admirable y por haberme dado la capacidad necesaria para sacar adelante mi carrera.

A mi **ALMA TERRA MATER** por haberme dado la oportunidad de formarme en sus aulas y por prepararme para afrontar los problemas y nuevos retos que la vida me traerá.

Al **Dr. Martín Cadena Zapata**, por ser el eje principal de este proyecto, porque por su gran experiencia y capacidad se llegó a la culminación exitosa de esta tesis. Por sus grandes logros que ha alcanzado que creo serán todavía muchos. De todo corazón muchas gracias Doctor.

Al **M.C. Tomás Gaytán Muñiz** por su apoyo, por sus conocimientos transmitidos y por sus sugerencias en la elaboración de este trabajo de investigación.

A la **Ing. B. Elizabeth de la Peña Casas** por participar en este proyecto y por sus sugerencias hechas para la elaboración del mismo.

A todos mis compañeros de la generación XCVIII de la carrera de Ingeniero Mecánico Agrícola, en especial a: **Francisco Pablo, Nelson, Efrén, Fabián, Ricardo, Gerardín, Juan Francisco, Jimmy, Armando, Juan Carlos, Juan Sergio, Jonathan, Salvador, Manuel, Freddy, Josué, Alfredo, Guillermo, Luis Miguel, Fidel, Eduardo Lira y Eric Martínez**, por haberme dado su amistad. Dios los bendiga a dondequiera que vayan.

A la **Lic. Griselda Valdés Ramos** por su gran carisma y por el apoyo desinteresado en la revisión gramatical de esta tesis.

A todos los maestros del departamento de Maquinaria Agrícola, en especial al **M.C. Juan Antonio Guerrero Hdz. y al M.C. Héctor Uriel Serna Fernández** por su gran apoyo durante mi estancia en esta universidad, por todos sus grandes deseos hacia mi persona y por su amistad. Gracias.

A todo el personal administrativo del departamento de Maquinaria Agrícola y en especial a todos aquellos que compartieron su tiempo conmigo.

A las laboratoristas Paty y Luci del departamento de Suelos, por su ayuda en esta tesis.

Al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COECYT) por haberme otorgado un estímulo económico para la elaboración de este proyecto.

“Dad gracias en todo; porque esta es la voluntad de Dios para con vosotros en Cristo Jesús” I Tesalonicenses 5:18

DEDICATORIA

A mis **Padres:**

Sr. Antonio Ríos Granados

Sra. Floribertha Camey López

Con todo mi amor, a quienes debo todos mis logros; mi más sincero respeto y admiración.

GRACIAS

Por la educación, por sus sabios consejos, por su cariño, por su paciencia y porque a pesar de la adversidad nos impulsan a seguir adelante a mis hermanos y a mi.

A mis **hermanos:**

Vianey, Ervin, Octavio, Yesenia, Juan Manuel y Ana Yudelma, quienes de muchas formas me han ayudado y motivado a continuar y por que son una parte importante en mi vida. Los quiero mucho y siempre los llevaré en mi corazón.

A mis **sobrinos:**

Quique, Conra, Tony, Elizma y Henry por ser una motivación más en mi vida.

A mis tíos, primos, abuelos, amigos y cuñados:

Por sus consejos, motivación y sus buenos deseos hacia mi persona.

EL PRECIO DEL ÉXITO

El carácter, a la larga, es el factor decisivo en una vida de éxito. El carácter que manifiestas en lo que haces ahora proclama lo que eres hoy y lo que se puede esperar de ti. El éxito en la vida corresponde a los que son hombres y mujeres de carácter y grandes trabajadores. No hay cosa imposible para el hombre trabajador, decía Alonso Barros.

El éxito es seguro para aquel que se coloca en actitud mental de lograr su finalidad, y después, trabaja, trabaja y trabaja. Es lugar común afirmar, pero lo afirmo por la gran cantidad de verdad que encierra, el dicho de que en la cumbre del éxito no hay muchos hombres de talento. Pero hay muchos hombres de carácter y trabajo. El talento no ha desempeñado un papel de vital importancia en las grandes hazañas de la historia.

Sin sacrificio, nadie puede lograr el éxito, sea cual fuere su profesión. En ninguna parte se obtiene algo a cambio de nada. Lo que nada cuesta, nada vale, ni proporciona satisfacciones. Algunos compran el éxito con otra clase de moneda. Cómpralo tú, con la única moneda de circulación legal en el mercado del éxito honrado: trabajo y carácter. Esta moneda está al alcance de todos. El éxito verdadero en la vida es el único negocio donde el pobre y el rico valen lo mismo.

El placer y el disfrute del éxito derivan del trabajo duro, del esfuerzo penoso, del sacrificio realizado para lograr nuestros objetivos. Cuantos más intenso es el sacrificio y más duro el trabajo, mayor será la satisfacción del triunfo. El trabajo entusiasta y el sacrificio personal son indispensables para obtener el éxito.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
Agradecimientos.	I
Dedicatoria.	III
Índice de contenido.	V
Índice de figuras.	VIII
RESUMEN.	IX
I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Laborabilidad del suelo.	1
1.2 Límite superior de laborabilidad.	2
1.3 Objetivo e Hipótesis.	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA.	5
2.1 Importancia de la humedad en la laborabilidad.	5
2.1.1 Estados de consistencia del suelo.	5
2.2 Estudios sobre laborabilidad del suelo.	6
2.3 Compactación del suelo.	8
2.4 Factores relacionados con maquinaria agrícola en la compactación del suelo.	9
2.5 Efecto del tráfico de maquinaria agrícola sobre la porosidad del suelo.	10
2.6 Métodos empleados para estimar la permeabilidad del aire de un suelo.	13

2.6.1	Método Indirecto.	13
2.6.2	Métodos de laboratorio.	14
2.6.3	Método de campo.	15
2.7	Métodos aproximados para estimar el límite superior de laborabilidad del suelo.	16
2.7.1	Método manual para calcular el límite inferior de plasticidad.	16
2.7.2	Capacidad de campo.	17
2.8	Método de la permeabilidad del aire para estimar el límite superior de laborabilidad.	17
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.	18
3.1	Identificación de dos texturas de suelo.	18
3.2	Preparación y procesamiento de las muestras.	18
3.3	Contenido de humedad de las muestras.	20
3.4	Compactación de las muestras.	21
3.5	Prueba de permeabilidad del aire.	22
3.6	Densidad aparente inicial y densidad aparente al final de la compresión.	23
3.7	Porosidad.	24
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	25
4.1	Ubicación geográfica.	25
4.2	Características de los suelos en estudio.	25
4.3	Resultados de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad relacionados con el contenido de humedad para el suelo migajón.	26
4.3.1	Comportamiento de la permeabilidad del aire en relación con la humedad para el suelo migajón.	27
4.3.2	Relación entre los cambios de densidad aparente con el contenido de humedad para el suelo migajón.	28
4.3.3	Comportamiento de la porosidad antes y después de la compactación relacionada con la humedad en el suelo migajón.	29

.....	
4.4	Resultados de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad, relacionados con el contenido de humedad para el suelo migajón-arcilloso. 30
4.4.1	Comportamiento de la permeabilidad del aire con relación a la humedad para el suelo migajón-arcilloso. 30
4.4.2	Densidad aparente inicial y final relacionada con el contenido de humedad para el suelo migajón-arcilloso. 31
4.4.3	Relación entre los cambios de porosidad respecto a la humedad para el suelo migajón-arcilloso. 32
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 34
VI.	LITERATURA CITADA. 36
VII.	ANEXOS. 40
	Anexo 1. Viscosidad del aire a diferentes temperaturas. 41
	Anexo 2. Resultados obtenidos de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad relacionados con el contenido de humedad para el suelo migajon. 42
	Anexo 3. Resultados obtenidos de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad relacionados con el contenido de humedad para el suelo migajón-arcilloso. 55

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 3.1	Tamices de 2.4 y 4.0 mm.	18
Figura 3.2	Tamizado en campo.	18
Figura 3.3	Suelos de 2.4 a 4.0 mm de DMA.	19
Figura 3.4	Suelo tamizado.....	19
Figura 3.5	Balanza de precisión.....	20
Figura 3.6	Prensa neumática.....	21
Figura 3.7	Permeámetro de aire y descripción de sus partes.....	23
Figura 4.1	Suelo de textura migajón.....	25
Figura 4.2	Suelo de textura migajón-arcilloso.....	26
Figura 4.3	Suelo migajón a diferentes contenidos de humedad..	26
Figura 4.4	Límite superior de laborabilidad del suelo de textura migajón.....	27
Figura 4.5	Comportamiento de la densidad aparente antes y después de la compactación a medida que la humedad fue en aumento.....	28
Figura 4.6	Relación entre humedad y porosidad antes y después de la compactación.....	29
Figura 4.7	Suelo migajón-arcilloso a diferentes contenidos de humedad.....	30
Figura 4.8	Límite superior de laborabilidad del suelo de textura migajón-arcilloso.....	31
Figura 4.9	Comportamiento de la densidad aparente antes y después de la compresión relacionada con el aumento de	

	humedad.....	32
Figura 4.10	Porosidad antes y después de la compactación en relación con el contenido de humedad.....	33

RESUMEN

Las decisiones de cuándo realizar las labores de preparación del suelo con maquinaria agrícola, se basan en juicios cualitativos, por lo que en muchas ocasiones se realizan las actividades en condiciones subóptimas de humedad, lo que conlleva a la degradación de la estructura (compactación) y/o a un inadecuado resultado de las operaciones. En esta situación, se crea la necesidad de efectuar trabajo adicional para lograr la calidad de la preparación. Por lo anterior, el gasto de energía y por lo tanto el costo de las labores se incrementa, haciendo menos competitivo el sistema de producción.

Para la operación de la maquinaria agrícola, en México, no se tiene actualmente una forma cuantitativa de determinar en qué valores de humedad el suelo está todavía laborable antes de que se compacte, es decir no se cuantifica el límite superior de laborabilidad de los suelos.

Es por eso que esta investigación consistió en determinar el límite superior de laborabilidad de dos texturas de suelo, del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) Saltillo, por medio del método de la permeabilidad del aire, el cual servirá para tomar decisiones adecuadas para efectuar las labores de preparación del suelo antes de que éste llegue al punto de compactación.

La evaluación se realizó en el campo de Buenavista (UAAAN) para lo cual se identificaron dos texturas de suelo de uso agrícola en el DDR Saltillo. Se colectaron muestras de los suelos seleccionados y se procesaron tamizándolas, de tal manera

que quedaran agregados entre 2.4 y 4.0 mm de DMA (Diámetro Medio de Agregados).

Las muestras se prepararon a diferentes contenidos de humedad desde suelo seco hasta plástico para cada textura de suelo.

Cada muestra fue preparada llenando completamente un cilindro de acero 100 cm³ con partículas de suelo de tamaño 2.4 a 4.0 mm. La muestra fue comprimida gradualmente de arriba hacia abajo por medio de una prensa neumática, hasta alcanzar una presión de 4 bars. La altura de la muestra después de la compresión fue calculada midiendo la distancia de la parte de arriba del cilindro hasta el suelo comprimido con un micrómetro después de que ocurriera el rebote del suelo. Después de esto, la permeabilidad del aire fue medida por medio de un permeámetro de aire.

Una vez realizadas la pruebas de permeabilidad del aire se obtuvo: para el caso del suelo de textura migajón un límite superior de laborabilidad a una humedad de 24.6 % con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.93$, y para el suelo de textura migajón-arcilloso el límite superior de laborabilidad se encontró en 20.67% de humedad con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.96$.

Por lo que se concluye que la estimación en laboratorio del límite superior de laborabilidad por el método de la permeabilidad del aire es muy confiable, ya que se pudo representar adecuadamente y predecir con bastante precisión el contenido de humedad con el valor límite ($1 \times 10^{-12} \text{m}^2$) de permeabilidad del aire, para las dos texturas de suelo estudiadas.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Laborabilidad del suelo

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

La friabilidad, conocida como la mejor condición de laborabilidad, es la facilidad que tiene el suelo de desmenuzarse. El estado de humedad en que los suelos son friables es el de mejores condiciones para la labranza. Los suelos friables son los que poseen mejor estado de agregación para el cultivo (Baver, et al., 1980).

El término friable deriva de "friare" que significa desmenuzar. Es decir que el suelo se desmenuza con cierta facilidad. En seco, suele ser "blando" o algo "duro" y su comportamiento es el equivalente a ellos. Se labra muy bien y proporciona un buen contacto del suelo con las semillas y con las raíces de las plantas (FAO, 1977).

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

En la evaluación del suelo, la laborabilidad es una cualidad del suelo que describe como fácilmente este puede ser labrado o cultivado. Esto es evaluado de acuerdo a la textura / estructura / consistencia de las relaciones de la parte superior del suelo (FAO 1983).

La laborabilidad varía de suelo a suelo, de máquina a máquina y de la operación de una parcela a otra (Simelanga y Have, 1992). Estas variaciones están influenciadas tanto por el contenido transitorio de humedad como por las propiedades intrínsecas del suelo tales como arcilla y

materia orgánica (Tomasson, 1982). Cuando se evalúa la laborabilidad se debe incluir un elemento de tiempo incluyendo la duración de una buena condición durante el calendario de cosecha para las operaciones suelo-cultivo (Cadena, 1999).

Al término cultivable se le puede dar una interpretación amplia y variable según la experiencia y el punto de vista del que opina. Estrictamente hablando, tierra cultivable o laborable, es aquella que es susceptible de labrarse o cultivarse. Sin embargo esa acepción no se considera si esa tierra se puede cultivar provechosamente a un nivel dado de precios para los productos agrícolas, o si se deteriora con rapidez al cultivarla, a menos que se utilicen técnicas de labranza y sistemas de cultivos especiales.

Es probable que exista una tendencia a usar el término cultivable en un sentido puramente físico y considerar como tierra cultivable todo terreno desmontado que no es demasiado pedregoso, de topografía muy abrupta o que necesita drenarse para ser sembrado, y que no se encuentra en una zona con precipitación muy escasa durante la estación de crecimiento. Las comparaciones se basan en los mejores datos disponibles y la tierra arable se considera igual a tierra cultivable o laborable (D. Foth, 1986).

1.2 Límite superior de laborabilidad (LSL)

Dentro de la laborabilidad del suelo existen dos límites muy importantes, los cuales nos proporcionan los mejores resultados tecnológicos con la menor aplicación de energía en labores como aradura y rastreo, estos son el límite de contracción (LC) y límite inferior de plasticidad (LIP), conocido, en teoría, como estado friable del suelo (Cadena, et al. 2002).

El límite inferior de plasticidad (LIP) es, desde el punto de vista agronómico, el valor de humedad al cual un suelo deja de ser friable y pasa a una consistencia plástica. Para Olarte, et. al (1979) el límite inferior de plasticidad es el contenido de humedad máxima que se le permite a un suelo para ser trabajado con maquinaria (límite superior de laborabilidad). Estudios recientes como el de Cadena, et. al, (2002) reportaron que el límite superior de laborabilidad se encontró muy cerca del límite inferior de plasticidad teórico de los suelos estudiados. Con base a esto, no podemos establecer con precisión que estos límites (LIP y LSL) son iguales, ni tampoco podemos descartar la idea de que en ocasiones el LSL pueda ser igual al LIP, sino que dependerá mucho de las características físicas del suelo en estudio.

Existe otra aproximación al LSL, la cual se basa en la curva de retención de humedad, en el parámetro de la capacidad de campo (CC), donde se dice que si el límite inferior de plasticidad ocurre en 95 % del valor de la capacidad de campo el suelo podría ser trabajado “fácilmente” (Simelanga and Have, 1992). Si consideramos que el límite superior de laborabilidad puede ser igual o estar alrededor del LIP, entonces en cuestiones de labranza el valor de la CC está mucho más lejano al límite superior de laborabilidad.

Por ello este proyecto se enfoca a la determinación del límite superior de laborabilidad de dos texturas de suelo, del DDR Saltillo, con base en el método de la permeabilidad del aire, donde se estima el área de poros (en m^2) que el suelo tiene (tomando como base $1 \times 10^{-12} m^2$, que según estudios de Perdok y Hendrikse, [1982] es considerado como el límite superior de laborabilidad) dando así una estimación más confiable, hablando exclusivamente de labranza del suelo.

Por lo tanto podemos decir que el límite superior de laborabilidad del suelo es el estado de humedad máxima a la cual un suelo dado todavía puede ser laborado sin sufrir deterioro de la estructura (compactación).

Por todo lo anterior el conocimiento del límite superior de laborabilidad del suelo, como un valor específico de humedad para cada tipo, mediante el método de la permeabilidad del aire en el perfil del suelo, servirá como información valiosa a todo aquél que haga uso de maquinaria y equipo agrícola, puesto que se podrá decidir el momento adecuado para efectuar las labores antes de que el suelo llegue al punto de compactación, de esta manera se evitarán excesivos gastos de energía y deterioro del suelo, lo que redundaría en lograr mayor eficiencia en los sistemas de producción agrícola, incluidos los del estado de Coahuila y particularmente aquellos altamente mecanizados como la Región Laguna.

1.3 Objetivos e Hipótesis

Objetivo general:

Determinar el límite superior de laborabilidad de dos texturas de suelo, del Distrito de Desarrollo Rural Saltillo, mediante la técnica de la permeabilidad del aire.

Hipótesis:

El valor específico de humedad máxima en la que un suelo puede ser laborado sin sufrir deterioro de la estructura (límite superior de laborabilidad) puede ser determinado en laboratorio por medio del método de la permeabilidad del aire.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia de la humedad en la laborabilidad del suelo.

Dexter y Birkas (2004) mencionan que el contenido de humedad óptimo de un suelo es definido como aquél en el que la cantidad de agregados producidos durante la labranza es mínimo, y concluyen que para suelos con buenas condiciones físicas agregados no mayores a 50 mm deben ser producidos al efectuar las operaciones de labranza.

Para Ashburner y Sims (1984) las propiedades dinámicas del suelo de mayor interés para los estudios de labranza y tracción son los parámetros de cohesión, adhesión y fricción. Estas propiedades determinan en su mayor parte la resistencia del suelo a las

fuerzas que les aplican los implementos de labranza. Los valores e influencia de las propiedades dependen de la distribución de tamaño de las partículas del suelo (textura), cantidad y naturaleza de la arcilla, la cantidad de materia orgánica y el contenido de humedad, siendo esta última la más importante, ya que determina los diferentes estados de consistencia del suelo.

2.1.1 Estados de consistencia del suelo

Límite de contracción. Entre las consistencias friable y de cementado 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 el punto la reducción posterior en volumen total del mismo es mínima así las partículas

del suelo (arcilla principalmente) están prácticamente tocándose unidas muy fuertemente por las películas de agua (Ashburner y Sims, 1984).

Límites atterberg de plasticidad. Estos límites definen los valores del porcentaje máximo y mínimo del contenido de agua en el suelo en el estado plástico. El límite inferior, es el valor de humedad en el cual el suelo deja de ser friable y pasa a una consistencia plástica. El límite superior significa que debido a un aumento de humedad la cohesión decrece tanto que la masa del suelo fluye bajo la acción de una fuerza. La plasticidad de un suelo depende principalmente de la cantidad, tamaño y tipo de arcilla que contenga, además del tipo de cationes intercambiables y el contenido de materia orgánica (Baver, et al., 1980).

A mayor cantidad de arcilla en un suelo se aumentan sus límites de plasticidad y su índice de plasticidad o número de plasticidad; en la práctica es importante conocer los límites del estado plástico de un suelo, ya que si el índice es alto significa que el suelo tiene un amplio rango en el estado plástico lo cual dificultará su laboreo, ya que el tiempo disponible para trabajarlo en el estado friable será muy corto; es necesario reducir el índice de plasticidad, al agregar por ejemplo materia orgánica, para obtener un amplio rango en el estado friable que es el óptimo para lograr los objetivos del laboreo.

2.2 Estudios sobre laborabilidad del suelo.

En regiones deficitarias de precipitación de lluvias altamente estacionales, la labranza y las prácticas afines de conservación de agua son muy importantes para lograr buenas condiciones físicas del suelo y asegurar una aceptable productividad de los cultivos (Herve, 1993).

Gavande (1982) dice que el buen estado físico del suelo es esencial para la disponibilidad de agua y aire a las raíces de las plantas. El abastecimiento de agua y oxígeno por el suelo y las necesidades propias de las plantas son muy variables y

dependen: primero del abastecimiento externo del agua y características físicas del tipo de suelo y segundo del estado de desarrollo de la planta y condiciones del clima. En la mayoría de los suelos la capacidad de abastecimiento es menor que los requisitos de los cultivos para un alto rendimiento, por lo que se busca promover un óptimo estado físico del suelo a través del manipuleo mecánico o labranza.

Cadena, et al. (2002), realizaron un estudio en la zona tropical de Veracruz para determinar los rangos laborables de dos tipos de suelo. En este estudio el rango de laborabilidad de los suelos de esa zona fue cuantificado determinando en campo, los efectos de los implementos sobre la estructura del suelo y midiendo la energía específica aplicada por la combinación tractor-implemento, lo cual fue hecho dentro y fuera de los rangos del estado friable teórico del suelo, dando como resultado que el rango laborable en campo real fue más pequeño que el estado friable teórico 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 realizado en laboratorio, donde el límite seco de laborabilidad fue determinado mediante la prueba de la caída. Los resultados en términos de tensión de la humedad del suelo resultaron más bajos comparados con los de campo. Para la determinación del límite húmedo de laborabilidad (límite superior de laborabilidad) se realizó la prueba de permeabilidad del 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

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.(Agroinformación 2000)

Breland & Hansen (1996) mencionan que la compactación disminuye el volumen de poros totales y produce cambios en la distribución del tamaño de los mismos, ocasionando un mayor porcentaje de poros pequeños.

Baver, et al. (1980), dicen que 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 éstas prácticamente pierden atracción entre ellas, esto es la cohesión molecular, este parámetro está en 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 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, o sea perder completamente la estructura del suelo, hasta llegar al punto de compactación.

Gavande (1982) describe que durante la práctica de labranza se tiene más riesgo de destruir que de mejorar la estructura del suelo. Así, cuando un suelo débil se labra con un alto contenido de humedad, el agua almacenada en el agregado puede quedar libre, esto provoca una disminución de la succión del agua del suelo, como consecuencia del medio ambiente físico.

2.4 Factores relacionados con la maquinaria agrícola en la compactación del suelo.

Existen factores que se deben considerar tanto para la selección como para la operación de la maquinaria agrícola con el fin de prevenir la compactación (agroinformación 2000). Estos se mencionan a continuación:

- Peso de la maquinaria agrícola: 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 no es uniforme, 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 estén los neumáticos, menor es el área del neumático que entra en contacto con el suelo y mayor es la presión sobre éste. Por lo tanto, se recomienda hacer las labores con presiones bajas de inflado.
- 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 la mantención de 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.

2.5 Efecto del tráfico de maquinaria agrícola sobre la porosidad del suelo

El espacio poroso (E_p) es la porción de suelo no ocupada por partes sólidas. El espacio poroso está ocupado por aire y agua. El arreglo de las partículas sólidas del suelo determina la cantidad de espacio poroso. (Ortiz V. y Ortiz S., 1990).

Voorhees, (1989) dice que la compactación del suelo en condiciones de campo es comúnmente causada por la labranza y el tráfico de ruedas, pudiendo reducir sustancialmente el rendimiento de los cultivos.

La disminución de la macroporosidad del suelo va a producir una baja capacidad de aireación y oxigenación del suelo, lo que va a generar una disminución de la actividad de las raíces y, consecuentemente, un menor crecimiento de éstas así como un menor volumen de suelo explorado y una reducción en la absorción de agua y nutrientes (Agroinformación 2000).

La compactación modifica la actividad bioquímica y microbiológica del suelo. El mayor impacto físico que se produce, es la reducción de la

porosidad, lo que implica una menor disponibilidad tanto de aire como de agua para las raíces de las plantas. En los suelos agrícolas, como la compactación es causada sobre todo por la maquinaria pesada, se puede prevenir incrementando el número de ejes y ruedas de la maquinaria agrícola, aumentando la anchura de los neumáticos y reduciendo su presión. El uso de vehículos más pequeños y ligeros no es precisamente beneficioso, ya que requiere pasadas más frecuentes, que pueden dar un efecto contrario al deseado. Otra medida preventiva para aplicar es lo referente a la planificación de las labores agrarias, por ejemplo evitar el uso de maquinaria pesada en condiciones de humedad alta. (D.O.T y M. A, 2001).

Para Gavande (1982), una de las propiedades físicas que se ve constantemente afectada, tanto por los implementos como por maquinaria agrícola, es la compactación del suelo. Es común encontrar en suelos que han sido trabajados constantemente con arado una capa compacta de 30 a 50 cm. de profundidad, llamada comúnmente, piso de arado. Además, a consecuencia de la compactación se reduce el espacio poroso, estos efectos son mayores cuando las labores se realizan en suelos con un cierto contenido de humedad. Este factor es muy importante y debe tomarse en cuenta al momento de efectuar las labores. Al respecto, muchos autores mencionan que el efecto benéfico producido por un implemento de labranza generalmente se nulifica por su uso excesivo, o por las labores realizadas con un contenido inapropiado de humedad del suelo. En estos casos, el valor de la consistencia del suelo es un dato muy importante, pues está relacionado con el contenido de humedad óptimo para efectuar la labranza. El laboreo del suelo en estado plástico o con una consistencia dura provoca siempre condiciones desfavorables, ya que a bajos contenidos de humedad las partículas no se unen y, por lo tanto, no toman agregados; y a altos contenidos de humedad, al secarse el suelo produce terrones grandes y

compactos, el suelo debe manipularse a un contenido de humedad de consistencia friable.

Según Raper & Erbach (1990) para un suelo dado, la distribución de la compactación en el perfil es función de la carga aplicada, la presión ejercida por el rodado, el estado de humedad y la intensidad de tránsito recibida.

Smith & Dickson (1990) informaron que la compactación superficial se produce por la presión en la zona de contacto rueda-suelo, pero la subsuperficial es producida por el peso total del equipo.

Al respecto la empresa John Deere, (2000) dice que se debe tener en cuenta que es preferible tener una compactación (inevitable), uniformemente distribuida en el lote, a tener pocas huellas muy profundas.

Ewa A. Czyż, (2004) realizó un estudio en varios suelos para cuantificar los efectos del tráfico de maquinaria agrícola sobre la aireación del suelo, la densidad aparente y crecimiento de la cebada. En este estudio se dice que las vueltas repetidas por un tractor en terreno plano de solamente cerca de 2 toneladas de peso, puede producir condiciones de suelo en el cual la aireación puede estar limitada para el crecimiento del cultivo.

El uso de llantas dobles pueden producir resultados más bajos de densidad aparente del suelo, asociado a una aireación más grande.

Concluye que la aireación del suelo es una componente muy importante dentro de las cualidades físicas del suelo.

2.6 Métodos empleados para estimar la permeabilidad del aire de un suelo.

Los Cuerpos de Ingeniería del Ejército de Estados Unidos (USACE), (2002) describen varios métodos que se usan para estimar la permeabilidad del aire de un suelo dado. Mencionan que las estimaciones de la permeabilidad del aire se requieren para predecir o para evaluar el funcionamiento de un sistema usando los modelos

analíticos y numéricos disponibles. Los métodos que describen para estimar la permeabilidad del aire del suelo son: método indirecto, de laboratorio y el método de campo.

2.6.1 Método indirecto

La permeabilidad del aire se puede estimar en función de la conductividad hidráulica saturada. La permeabilidad intrínseca se puede obtener a partir de la definición de la conductividad hidráulica saturada como:

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

Donde:

K_i = permeabilidad intrínseca (m^2)

K = conductividad hidráulica saturada (m/s)

μ = viscosidad dinámica del agua (gr/m-s)

ρ = densidad del agua (gr/cm^3)

g = constante de gravitación (m/s^2)

2.6.2 Métodos de laboratorio

Distribución del tamaño del grano. **La permeabilidad del aire en función del radio medio del poro se puede estimar muy aproximadamente, a través de los análisis de tamaño de grano realizados en muestras del suelo usando la siguiente relación:**

$$K_i = 0.125 r^2$$

Donde: K_i = 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 grano para el cual 15% por peso de partículas son pequeñas.

Entonces combinando la ecuaciones anteriores tenemos:

$$K = 1.250 D_{15}^2$$

Desventajas del método distribución del tamaño del grano: Según el USACE, este método tiene ciertas limitaciones porque las muestras colectadas de profundidades discretas pueden no ser representativas de la zona no saturada en su totalidad. Esto es especialmente cierto al procurar predecir la distribución de tamaño del poro de la distribución de tamaño de grano. Los datos del tamaño de grano revelan poco, acerca de la presencia de características estructurales tales como macroporos, grietas o huecos

finos, los cuales son caminos de menos resistencia para la circulación de aire.

Prueba de la columna: Otro método de laboratorio es la prueba de columna, en la cual un permeámetro es sujeto a un gradiente de presión y mediante esto se puede también estimar la permeabilidad del aire de un suelo dado.

Desventajas del método de la prueba de la columna: Los estudios del laboratorio tales como la prueba de la columna se pueden limitar por dependencia de la escala, y así los resultados no se pueden extrapolar fácilmente a un diseño escala-campo. Similarmente, las pruebas de la columna realizadas en suelos de grano fino tales como estiércol y arcilla sugieren generalmente que es posible que circule poco o nada de aire bajo variedad de vacíos. Sin embargo, los estudios en el campo conducidos en estos tipos del suelo pueden revelar que la circulación de aire significativa puede ser alcanzado debido a los macroporos, a las zonas secundarias de la permeabilidad tales como fracturas, y a la heterogeneidad del suelo.

Cabe señalar que en la mecánica de suelos, más enfocado a ingeniería civil, este método no les sirve mucho; pero desde el punto de vista agronómico este método adquiere mucha importancia, ya que en estudios hechos por Perdok y Hendrikse (1982), relacionados con la labranza, revelan que la permeabilidad del aire de un suelo, por medio de este método, da una estimación más realista porque proporciona el área de poros que un suelo tiene y en base a esto correlacionado con el contenido de humedad se puede determinar cuando un suelo todavía está laborable sin riesgo de que se compacte.

2.6.3 Método de campo

Prueba de la bomba neumática: La prueba de la bomba neumática ofrece una alternativa para calcular la permeabilidad del aire. Esta prueba tiende a proveer una estimación más realista de la permeabilidad del aire y es capaz de caracterizar una larga porción de la zona no saturada en cada localización de la prueba. Muchos investigadores han desarrollado soluciones transitorias de estado estable de flujo de aire, los cuales pueden ser usados para el análisis de la prueba de la bomba neumática.

2.7 Métodos aproximados para estimar el límite superior de laborabilidad del suelo.

Existen métodos que dan una estimación aproximada del límite superior de laborabilidad, entre los cuales están: el método manual para el cálculo del límite inferior de plasticidad y los métodos para medir la capacidad de campo.

2.7.1 Método manual para calcular el límite inferior de plasticidad (LIP).

Olarte, et al. (1979) dicen que el límite inferior de plasticidad se puede realizar de manera manual mediante el siguiente procedimiento:

Tome cerca de 15 grs de suelo seco que haya pasado por un tamiz número 40, coloque la muestra en la vasija de evaporación y mezcle completamente con agua

destilada hasta que pueda ser fácilmente moldeada en forma de bola, tome una porción de esta bola y pese cerca de 8 grs; comprima y enrolle la masa de suelo entre los dedos y una lámina de vidrio, o sobre una superficie lisa, horizontal, con una presión que sea justamente la suficiente para preparar la masa en rollos con un diámetro uniforme a través de toda su longitud.

Cuando el diámetro del rollo llegue a 1/8" rómpalo en 6 u 8 pedazos; comprima los pedazos conjuntamente con los dedos hasta que obtenga una masa uniforme.

Vuelva a enrollar el suelo hasta 1/8" y repita el procedimiento hasta que los rollos se desmoronen y el suelo no pueda trabajarse más, recoja los pedazos y colóquelos en una cápsula de humedad, péselos y séquelos a 105 °C por 24 horas o hasta peso constante.

Encuentre el peso de suelo seco y posteriormente el contenido de humedad, el cual será el límite inferior de plasticidad de ese suelo.

2.7.2 Capacidad de Campo(CC).

La capacidad de campo es un parámetro que también da una estimación aproximada al LSL, pero está un poco más alejada (Simelanga and Have, 1992), ya que es un concepto más enfocado a la irrigación.

Los métodos que existen para la determinación de la CC son: método de campo o gravimétrico, ollas de presión y equivalente de humedad (Rojas y Ramírez, 1999).

2.8 Método de la permeabilidad del aire para estimar el límite superior de laborabilidad.

El límite superior de laborabilidad se puede determinar en laboratorio mediante un permeámetro de aire, el procedimiento es el siguiente:

Una muestra es preparada llenando completamente un cilindro de acero 100 cm^3 con partículas de suelo de tamaño 2.4 a 4.0 mm (una masa de aproximadamente 80 g). La muestra es comprimida gradualmente de arriba hacia abajo (por medio una prensa manual o automática) hasta alcanzar una presión de 4 bars. 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 haya rebotado. Después de esto, la permeabilidad del aire es medida por medio de un permeámetro de aire (Perdok and Hendrikse, 1982).

Este método, agronómicamente, es mucho más confiable porque no aproxima los valores del LSL, sino que estima el área de poros en m^2 que el suelo tiene, tomando como límite $1 \times 10^{-12} \text{m}^2$, y mediante esto se puede establecer con más precisión cuando debemos realizar las operaciones de labranza.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Identificación de dos texturas de suelo.

Para iniciar la investigación se identificaron dos texturas de suelo de uso agrícola del DDR Saltillo, se tomaron muestras y se llevaron al laboratorio para determinarles textura y porcentaje de materia orgánica.

3.2 Preparación y procesamiento de las muestras.

Una vez identificados los suelos y posteriormente analizados en el laboratorio las muestras fueron preparadas pasándolas a través de dos tamices de 2.4 y 4.0 mm de

abertura respectivamente (Fig. 3.1) de tal manera que quedaran agregados entre 2.4 y 4.0 mm de DMA (Diámetro Medio de Agregados). El tamizado se realizó en campo tal y como se muestra en la Fig 3.2.



Fig. 3.1 Tamices de 2.4 y 4.0 mm



Fig. 3.2 Tamizado en campo

En la figura 3.3 se puede observar suelo que quedó en el tamiz de 2.4 mm el cual tiene agregados de 2.4 a 4.0 mm de DMA, que es precisamente el rango que interesa estudiar. En la Fig. 3.4 se muestra suelo ya tamizado, ambas figuras corresponden a los dos tipos de suelo en estudio.



Fig. 3.3 Suelos de 2.4 a 4.0 mm de DMA.



Fig. 3.4 Suelo tamizado

Una vez tamizado el suelo, se prepararon las muestras a diferentes contenidos de humedad, desde suelo seco hasta plástico, mediante el siguiente procedimiento:

Se pesaron 1000 gr de suelo con la balanza de precisión (Fig. 3.5) y se colocaron en una bolsa de plástico, después de esto se le agregó agua por medio de un aspersor hasta obtener la humedad requerida, lo anterior se realizó por medio de la fórmula:

$$M_w = \frac{(\%H * P_{ss})}{100}$$

Donde:

M_w = Peso del agua(gr)

$\%H$ = Porcentaje de humedad requerida(%)

P_{ss} = Peso del suelo seco(gr)



Fig. 3.5 Balanza de precisión.

3.4 Contenido de humedad de las muestras.

Para la preparación de las muestras, éstas fueron asperjadas con una cantidad de agua calculada, para obtener una humedad específica (método descrito arriba); sin embargo debido a que se presentó heterogeneidad en la humedad, se determinó en cada muestra el contenido de humedad preciso por medio del método gravimétrico, donde ya era conocido el peso del suelo húmedo (P_{sh}) al momento de pesar las muestras antes de compactarlas. Para el caso del peso de suelo

seco (P_{ss}), después de realizarles la prueba de permeabilidad del aire a las muestras, se llevaron a la estufa y fueron sometidas a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, transcurrido el tiempo se retiraron de la estufa y fueron pesadas nuevamente, y así obtuvimos el peso del suelo seco.

Obtenidos estos valores, el contenido de humedad se calculó con la fórmula:

$$\%H = \left[\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right] * 100$$

Donde:

% H= contenido de humedad (%)

P_{sh} = peso del suelo húmedo (gr)

P_{ss} = peso del suelo seco (gr)

3.3 Compactación de las muestras.

Una vez obtenidas las humedades requeridas de cada suelo; se procedió a la compactación de las muestras. El procedimiento seguido fue el siguiente:

Primero se pesaron el cilindro, el capacillo y la placa rectangular (ésta fue usada como apoyo para que la muestra no se disturbara al momento de compactar), luego se llenó completamente el cilindro con suelo tamizado; una vez llenado se pesó, y posteriormente la muestra fue llevada a la prensa neumática simuladora de compactación previamente calibrada. La muestra fue comprimida gradualmente de arriba hacia abajo hasta que alcanzara una presión de 4 bars. Tal y como lo muestra la fig 3.6. Este valor según Perdok y Hendrikse (1982), es utilizado con el objeto de simular carga por el paso de maquinaria agrícola.



Fig. 3.6 Prensa neumática

3.5 Prueba de permeabilidad del aire.

La muestra, previamente compactada fue llevada al permeámetro de aire (fig 3.7), una vez colocada se midió el tiempo que tardó el flotador en recorrer 5 cm. de la barra conductora, también se midió la temperatura ambiente usada para determinar la viscosidad del aire.

La altura después de la compresión fue calculada midiendo la distancia de la parte de arriba del cilindro hasta el suelo comprimido por medio de un micrómetro una vez que el suelo ya hubiera rebotado.

Teniendo los valores anteriores, la permeabilidad del aire fue calculada por medio de la fórmula, Kmoch (1962):

$$K_a = V \eta L t^{-1} A^{-1} P^{-1}$$

Donde:

K_a = permeabilidad intrínseca para flujo de aire(m^2)

V = volumen de aire(m^3)

η = viscosidad dinámica del aire ($Pa \cdot s$)

L = Longitud de la muestra comprimida(m)

t = tiempo que tardó el flotador en recorrer 5 cm(s)

A = Área de sección transversal de la muestra(m^2)

P = Presión del aire (N/m^2).

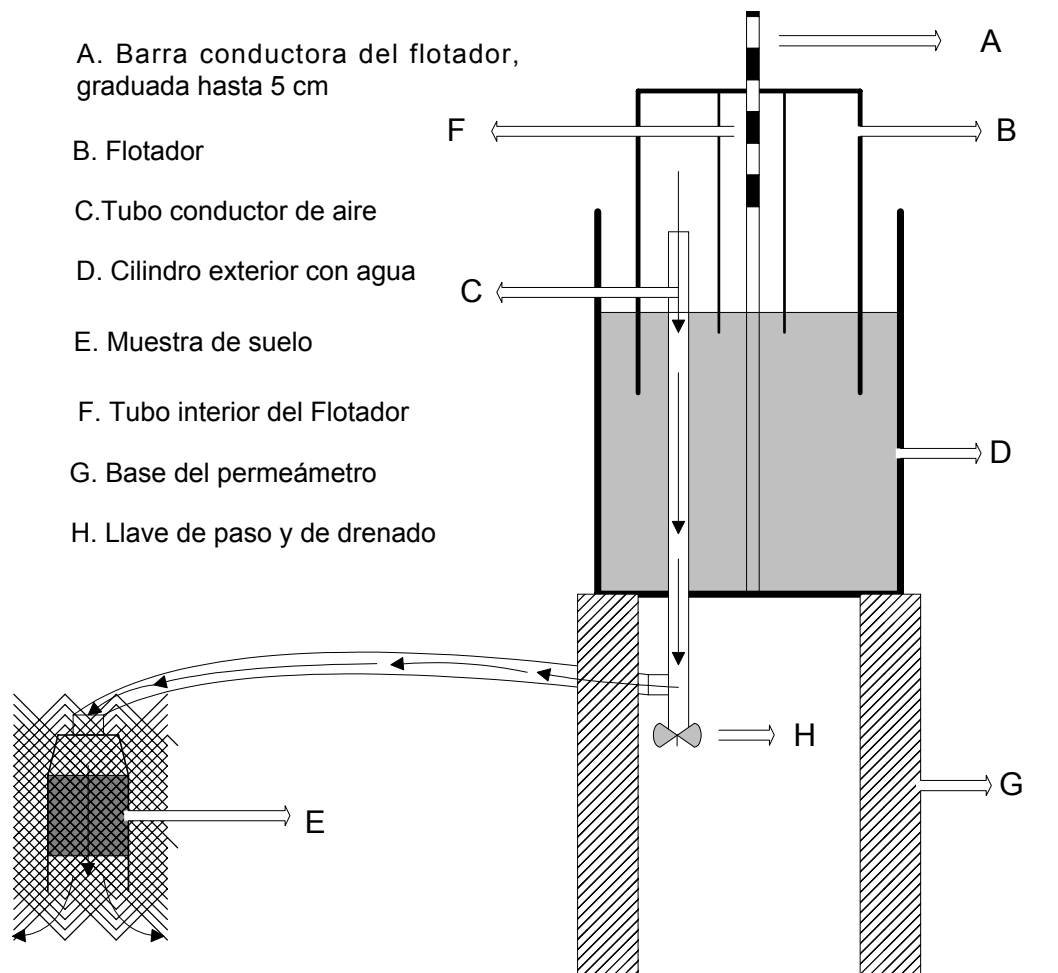


Fig. 3.7 Permeámetro de aire y descripción de sus partes.

3.6 Densidad aparente inicial (DAI) y densidad aparente después de la compresión (DAF).

La densidad aparente inicial fue estimada para tenerla como referencia al momento de compactar la muestra, como los agregados estaban muy sueltos la densidad aparente inicial se esperaba que fueran valores muy bajos. Para el cálculo de la DAI se usó la siguiente fórmula:

$$\text{DAI} = P_{ss} / V_t$$

Donde:

DAI = densidad aparente inicial(gr/cm^3)

P_{ss} = peso del suelo seco(gr)

V_t = volumen total de la muestra(cm^3).

Para el cálculo de la densidad aparente final (DAF) se utilizó el dato de la altura de compresión, la cual fue medida con el micrómetro; el peso de suelo seco fue el mismo que se utilizó en la DAI, siendo la única variación el volumen total de la muestra. Con estos datos se calculó la DAF con la misma fórmula utilizada para el cálculo de la DAI.

3.7 Porosidad

Para calcular el porcentaje de porosidad se usó la fórmula:

$$P = 100*(1 - Da*Dr^{-1})$$

Donde:

P = Espacio poroso(%)

Da = Densidad aparente(gr/cm^3)

Dr = Densidad real (igual a $2.65 \text{ gr}/\text{cm}^3$)

Al igual que en la densidad aparente aquí también resultaron dos porosidades: la inicial y la porosidad al final de la compresión, teniendo más importancia esta última, ya que como el suelo estaba muy suelto resultaba mucha porosidad inicial, por lo que después de la compactación la porosidad final resultó más significativa porque se le relacionó, al igual que la densidad aparente final, con el límite superior de laborabilidad.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ubicación geográfica.

Esta investigación se llevó a cabo en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, que se encuentra ubicado en la exhacienda de Buenavista, localizada a 7 km al sur de Saltillo, Coahuila, México, teniendo las siguientes coordenadas geográficas: 100° 59' 57" de longitud oeste, 25° 23' 42" de latitud norte y una altitud de 1743 msnm.

4.2 Características de los suelos en estudio.

El primer suelo seleccionado (Fig. 4.1) después de haber sido analizado en laboratorio se determinó que contiene 37.5 % de arena, 40.9 % de limo y 21.6 % de arcilla, y de acuerdo al triángulo de texturas del USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos) corresponde a un **Suelo Migajón** con 1.86 % de materia orgánica por lo que se considera mediano en M.O.



Fig. 4.1 Suelo de textura migajón.

El segundo suelo seleccionado (Fig. 4.2) después de haber sido analizado en laboratorio se determinó que contiene 32.5 % de arena, 33.4 % de limo y 34.1 % de arcilla y de acuerdo al triángulo de texturas del USDA corresponde a un suelo migajón-arcilloso con 2.09 % de materia orgánica por lo que se considera medianamente rico.



Fig. 4.2 Suelo de textura migajón-arcilloso

4.3 Resultados de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad, relacionados con el contenido de humedad para el suelo migajón.

En la metodología se describió como la muestra fue preparada, para después realizarle la prueba de permeabilidad del aire. Para el suelo de textura migajón se prepararon 7 humedades desde suelo seco hasta plástico éstas fueron: 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5 y 29 % (fig. 4.3) y se realizaron 8 repeticiones de permeabilidad del aire para cada una.



Fig. 4.3 Suelo migajón a diferentes contenidos de humedad.

4.3.1 Comportamiento de la permeabilidad del aire en relación con la humedad, para el suelo migajón.

En la fig. 4.4 se muestra la relación entre la humedad y la permeabilidad del aire, a partir de datos tomados en laboratorio, para el suelo migajón.

Los datos se ajustaron bien a una curva de primer orden (una recta) con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.93$, lo cual significa que existe una relación adecuada entre las variables en estudio. En la gráfica se puede ver claramente que a medida que el contenido de humedad va aumentando la permeabilidad del aire va disminuyendo hasta llegar al valor límite que es $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$, por medio del cual se puede predecir a qué humedad se encuentra el límite superior de laborabilidad, y así tomar decisiones adecuadas para las operaciones de labranza del suelo.

El límite superior de laborabilidad para este suelo se encontró a una humedad de 24.6 %, es decir, que este suelo nada más puede ser trabajado por debajo de este valor, de lo contrario tendremos problemas de compactación.

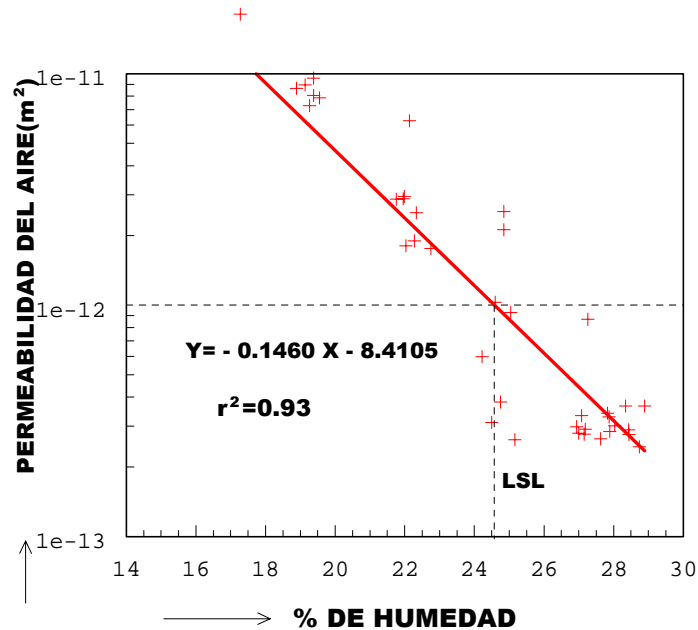


fig. 4.4 Límite superior de laborabilidad del suelo de textura migajón

4.3.2 Relación entre los cambios de densidad aparente con el contenido de humedad para el suelo migajón.

En la figura 4.5 se muestra el comportamiento de la densidad aparente inicial y final a medida que aumenta la humedad.

Los datos de densidad aparente inicial fueron ajustados a una recta, la cual muestra valores promedio de esta variable. Como la prueba de permeabilidad del aire fue estimada después de la compresión de las muestras, la densidad aparente más importante fue la final. Los datos se ajustaron bien a un polinomio de tercer orden con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.92$.

Si se relaciona el contenido de humedad límite para trabajar el suelo (LSL) con los valores de densidad aparente final, dará valores alrededor de 1.5 gr/cm^3 . Estudios hechos por Ewa A. Czyż (2004) reportaron que valores de

1.43 gr/cm³ de densidad aparente para un suelo de este tipo resultaron óptimos para el crecimiento de las raíces del cultivo de cebada.

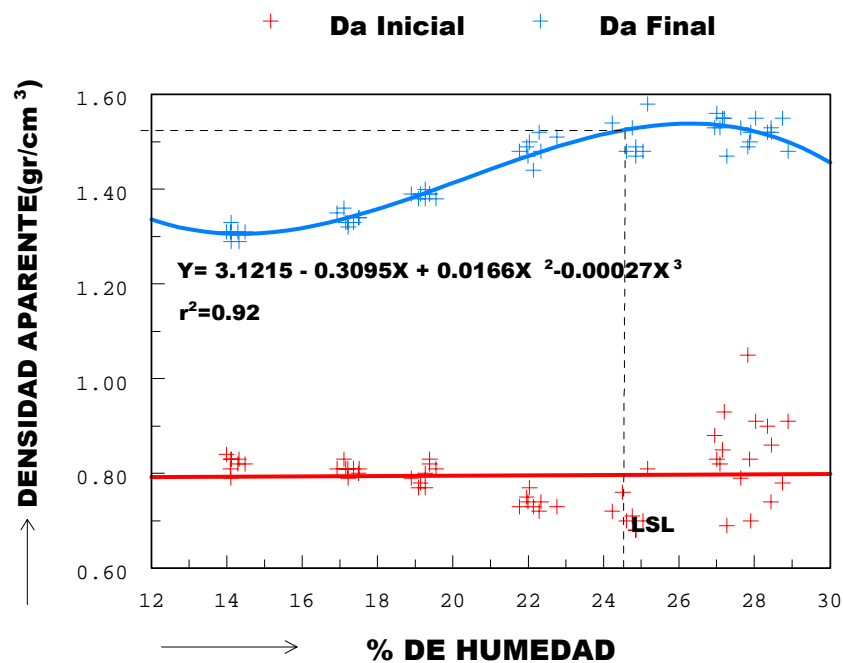


fig. 4.5 Comportamiento de la densidad aparente antes y después de la compactación a medida que la humedad fue en aumento.

4.3.3 Comportamiento de la porosidad antes y después de la compactación relacionada con la humedad en el suelo migajón.

La porosidad, al igual que en la densidad aparente, la que más interés fue la obtenida al final de la compresión, la fig. 4.6 ilustra como se comportó la porosidad a medida que la humedad fue en aumento.

Los valores de porosidad inicial, al igual que en la densidad aparente inicial, fueron ajustados a una recta, esto para obtener un promedio y poder observar los posteriores cambios después de la compresión de la muestra. Para el caso de la porosidad final, la regresión polinomial de tercer orden da

la predicción de los valores de porosidad final a medida que la humedad aumentó con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.92$.

Para este suelo, si se relaciona el LSL con la porosidad final, valores alrededor del 42 % resultan de espacio poroso.

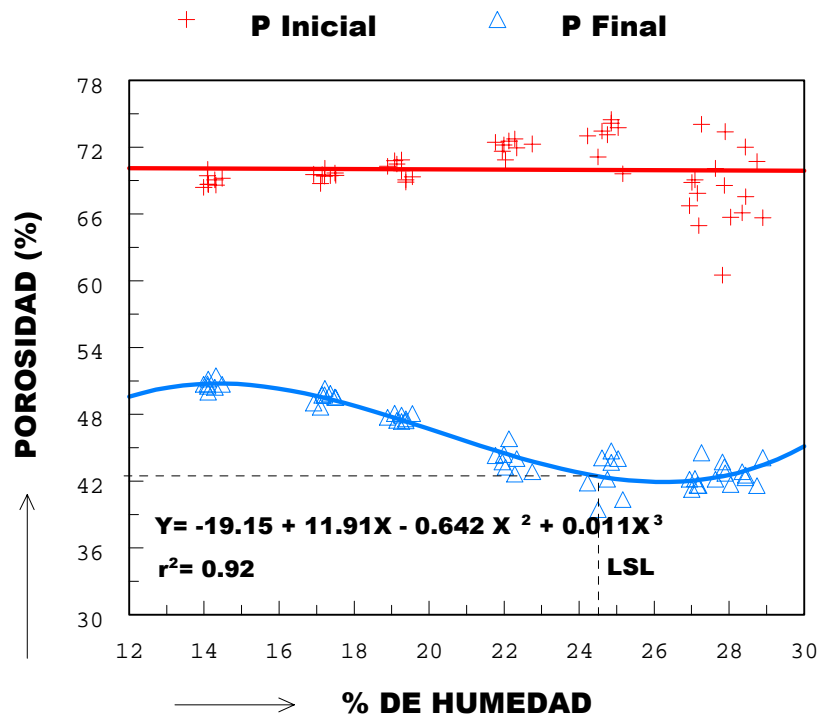


fig. 4.6 Relación entre humedad y porosidad antes y después de la compactación.

4.4 Resultados de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad, relacionados con el contenido de humedad para el suelo migajón-arcilloso.

Para el caso del suelo de textura migajón-arcilloso se establecieron porcentajes de humedades desde 12.5, 15, 17.5, 18, 19, 21, 23 y 25 (fig. 4.7) para obtener desde suelo seco hasta plástico. Se realizaron también ocho repeticiones de permeabilidad del aire para cada humedad.



Fig. 4.7 Suelo migajón-arcilloso a diferentes contenidos de humedad.

4.4.1 Comportamiento de la permeabilidad del aire con relación a la humedad para el suelo migajón-arcilloso.

En la fig. 4.8 se muestra la gráfica de regresión lineal donde se obtuvo un coeficiente de determinación $r^2 = 0.96$. Este valor nos indica que existe muy buena relación entre las variables estudiadas y se pueden hacer predicciones con bastante precisión.

Para este suelo el límite superior de laborabilidad se encontró a una humedad más baja, el motivo fue porque tiene más arcilla y ésta provoca que tenga más retención de agua.

El valor de humedad máxima al que todavía puede ser laborado este suelo sin riesgo de compactación (LSL) resultó en un 20.67%.

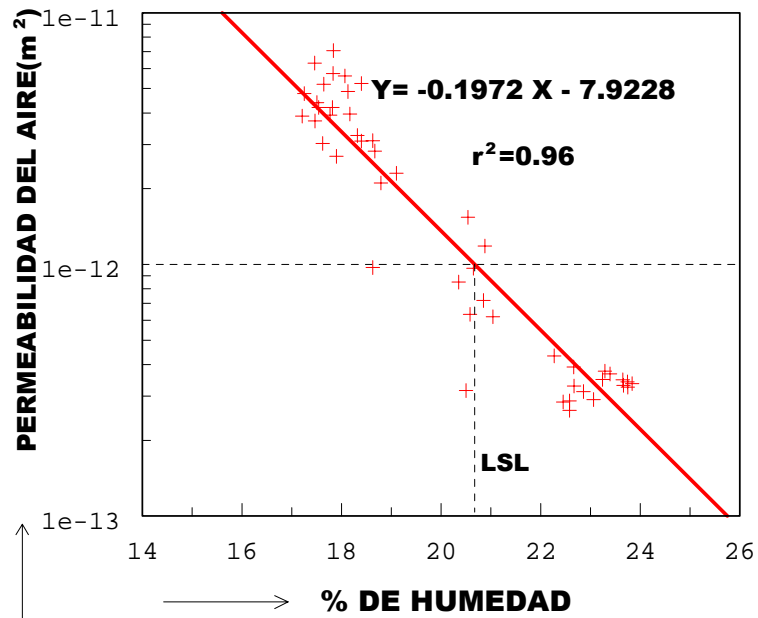


fig. 4.8 Límite superior de laborabilidad del suelo de textura migajón-arcilloso

4.4.2 Densidad aparente inicial y final relacionada con el contenido de humedad para el suelo migajón-arcilloso.

En la fig. 4.9 se puede observar los cambios de densidad aparente antes y después de la compactación.

Los datos de densidad aparente inicial fueron ajustados a una recta para tenerla como referencia y poder observar el cambio al momento de compactar la muestra. Para la densidad aparente final el polinomio de segundo orden proporciona la relación entre la humedad y la densidad aparente final con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.96$, este valor revela que los datos se ajustaron muy bien a este polinomio, por lo que se pueden hacer predicciones de humedad para saber valores de densidad aparente final con muy buena precisión.

Para el caso del límite superior de laborabilidad (20.67 % de humedad) se encuentran valores de densidad aparente final entre 1.5 y 1.6 gr/cm³.

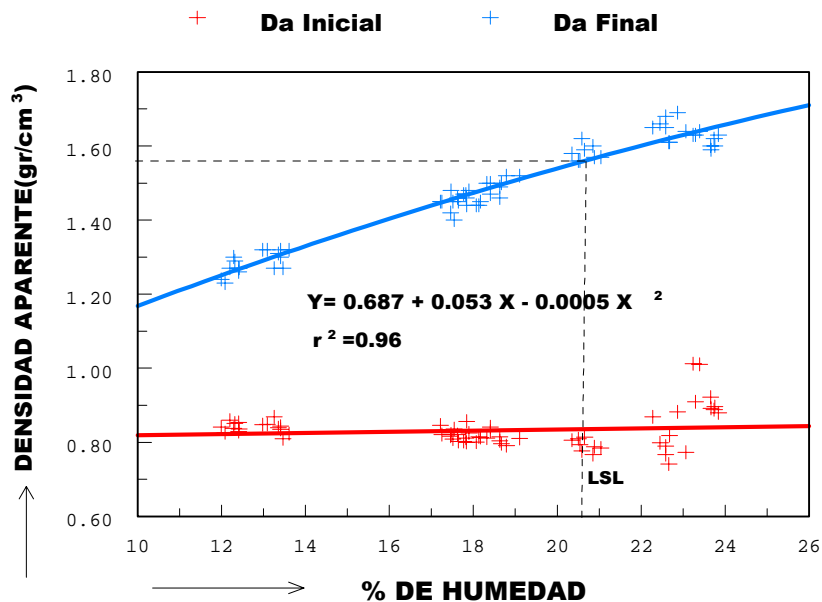


fig. 4.9 Comportamiento de la densidad aparente antes y después de la compresión relacionada con el aumento de humedad.

4.4.3 Relación entre los cambios de porosidad con respecto a la humedad para el suelo migajón-arcilloso.

La porosidad estimada al final de la compresión resultó más baja que la inicial, en la figura 4.10 se observa el comportamiento de las dos porosidades estimadas.

Los valores promedio de porosidad inicial se muestran en la recta y los de porosidad final en la curva de segundo grado.

El polinomio de segundo orden con un coeficiente de determinación $r^2 = 0.96$ indica que los datos se ajustaron muy bien a esta curva de regresión, con la cual se pueden hacer predicciones con muy buena precisión entre contenido de humedad y porosidad al final de la compactación.

Si se sustituye el dato del LSL, para este suelo, en la curva de regresión, es decir 20.67% de humedad, proporciona un resultado alrededor de 42 % de porosidad final.

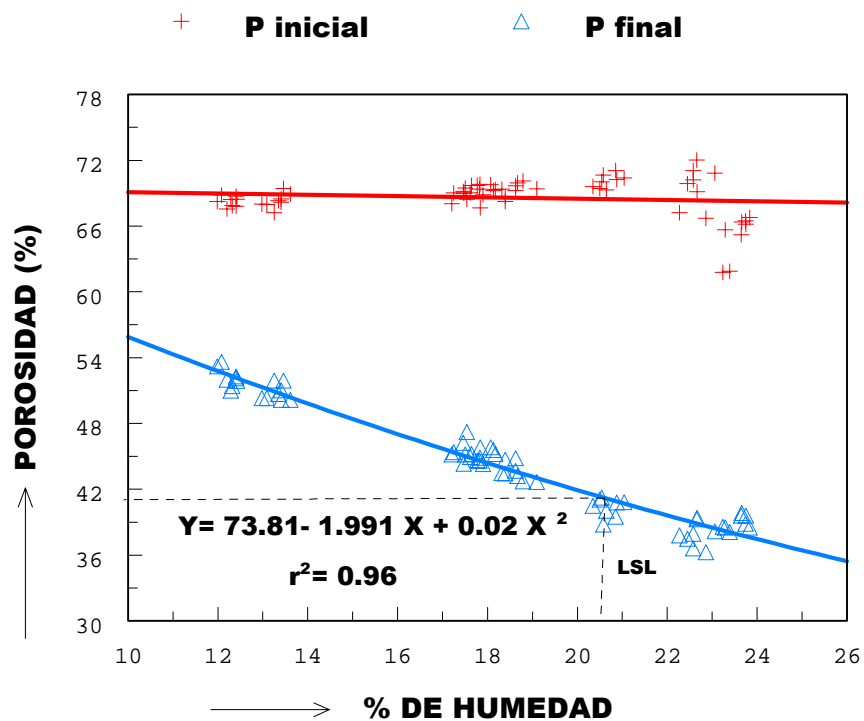


fig. 4.10 Porosidad antes y después de la compactación en relación con el contenido de humedad.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Con base en los resultados entre humedad y permeabilidad del aire para las dos texturas de suelo estudiadas, se puede concluir que la estimación en laboratorio del límite superior de laborabilidad por el método de la permeabilidad del aire es muy confiable, ya que se pudo representar adecuadamente y predecir con bastante precisión el contenido de humedad con el valor límite ($1 \times 10^{-12} \text{m}^2$) de permeabilidad del aire.
- De acuerdo al objetivo establecido se obtuvieron buenos resultados. En el caso del suelo de textura migajón se obtuvo un coeficiente de determinación $r^2 = 0.93$, este valor indica que se pueden hacer buenas predicciones del límite superior de laborabilidad, que para este suelo resultó en 24.6 % de humedad. Para el suelo de textura migajón-arcilloso se obtuvo un coeficiente de determinación $r^2 = 0.96$, el cual establece que existen también buenos resultados en cuanto a la relación entre los datos; y que se pueden hacer predicciones bastante exactas del límite superior de laborabilidad, el cual para este suelo resultó en un 20.67 % de humedad.

- De acuerdo con la hipótesis planteada se concluye que el límite superior de laborabilidad sí puede ser estimado con muy buena precisión en laboratorio, por medio del método de la permeabilidad del aire, el cual servirá para hacer recomendaciones acerca del estado máximo de humedad al que puede trabajarse el suelo sin riesgo de compactación.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere hacer más estudios de permeabilidad del aire en laboratorio para otras texturas de suelo, y así obtener los límites superiores de laborabilidad, si es posible, para todas las texturas de suelo, de tal manera que se tenga un banco de información disponible para hacer recomendaciones a los productores y de esta manera tener un sistema de producción más competitivo. Esto es muy importante porque en la actualidad, en México, los agricultores se basan en la experiencia para hacer las labores de preparación del suelo y no cuentan con información acerca de la humedad máxima a la cual deben trabajar el suelo sin riesgo de compactación.
- Otra recomendación es la de validar los valores obtenidos en este trabajo directamente en el campo, que es precisamente lo que sigue a esta investigación, de esta manera se tendrá una estimación más completa acerca del límite superior de laborabilidad tanto en laboratorio como en campo.
- Por último se sugiere también obtener en laboratorio el rango laborable de estas dos texturas de suelo, ya que lo que se obtuvo (LSL) es un componente del estado friable del suelo, faltaría entonces el límite seco de laborabilidad, o límite de contracción, con lo que se culminaría este trabajo, sólo para estas dos texturas de suelo.

VI. LITERATURA CITADA

Agroinformación, 2000. “La compactación del suelo” (documento web), http://www.abcagro.com/riego/compactacion_suelos.asp (consultada el 15 octubre 2004).

Ashburner, J. E. y Sims, B. G. 1984. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. Ed. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura(IICA), San José, Costa Rica, 473 pp.

Baver L. D., Gardner W. H. y Gardner, W. R. 1980. Física de suelos 1^a. Ed. En español, México. Unión tipográfica Editorial Hispano-Americana, S. A., 529 pp.

Breland T. A. and Hansen S., 1996. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biology Biochemistry*. Amsterdam, Netherlands. Ed. Elsevier. v.28, n.4, p.655-663.

Cadena Zapata, M., 1999. Soil Workability as a basis for advice on tillage activities. Ph. D. Thesis. Wageningen University, The Netherlands, pp 144.

Cadena Zapata, Campos Magaña, Narro Farías, Gaytán Muñoz, 2002. Determinación del estado de humedad para una mínima aplicación de energía en laboreo con tracción motriz. *Terra* 21.

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

D. Foth Henry, 1986. Fundamentos de la ciencia del suelo. Editorial CECSA, 2ª reimpresión, México. pp 443.

Departamento de Organización Territorial y Medio Ambiente (D.O.T. y M.A.), 2001. (Documento web).

http://www.euskadi.net/vima_suelo/compactacion_c.htm#medidas (consultada el 10 de septiembre de 2004).

Dexter A.R. and M. Birkas, 2004. Prediction of the soil structures produced by tillage. Soil and Tillage research, 79. 153-166 pp.

Ewa A. Czyż, 2004 Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. Soil and Tillage Research, 79. 129-133.

FAO, 1993. Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture. Rome, FAO Soils Bulletin 52.

FAO. 1977. "Guía para la descripción de perfiles de suelos". FAO. 70 pp. Roma. (Documento web) <http://www.unex.es/edafo/ECAL3Consistencia.htm> (consultada el 24 de septiembre de 2004).

Gavande Sampat A., 1982. Física de suelos principios y aplicaciones Ed. Limusa. 4ª reimpresión, México. pp 351.

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.

Herve, N. 1993. Decisiones de labranza, consecuencias sobre el suelo y los cultivos. Problemática del altiplano boliviano. Revista de Agricultura Boliviana, 50(24), 12-22.

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 74. 169-178.

John Deere, 2000. “Como prevenir la compactación”. Documento web.
http://www.deere.com.ar/es_AR/ag/homepage/consejo/cs021_TractorDT.html
(consultada el 10 de octubre de 2004).

Kmoch, H. G., 1962. Die Luftdurchlässigkeit des Bodens, ihre Bestimmung und ihre Bedeutung für einige ackerbauliche Probleme. Bornträger, Berlin Germany, 90 pp.

Mott Robert L., 1996. Mecánica de fluidos aplicada. Ed. Prentice Hall, 4^a edición, México. pp. 572

Olearte R. Luis, et al., 1979. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 4^a edición. Bogotá Colombia, pp. 664.

Ortiz Villanueva B. y Ortiz Solorio C. A., 1990. Edafología., 7^a edición, Universidad Autónoma Chapingo, México. pp 394.

Perdok U.D., Hendrikse L. M., 1982. Workability test procedure for arable land.
In: Proceedings of the Ninth International Conference on ISTRO, Osijek, Yugoslavia, June 21-25, 1982, pp. 511-519.

Rapper R. and Erbach D., 1990. Prediction of soil stresses using the finite element method. Transaction of the ASAE. St. Joseph, v.33, n.3, p.725-730.

Rojas Peña L., Ramírez Ramos L. E., 1999. Uso y manejo del agua. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 1ª reimpresión, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. pp. 146.

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.

Simelanga, T. E. and H. Have, 1992. Estimation of soil tillage work days in a semiarid area. J. agric. Engng. Res., 51: 81-89.

Smith D. L., Dickson J.W., 1990. Contributions of weight and ground pressure to soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, UK . v.43, p.13-29.

Thomasson, A. J., 1982. Soil and climatic aspects of workability and trafficability. Proceedings of the 9th Int. Conf. ISTRO, Osijek, Yugoslavia. Pp. 551-557.

U. S. Army Corps of Engineers, 2002, Apendix D. (Documento web), <http://www.usace.army.mil/net/usace-docs/eng/manuals/em1110-1-4001/a-d.pdf> (consultada el 24 de agosto de 2004)

Voorhees, W.B., 1989. Root activity related to shallow and deep compaction. In: Lasson, L.E. (ed.) Mechanics and related processes in structured agricultural soil. Morris, MN: Kluwer Academic Publishers. pp.173-186.

VII. ANEXOS

ANEXO 2.

Resultados obtenidos de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad para el suelo de textura migajón.

ANEXO 3.

Resultados obtenidos de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad para el suelo de textura migajón-arcilloso.

ANEXO 1.

Viscosidad del aire a diferentes temperaturas.

Temperatura(°C)	Viscosidad(Pa*s)
-40	1.51E-05
-30	1.56E-05
-20	1.62E-05
-10	1.67E-05
0	1.72E-05
10	1.77E-05
20	1.81E-05
30	1.86E-05
40	1.91E-05
50	1.95E-05
60	1.99E-05
70	2.04E-05
80	2.09E-05
90	2.13E-05
100	2.17E-05
110	2.22E-05
120	2.26E-05

Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de fluidos aplicada.

Ecuación de regresión lineal:

$$Y = 1.712941176 \cdot 10^{-5} + 4.647058824 \cdot 10^{-8} X$$

$$\text{Con } r^2 = 0.99$$

RESULTADOS DE PERMEABILIDAD DEL AIRE EN EL SUELO DE TEXTURA MIGAJÓN.

Tabla 2.1

Fecha: 27/Oct/04

1ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	48k	91.7	80.1	14.48	23.9	1.82E-05	0.031225	4.65E-04	1.9
2	135k	91.2	77.8	17.22	23.9	1.82E-05	0.03009	4.65E-04	1.9
3	292k	96.7	81	19.38	23.9	1.82E-05	0.0296	4.65E-04	1.9
4	52k	87.3	71.70	21.76	24	1.82E-05	0.02474	4.65E-04	1.9
5	41k	85.4	68.3	25.04	24.1	1.82E-05	0.02345	4.65E-04	1.9
6	141k	85.9	67.5	27.26	24.2	1.83E-05	0.02339	4.65E-04	1.9
7	79k	93.5	72.8	28.43	24.4	1.83E-05	0.02425	4.65E-04	1.9

Tabla 2.2

Fecha: 27/Oct/04

2ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	147k	89	78	14.10	24.4	1.83E-05	0.03029	4.65E-04	1.9
2	289k	92.6	79.2	16.92	24.5	1.83E-05	0.02985	4.65E-04	1.9
3	304k	91.9	77.3	18.89	24.5	1.83E-05	0.02842	4.65E-04	1.9
4	291k	88.2	72.3	21.99	24.5	1.83E-05	0.02499	4.65E-04	1.9
5	312k	83.9	67.2	24.85	24.4	1.83E-05	0.02293	4.65E-04	1.9
6	308k	88.5	69.2	27.89	24	1.82E-05	0.02322	4.65E-04	1.9
7	71k	104.6	81.8	27.87	24	1.82E-05	0.02771	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,

V = Volumen del cilindro, A= Área de la muestra, t= Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

Tabla 2.3

Fecha: 28/Oct/04

3ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	55k	93	81.5	14.11	24	1.82E-05	0.03207	4.65E-04	1.9
2	285k	92.9	79.3	17.15	24	1.82E-05	0.03032	4.65E-04	1.9
3	282k	90.4	75.8	19.26	24.1	1.82E-05	0.02797	4.65E-04	1.9
4	50k	87.2	71.4	22.13	24	1.82E-05	0.02532	4.65E-04	1.9
5	73	86.1	69.1	24.60	24.1	1.82E-05	0.02375	4.65E-04	1.9
6	44k	109.8	86.5	26.94	24.6	1.83E-05	0.02874	4.65E-04	1.9

7	310k	98.1	76.2	28.74	24.5	1.83E-05	0.02507	4.65E-04	1.9
---	------	------	------	-------	------	----------	---------	----------	-----

Tabla 2.4

Fecha: 28/Oct/04

4ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	58k	93.7	82.2	13.99	24.4	1.83E-05	0.03204	4.65E-04	1.9
2	290	93.3	79.6	17.21	24.3	1.83E-05	0.03043	4.65E-04	1.9
3	138k	90.5	76	19.08	24.4	1.83E-05	0.02813	4.65E-04	1.9
4	131k	90	73.8	21.95	24.2	1.83E-05	0.0252	4.65E-04	1.9
5	151	82.9	66.4	24.85	24.1	1.82E-05	0.02308	4.65E-04	1.9
6	121k	99.3	77.8	27.63	24	1.82E-05	0.02585	4.65E-04	1.9
7	139k	115.1	89.3	28.89	24	1.82E-05	0.0307	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,

V = Volumen del cilindro, A= Área de la muestra, t= Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

Tabla 2.5

Fecha: 29/Oct/04

5ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	65k1	93	81.5	14.11	24.1	1.82E-05	0.03131	4.65E-04	1.9
2	65k	93.3	79.5	17.36	24.2	1.83E-05	0.03049	4.65E-04	1.9
3	300k	91.5	76.8	19.14	24.3	1.83E-05	0.02809	4.65E-04	1.9
4	295k	86.7	70.9	22.28	24.3	1.83E-05	0.02375	4.65E-04	1.9
5	298k	93.5	75.1	24.50	24.3	1.83E-05	0.02383	4.65E-04	1.9
6	70k	102.3	80.5	27.08	24.3	1.83E-05	0.02677	4.65E-04	1.9
7	143k	113.2	88.2	28.34	23.8	1.82E-05	0.02965	4.65E-04	1.9

Tabla 2.6

Fecha: 31/Oct/04

6ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	156k	92	80.5	14.29	22.6	1.82E-05	0.03121	4.65E-04	1.9
2	42k	95.2	81.3	17.10	22.8	1.82E-05	0.03042	4.65E-04	1.9
3	319k	93.5	78.4	19.26	22.9	1.82E-05	0.02862	4.65E-04	1.9
4	154k	92.5	75.8	22.03	23.1	1.82E-05	0.02567	4.65E-04	1.9

5	284k	87.2	69.9	24.75	23.4	1.82E-05	0.02323	4.65E-04	1.9
6	77k	103	81.1	27.00	23.4	1.82E-05	0.02653	4.65E-04	1.9
7	134k	108.4	84.4	28.44	23.7	1.82E-05	0.02823	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,
V = Volumen del cilindro, A= Área de la muestra, t=Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

Tabla 2.7

Fecha: 31/Oct/04

7ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	75k	90.7	79.5	14.09	24	1.82E-05	0.03101	4.65E-04	1.9
2	69k	93.3	79.4	17.51	24	1.82E-05	0.03022	4.65E-04	1.9
3	309k	96.1	80.5	19.38	24	1.82E-05	0.02952	4.65E-04	1.9
4	158	89.3	73	22.33	24.1	1.82E-05	0.02506	4.65E-04	1.9
5	56k	87.2	70.2	24.22	24.4	1.83E-05	0.02319	4.65E-04	1.9
6	129k	106.3	83.6	27.15	24.6	1.83E-05	0.02753	4.65E-04	1.9
7	59k	114.2	89.2	28.03	24.3	1.83E-05	0.0294	4.65E-04	1.9

Tabla 2.8

Fecha: 31/oct/04

8ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	150k	93.4	81.7	14.32	24	1.82E-05	0.03235	4.65E-04	1.9
2	136k	92.7	78.9	17.49	24	1.82E-05	0.03005	4.65E-04	1.9
3	78k	95.4	79.8	19.55	24	1.82E-05	0.02953	4.65E-04	1.9
4	307k	88.5	72.1	22.75	24.1	1.82E-05	0.02424	4.65E-04	1.9
5	51k	99	79.1	25.16	24.4	1.83E-05	0.02548	4.65E-04	1.9
6	137k	116	91.2	27.19	24.6	1.83E-05	0.03	4.65E-04	1.9
7	64k	131.4	102.8	27.82	24.3	1.83E-05	0.03509	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,
V = Volumen del cilindro, A = Área de la muestra, t =Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

RESULTADOS DE DENSIDAD APARENTE ANTES Y
DESPUÉS DE LA COMPRESIÓN CORRESPONDIENTE AL
SUELO MIGAJÓN.

Tabla 2.9

Fecha: 27/Oct/04

1ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	48k	91.7	80.1	14.48	5	98.175	3.12	61.3
2	135k	91.2	77.8	17.22	5	98.175	3.01	59.1
3	292k	96.7	81.0	19.38	5	98.175	2.96	58.1
4	52k	87.3	71.70	21.76	5	98.175	2.47	48.6
5	41k	85.4	68.3	25.04	5	98.175	2.35	46.0
6	141k	85.9	67.5	27.26	5	98.175	2.34	45.9
7	79k	93.5	72.8	28.43	5	98.175	2.43	47.6

Tabla 2.10

Fecha: 27/Oct/04

2ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	147k	89	78	14.10	5	98.175	3.029	59.5
2	289k	92.6	79.2	16.92	5	98.175	2.985	58.6
3	304k	91.9	77.3	18.89	5	98.175	2.842	55.8
4	291k	88.2	72.3	21.99	5	98.175	2.499	49.1
5	312k	83.9	67.2	24.85	5	98.175	2.293	45.0
6	308k	88.5	69.2	27.89	5	98.175	2.322	45.6
7	71k	104.6	81.8	27.87	5	98.175	2.771	54.4

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i = Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i = Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

Tabla 2.11

Fecha: 28/Oct/04

3ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	55k	93	81.5	14.11	5	98.175	3.207	63.0
2	285k	92.9	79.3	17.15	5	98.175	3.032	59.5
3	282k	90.4	75.8	19.26	5	98.175	2.797	54.9
4	50k	87.2	71.4	22.13	5	98.175	2.532	49.7
5	73	86.1	69.1	24.60	5	98.175	2.375	46.6

6	44k	109.8	86.5	26.94	5	98.175	2.874	56.4
7	310k	98.1	76.2	28.74	5	98.175	2.507	49.2

Tabla 2.12

Fecha: 28/Oct/04

4ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	58k	93.7	82.2	13.99	5	98.175	3.204	62.9
2	290	93.3	79.6	17.21	5	98.175	3.043	59.7
3	138k	90.5	76	19.08	5	98.175	2.813	55.2
4	131k	90	73.8	21.95	5	98.175	2.52	49.5
5	151	82.9	66.4	24.85	5	98.175	2.308	45.3
6	121k	99.3	77.8	27.63	5	98.175	2.585	50.8
7	139k	115.1	89.3	28.89	5	98.175	3.07	60.3

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i = Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i = Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

Tabla 2.13

Fecha: 29/Oct/04

5ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	65k1	93	81.5	14.11	5	98.175	3.131	61.5
2	65k	93.3	79.5	17.36	5	98.175	3.049	59.9
3	300k	91.5	76.8	19.14	5	98.175	2.809	55.2
4	295k	86.7	70.9	22.28	5	98.175	2.375	46.6
5	298k	93.5	75.1	24.50	5	98.175	2.383	46.8
6	70k	102.3	80.5	27.08	5	98.175	2.677	52.6
7	143k	113.2	88.2	28.34	5	98.175	2.965	58.2

Tabla 2.14

Fecha: 31/Oct/04

6ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	156k	92	80.5	14.29	5	98.175	3.121	61.3
2	42k	95.2	81.3	17.10	5	98.175	3.042	59.7
3	319k	93.5	78.4	19.26	5	98.175	2.862	56.2

4	154k	92.5	75.8	22.03	5	98.175	2.567	50.4
5	284k	87.2	69.9	24.75	5	98.175	2.323	45.6
6	77k	103	81.1	27.00	5	98.175	2.653	52.1
7	134k	108.4	84.4	28.44	5	98.175	2.823	55.4

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i = Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i = Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

Tabla 2.15

Fecha: 31/oct/04

7ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	75k	90.7	79.5	14.09	5	98.175	3.101	60.9
2	69k	93.3	79.4	17.51	5	98.175	3.022	59.3
3	309k	96.1	80.5	19.38	5	98.175	2.952	58.0
4	158	89.3	73	22.33	5	98.175	2.506	49.2
5	56k	87.2	70.2	24.22	5	98.175	2.319	45.5
6	129k	106.3	83.6	27.15	5	98.175	2.753	54.1
7	59k	114.2	89.2	28.03	5	98.175	2.94	57.7

Tabla 2.16

Fecha: 31/oct/04

8ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	150k	93.4	81.7	14.32	5	98.175	3.235	63.5
2	136k	92.7	78.9	17.49	5	98.175	3.005	59.0
3	78k	95.4	79.8	19.55	5	98.175	2.953	58.0
4	307k	88.5	72.1	22.75	5	98.175	2.424	47.6
5	51k	99	79.1	25.16	5	98.175	2.548	50.0
6	137k	116	91.2	27.19	5	98.175	3	58.9
7	64k	131.4	102.8	27.82	5	98.175	3.509	68.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i = Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i = Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

RESULTADOS DE POROSIDAD ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPRESIÓN EN EL SUELO MIGAJÓN

Tabla 2.17

Fecha: 27/Oct/04
1ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	48k	91.7	80.1	14.48	0.82	1.31	2.65
2	135k	91.2	77.8	17.22	0.79	1.32	2.65
3	292k	96.7	81	19.38	0.83	1.39	2.65
4	52k	87.3	71.70	21.76	0.73	1.48	2.65
5	41k	85.4	68.3	25.04	0.70	1.48	2.65
6	141k	85.9	67.5	27.26	0.69	1.47	2.65
7	79k	93.5	72.8	28.43	0.74	1.53	2.65

Tabla 2.18
Fecha: 27/Oct/04
2ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	147k	89	78	14.10	0.79	1.31	2.65
2	289k	92.6	79.2	16.92	0.81	1.35	2.65
3	304k	91.9	77.3	18.89	0.79	1.39	2.65
4	291k	88.2	72.3	21.99	0.74	1.47	2.65
5	312k	83.9	67.2	24.85	0.68	1.49	2.65
6	308k	88.5	69.2	27.89	0.70	1.52	2.65
7	71k	104.6	81.8	27.87	0.83	1.50	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r= Densidad Real, P_i = Porosidad Inicial, P_f =Porosidad al final de la compresión.

Tabla 2.19
Fecha: 28/Oct/04
3ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	55k	93	81.5	14.11	0.83	1.29	2.65
2	285k	92.9	79.3	17.15	0.81	1.33	2.65
3	282k	90.4	75.8	19.26	0.77	1.38	2.65
4	50k	87.2	71.4	22.13	0.73	1.44	2.65
5	73	86.1	69.1	24.60	0.70	1.48	2.65
6	44k	109.8	86.5	26.94	0.88	1.53	2.65
7	310k	98.1	76.2	28.74	0.78	1.55	2.65

Tabla 2.20
Fecha: 28/Oct/04

4ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	58k	93.7	82.2	13.99	0.84	1.31	2.65
2	290	93.3	79.6	17.21	0.81	1.33	2.65
3	138k	90.5	76	19.08	0.77	1.38	2.65
4	131k	90	73.8	21.95	0.75	1.49	2.65
5	151	82.9	66.4	24.85	0.68	1.47	2.65
6	121k	99.3	77.8	27.63	0.79	1.53	2.65
7	139k	115.1	89.3	28.89	0.91	1.48	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r = Densidad Real, P_i = Porosidad Inicial, P_f = Porosidad al final de la compresión.

Tabla 2.21

Fecha: 29/Oct/04

5ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	65k1	93	81.5	14.11	0.83	1.33	2.65
2	65k	93.3	79.5	17.36	0.81	1.33	2.65
3	300k	91.5	76.8	19.14	0.78	1.39	2.65
4	295k	86.7	70.9	22.28	0.72	1.52	2.65
5	298k	93.5	75.1	24.50	0.76	1.61	2.65
6	70k	102.3	80.5	27.08	0.82	1.53	2.65
7	143k	113.2	88.2	28.34	0.90	1.52	2.65

Tabla 2.22

Fecha: 31/Oct/04

6ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	156k	92	80.5	14.29	0.82	1.31	2.65
2	42k	95.2	81.3	17.10	0.83	1.36	2.65
3	319k	93.5	78.4	19.26	0.80	1.40	2.65
4	154k	92.5	75.8	22.03	0.77	1.50	2.65
5	284k	87.2	69.9	24.75	0.71	1.53	2.65
6	77k	103	81.1	27.00	0.83	1.56	2.65
7	134k	108.4	84.4	28.44	0.86	1.52	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r = Densidad Real, P_i = Porosidad Inicial, P_f = Porosidad al final de la compresión.

Tabla 2.23

Fecha: 31/Oct/04

7ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	$Da_i(\text{gr/cm}^3)$	$Da_f(\text{gr/cm}^3)$	$Dr (\text{gr/cm}^3)$
1	75k	90.7	79.5	14.09	0.81	1.31	2.65
2	69k	93.3	79.4	17.51	0.81	1.34	2.65
3	309k	96.1	80.5	19.38	0.82	1.39	2.65
4	158	89.3	73	22.33	0.74	1.48	2.65
5	56k	87.2	70.2	24.22	0.72	1.54	2.65
6	129k	106.3	83.6	27.15	0.85	1.55	2.65
7	59k	114.2	89.2	28.03	0.91	1.55	2.65

Tabla 2.24

Fecha: 31/Oct/04

8ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	$Da_i(\text{gr/cm}^3)$	$Da_f(\text{gr/cm}^3)$	$Dr (\text{gr/cm}^3)$
1	150k	93.4	81.7	14.32	0.83	1.29	2.65
2	136k	92.7	78.9	17.49	0.80	1.34	2.65
3	78k	95.4	79.8	19.55	0.81	1.38	2.65
4	307k	88.5	72.1	22.75	0.73	1.51	2.65
5	51k	99	79.1	25.16	0.81	1.58	2.65
6	137k	116	91.2	27.19	0.93	1.55	2.65
7	64k	131.4	102.8	27.82	1.05	1.49	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r = Densidad Real, P_i = Porosidad Inicial, P_f = Porosidad al final de la compresión.

RESULTADOS DE PERMEABILIDAD DEL AIRE EN EL SUELO
MIGAJÓN-ARCILLOSO

Tabla 3.1

Fecha: 01/Nov/04

1ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	305k	92.3	82.1	12.42	22.9	1.819E-05	0.0328	4.65E-04	1.9
2	315k	91.8	80.8	13.61	22.8	1.819E-05	0.03115	4.65E-04	1.9
3	45k	92.5	78.5	17.83	23.1	1.820E-05	0.02737	4.65E-04	1.9
4	46k	92.8	78.6	18.07	23.2	1.821E-05	0.02789	4.65E-04	1.9
5	68k	92.3	77.7	18.79	23.3	1.821E-05	0.02608	4.65E-04	1.9
6	148k	91	75.3	20.85	23.5	1.822E-05	0.02392	4.65E-04	1.9
7	61k	98.5	80.3	22.67	23.6	1.823E-05	0.02547	4.65E-04	1.9
8	49k	108.2	87.5	23.66	23.8	1.824E-05	0.02795	4.65E-04	1.9

Tabla 3.2

Fecha: 01/Nov/04

2ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	67k	92.3	82.2	12.29	23.8	1.824E-05	0.03225	4.65E-04	1.9
2	302k	93	82	13.41	23.8	1.824E-05	0.03162	4.65E-04	1.9
3	283k	94.8	80.6	17.62	23.8	1.824E-05	0.02813	4.65E-04	1.9
4	293k	95.5	81	17.90	23.6	1.823E-05	0.02794	4.65E-04	1.9
5	142k	94.8	79.6	19.10	23.7	1.823E-05	0.02669	4.65E-04	1.9
6	125k	93.2	77	21.04	24	1.824E-05	0.025	4.65E-04	1.9
7	313k	93.4	75.9	23.06	24.1	1.825E-05	0.02359	4.65E-04	1.9
8	60k	108.9	88	23.75	24.2	1.825E-05	0.028	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,

V = Volumen del cilindro, A = Área de la muestra, t= Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

Tabla 3.3

Fecha: 01/Nov/04

3ª repetición

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	288k	94.7	84.4	12.20	19.2	1.802E-05	0.03377	4.65E-04	1.9
2	130k	90.2	79.5	13.46	19.6	1.804E-05	0.03177	4.65E-04	1.9
3	297k	96.5	82.1	17.54	19.7	1.804E-05	0.0299	4.65E-04	1.9
4	66k	93.9	79.7	17.82	19.6	1.804E-05	0.02765	4.65E-04	1.9
5	160k	94.9	80	18.63	19.6	1.804E-05	0.02788	4.65E-04	1.9
6	122k	95.8	79.5	20.50	19.8	1.805E-05	0.02592	4.65E-04	1.9

7	281k	95	77.5	22.58	19.7	1.804E-05	0.0235	4.65E-04	1.9
8	153k	111.9	90.5	23.65	19.8	1.805E-05	0.0288	4.65E-04	1.9

Tabla 3.4

Fecha: 02/nov/04

4ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	144k	90.9	81.1	12.08	20	1.806E-05	0.03359	4.65E-04	1.9
2	314k	94	83.2	12.98	19.8	1.805E-05	0.03218	4.65E-04	1.9
3	126k	93.3	79.4	17.51	20.2	1.807E-05	0.02783	4.65E-04	1.9
4	299k	92.8	78.8	17.77	19.6	1.804E-05	0.02736	4.65E-04	1.9
5	317k	96.5	81.5	18.40	19.9	1.805E-05	0.02769	4.65E-04	1.9
6	74	95.2	79.1	20.35	19.9	1.805E-05	0.02555	4.65E-04	1.9
7	140k	92.3	75.3	22.58	19.7	1.804E-05	0.02331	4.65E-04	1.9
8	54k	110.1	89.3	23.29	19.6	1.804E-05	0.02792	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,

V = Volumen del cilindro, A= Área de la muestra, t=Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

Tabla 3.5

Fecha: 02/Nov/04

5ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	43k	92.5	82.6	11.99	19.2	1.802E-05	0.03393	4.65E-04	1.9
2	318k	93.9	82.8	13.41	19.4	1.803E-05	0.0325	4.65E-04	1.9
3	133k	97.4	83.1	17.21	19.2	1.802E-05	0.02913	4.65E-04	1.9
4	132k	92.7	78.8	17.64	19.3	1.803E-05	0.02764	4.65E-04	1.9
5	157k	93.6	78.9	18.63	19.2	1.802E-05	0.02693	4.65E-04	1.9
6	127	92	76.3	20.58	19.3	1.803E-05	0.02395	4.65E-04	1.9
7	152k	89.3	72.8	22.66	18.7	1.800E-05	0.02304	4.65E-04	1.9
8	123k	107.9	87.2	23.74	18.5	1.799E-05	0.0274	4.65E-04	1.9

Tabla 3.6

Fecha: 02/Nov/04

6ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	146k	91.5	81.4	12.41	18	1.797E-05	0.03267	4.65E-04	1.9
2	76k	93.4	82.4	13.35	18	1.797E-05	0.03212	4.65E-04	1.9
3	80k	94.5	80.6	17.25	18.1	1.797E-05	0.02836	4.65E-04	1.9
4	303k	94.5	80	18.13	18.1	1.797E-05	0.02825	4.65E-04	1.9

5	311k	92.8	78.2	18.67	18.1	1.797E-05	0.02647	4.65E-04	1.9
6	149k	96.4	79.9	20.65	18.2	1.798E-05	0.02561	4.65E-04	1.9
7	72k	96	78.4	22.45	18.7	1.800E-05	0.02411	4.65E-04	1.9
8	47k	107	86.4	23.84	19	1.801E-05	0.027	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,
V = Volumen del cilindro, A= Área de la muestra, t=Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

Tabla 3.7

Fecha: 03/Nov/04

7ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	146k	93.9	83.6	12.32	19.6	1.804E-05	0.03305	4.65E-04	1.9
2	76k	96.6	85.3	13.25	19.6	1.804E-05	0.0341	4.65E-04	1.9
3	80k	94.8	80.7	17.47	19.6	1.804E-05	0.02786	4.65E-04	1.9
4	303k	94.3	79.8	18.17	19.5	1.804E-05	0.028	4.65E-04	1.9
5	311k	94.3	79.7	18.32	19.5	1.804E-05	0.0271	4.65E-04	1.9
6	149k	93.5	77.35	20.88	19.7	1.804E-05	0.02511	4.65E-04	1.9
7	72k	106.4	86.6	22.86	19.7	1.804E-05	0.02611	4.65E-04	1.9
8	47k	122.4	99.2	23.39	19.9	1.805E-05	0.0308	4.65E-04	1.9

Tabla 3.8

Fecha: 03/Nov/04

8ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	T(°C)	η_a (Pa*s)	L(m)	V(m ³)	A
1	296k	94.2	83.8	12.41	19.4	1.803E-05	0.03376	4.65E-04	1.9
2	159	94.2	83.3	13.09	19.7	1.804E-05	0.03222	4.65E-04	1.9
3	128k	94.2	80.2	17.46	19.7	1.804E-05	0.02867	4.65E-04	1.9
4	62k	99.1	84.1	17.84	19.9	1.805E-05	0.02983	4.65E-04	1.9
5	286k	97.8	82.6	18.40	19.6	1.804E-05	0.02871	4.65E-04	1.9
6	124k	93.9	77.9	20.54	19.9	1.805E-05	0.02548	4.65E-04	1.9
7	287k	104.3	85.3	22.27	20.1	1.806E-05	0.02636	4.65E-04	1.9
8	53k	122.5	99.4	23.24	20.1	1.806E-05	0.03111	4.65E-04	1.9

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, T= Temperatura ambiente, η_a = Viscosidad del aire, L= Longitud de la muestra,
V = Volumen del cilindro, A= Área de la muestra, t=Tiempo total, P= Presión del aire, Ka= Permeabilidad del aire.

RESULTADOS DE DENSIDAD APARENTE ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPACTACIÓN PARA EL SUELO MIGAJÓN-ARCILLOSO

Tabla 3.9

Fecha: 01/Nov/04

1ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	305k	92.3	82.1	12.42	5	98.175	3.28	64.40
2	315k	91.8	80.8	13.61	5	98.175	3.115	61.16
3	45k	92.5	78.5	17.83	5	98.175	2.737	53.74
4	46k	92.8	78.6	18.07	5	98.175	2.789	54.76
5	68k	92.3	77.7	18.79	5	98.175	2.608	51.21
6	148k	91	75.3	20.85	5	98.175	2.392	46.97
7	61k	98.5	80.3	22.67	5	98.175	2.547	50.01
8	49k	108.2	87.5	23.66	5	98.175	2.795	54.88

Tabla 3.10

Fecha: 01/Nov/04

2ª repetición

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	67k	92.3	82.2	12.29	5	98.175	3.225	63.32
2	302k	93	82	13.41	5	98.175	3.162	62.09
3	283k	94.8	80.6	17.62	5	98.175	2.813	55.23
4	293k	95.5	81	17.90	5	98.175	2.794	54.86
5	142k	94.8	79.6	19.10	5	98.175	2.669	52.41
6	125k	93.2	77	21.04	5	98.175	2.5	49.09
7	313k	93.4	75.9	23.06	5	98.175	2.359	46.32
8	60k	108.9	88	23.75	5	98.175	2.8	54.98

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i = Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i = Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

Tabla 3.11

Fecha: 01/Nov/04

3ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	288k	94.7	84.4	12.20	5	98.175	3.377	66.31
2	130k	90.2	79.5	13.46	5	98.175	3.177	62.38
3	297k	96.5	82.1	17.54	5	98.175	2.99	58.71
4	66k	93.9	79.7	17.82	5	98.175	2.765	54.29
5	160k	94.9	80	18.63	5	98.175	2.788	54.74
6	122k	95.8	79.5	20.50	5	98.175	2.592	50.89
7	281k	95	77.5	22.58	5	98.175	2.35	46.14
8	153k	111.9	90.5	23.65	5	98.175	2.88	56.55

Tabla 3.12
Fecha: 02/Nov/04
4ª repetición.

muestra	cilindro	psh(gr)	pss(gr)	% H	h _i (cm)	V _i (cm ³)	h _f (cm)	V _f (cm ³)
1	144k	90.9	81.1	12.08	5	98.175	3.359	65.95
2	314k	94	83.2	12.98	5	98.175	3.218	63.19
3	126k	93.3	79.4	17.51	5	98.175	2.783	54.64
4	299k	92.8	78.8	17.77	5	98.175	2.736	53.72
5	317k	96.5	81.5	18.40	5	98.175	2.769	54.37
6	74	95.2	79.1	20.35	5	98.175	2.555	50.17
7	140k	92.3	75.3	22.58	5	98.175	2.331	45.77
8	54k	110.1	89.3	23.29	5	98.175	2.792	54.82

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i= Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i= Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

Tabla 3.13
Fecha: 02/Nov/04
5ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h _i (cm)	V _i (cm ³)	h _f (cm)	V _f (cm ³)
1	43k	92.5	82.6	11.99	5	98.175	3.393	66.62
2	318k	93.9	82.8	13.41	5	98.175	3.25	63.81
3	133k	97.4	83.1	17.21	5	98.175	2.913	57.20
4	132k	92.7	78.8	17.64	5	98.175	2.764	54.27
5	157k	93.6	78.9	18.63	5	98.175	2.693	52.88
6	127	92	76.3	20.58	5	98.175	2.395	47.03
7	152k	89.3	72.8	22.66	5	98.175	2.304	45.24
8	123k	107.9	87.2	23.74	5	98.175	2.74	53.80

Tabla 3.14
Fecha: 02/Nov/04
6ª repetición.

muestra	cilindro	psh(gr)	pss(gr)	% H	h _i (cm)	V _i (cm ³)	h _f (cm)	V _f (cm ³)
1	146k	91.5	81.4	12.41	5	98.175	3.267	64.15
2	76k	93.4	82.4	13.35	5	98.175	3.212	63.07
3	80k	94.5	80.6	17.25	5	98.175	2.836	55.68
4	303k	94.5	80	18.13	5	98.175	2.825	55.47
5	311k	92.8	78.2	18.67	5	98.175	2.647	51.97
6	149k	96.4	79.9	20.65	5	98.175	2.561	50.29
7	72k	96	78.4	22.45	5	98.175	2.411	47.34

8	47k	107	86.4	23.84	5	98.175	2.7	53.01
---	-----	-----	------	-------	---	--------	-----	-------

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i = Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i = Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

Tabla 3.15

Fecha: 03/Nov/04

7ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	146k	93.9	83.6	12.32	5	98.175	3.305	64.89
2	76k	96.6	85.3	13.25	5	98.175	3.41	66.96
3	80k	94.8	80.7	17.47	5	98.175	2.786	54.70
4	303k	94.3	79.8	18.17	5	98.175	2.8	54.98
5	311k	94.3	79.7	18.32	5	98.175	2.71	53.21
6	149k	93.5	77.35	20.88	5	98.175	2.511	49.30
7	72k	106.4	86.6	22.86	5	98.175	2.611	51.27
8	47k	122.4	99.2	23.39	5	98.175	3.08	60.48

Tabla 3.16

Fecha: 03/Nov/04

8ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	h_i (cm)	V_i (cm ³)	h_f (cm)	V_f (cm ³)
1	296k	94.2	83.8	12.41	5	98.175	3.376	66.29
2	159	94.2	83.3	13.09	5	98.175	3.222	63.26
3	128k	94.2	80.2	17.46	5	98.175	2.867	56.29
4	62k	99.1	84.1	17.84	5	98.175	2.983	58.57
5	286k	97.8	82.6	18.40	5	98.175	2.871	56.37
6	124k	93.9	77.9	20.54	5	98.175	2.548	50.03
7	287k	104.3	85.3	22.27	5	98.175	2.636	51.76
8	53k	122.5	99.4	23.24	5	98.175	3.111	61.08

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, h_i = Altura inicial de la muestra, h_f = Altura final de la muestra, V_i = Volumen inicial, V_f = Volumen final, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final.

RESULTADOS DE POROSIDAD ANTES Y DESPUÉS DE LA COMPACTACIÓN EN EL SUELO MIGAJÓN-ARCILLOSO.

Tabla 3.17

Fecha: 01/Nov/04

1ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	305k	92.3	82.1	12.42	0.84	1.27	2.65
2	315k	91.8	80.8	13.61	0.82	1.32	2.65
3	45k	92.5	78.5	17.83	0.80	1.46	2.65
4	46k	92.8	78.6	18.07	0.80	1.44	2.65
5	68k	92.3	77.7	18.79	0.79	1.52	2.65
6	148k	91	75.3	20.85	0.77	1.60	2.65
7	61k	98.5	80.3	22.67	0.82	1.61	2.65
8	49k	108.2	87.5	23.66	0.89	1.59	2.65

Tabla 3.18**Fecha: 01/Nov/04**2^a repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	67k	92.3	82.2	12.29	0.84	1.30	2.65
2	302k	93	82	13.41	0.84	1.32	2.65
3	283k	94.8	80.6	17.62	0.82	1.46	2.65
4	293k	95.5	81	17.90	0.83	1.48	2.65
5	142k	94.8	79.6	19.10	0.81	1.52	2.65
6	125k	93.2	77	21.04	0.78	1.57	2.65
7	313k	93.4	75.9	23.06	0.77	1.64	2.65
8	60k	108.9	88	23.75	0.90	1.60	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r = Densidad Real, P_i= Porosidad Inicial, P_f=Porosidad al final de la compresión.

Tabla 3.19**Fecha: 01/Nov/04**3^a repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	288k	94.7	84.4	12.20	0.86	1.27	2.65
2	130k	90.2	79.5	13.46	0.81	1.27	2.65
3	297k	96.5	82.1	17.54	0.84	1.40	2.65
4	66k	93.9	79.7	17.82	0.81	1.47	2.65
5	160k	94.9	80	18.63	0.81	1.46	2.65
6	122k	95.8	79.5	20.50	0.81	1.56	2.65
7	281k	95	77.5	22.58	0.79	1.68	2.65
8	153k	111.9	90.5	23.65	0.92	1.60	2.65

Tabla 3.20**Fecha: 02/Nov/04**

4ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	144k	90.9	81.1	12.08	0.83	1.23	2.65
2	314k	94	83.2	12.98	0.85	1.32	2.65
3	126k	93.3	79.4	17.51	0.81	1.45	2.65
4	299k	92.8	78.8	17.77	0.80	1.47	2.65
5	317k	96.5	81.5	18.40	0.83	1.50	2.65
6	74	95.2	79.1	20.35	0.81	1.58	2.65
7	140k	92.3	75.3	22.58	0.77	1.65	2.65
8	54k	110.1	89.3	23.29	0.91	1.63	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i= Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r = Densidad Real, P_i= Porosidad Inicial, P_f = Porosidad al final de la compresión.

Tabla 3.21

Fecha: 02/Nov/04

5ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	43k	92.5	82.6	11.99	0.84	1.24	2.65
2	318k	93.9	82.8	13.41	0.84	1.30	2.65
3	133k	97.4	83.1	17.21	0.85	1.45	2.65
4	132k	92.7	78.8	17.64	0.80	1.45	2.65
5	157k	93.6	78.9	18.63	0.80	1.49	2.65
6	127	92	76.3	20.58	0.78	1.62	2.65
7	152k	89.3	72.8	22.66	0.74	1.61	2.65
8	123k	107.9	87.2	23.74	0.89	1.62	2.65

Tabla 3.22

Fecha: 02/Nov/04

6ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	Da _i (gr/cm ³)	Da _f (gr/cm ³)	Dr (gr/cm ³)
1	146k	91.5	81.4	12.41	0.83	1.27	2.65
2	76k	93.4	82.4	13.35	0.84	1.31	2.65
3	80k	94.5	80.6	17.25	0.82	1.45	2.65
4	303k	94.5	80	18.13	0.81	1.44	2.65
5	311k	92.8	78.2	18.67	0.80	1.50	2.65
6	149k	96.4	79.9	20.65	0.81	1.59	2.65
7	72k	96	78.4	22.45	0.80	1.66	2.65
8	47k	107	86.4	23.84	0.88	1.63	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r = Densidad Real, P_i = Porosidad Inicial, P_f = Porosidad al final de la compresión.

Tabla 3.23

Fecha: 03/Nov/04

7ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	$Da_i(\text{gr/cm}^3)$	$Da_f(\text{gr/cm}^3)$	$Dr (\text{gr/cm}^3)$
1	146k	93.9	83.6	12.32	0.85	1.29	2.65
2	76k	96.6	85.3	13.25	0.87	1.27	2.65
3	80k	94.8	80.7	17.47	0.82	1.48	2.65
4	303k	94.3	79.8	18.17	0.81	1.45	2.65
5	311k	94.3	79.7	18.32	0.81	1.50	2.65
6	149k	93.5	77.35	20.88	0.79	1.57	2.65
7	72k	106.4	86.6	22.86	0.88	1.69	2.65
8	47k	122.4	99.2	23.39	1.01	1.64	2.65

Tabla 3.24

Fecha: 03/Nov/04

8ª repetición.

muestra	cilindro	Psh(gr)	Pss(gr)	% H	$Da_i(\text{gr/cm}^3)$	$Da_f(\text{gr/cm}^3)$	$Dr (\text{gr/cm}^3)$
1	296k	94.2	83.8	12.41	0.85	1.26	2.65
2	159	94.2	83.3	13.09	0.85	1.32	2.65
3	128k	94.2	80.2	17.46	0.82	1.42	2.65
4	62k	99.1	84.1	17.84	0.86	1.44	2.65
5	286k	97.8	82.6	18.40	0.84	1.47	2.65
6	124k	93.9	77.9	20.54	0.79	1.56	2.65
7	287k	104.3	85.3	22.27	0.87	1.65	2.65
8	53k	122.5	99.4	23.24	1.01	1.63	2.65

Psh= Peso del suelo húmedo, Pss= Peso del suelo seco, %H= Contenido de humedad, Da_i = Densidad aparente inicial, Da_f = Densidad aparente final, D_r = Densidad Real, P_i = Porosidad Inicial, P_f = Porosidad al final de la compresión.