



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

Efecto del Producto Algaenzims® en la Resistencia
del Suelo
Simulando la Compactación en Laboratorio

Por:

Jesús Candelario López Cruz

T E S I S

Presentado como Requisito Parcial para
Obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México.

Abril de 2008



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

Efecto del Producto Algaenzims® en la Resistencia del Suelo
Simulando la Compactación en Laboratorio

Por:

Jesús Candelario López Cruz

TESIS

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

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobada por el Comité de Tesis

Asesor Principal

Dr. Martín Cadena Zapata

Sinodal

Sinodal

M.C. Tomás Gaytán Muñiz

M.C. René F. Domínguez López

Coordinador de la División de Ingeniería

Dr. Raúl Rodríguez García

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Abril de 2008

Agradecimientos

A DIOS: Miro hacia atrás para ver el camino por donde me guiaste, he caminado un largo trecho donde tu luz fue alumbrando mí camino. Ahora me detengo un instante y miro hacia delante, a la luz de la aurora. Gracias por que en mi caminar nunca me abandonaste.

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

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

Al MC. René Félix Domínguez López: Por su valiosa ayuda en la revisión, gracias por darme el tiempo necesario para hacerme recomendaciones y sugerencias tan importantes para llevar a un buen termino la investigación. Gracias por tu amistad sincera.

Al MC. Tomás Gaytán Muñiz. Por formar parte de este proyecto, por tener la delicadeza de trasmitirme su conocimiento. Gracias por brindarme su amistad.

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

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

A mis compañeros de la generación CIV de la carrera de Ingeniero Mecánico Agrícola: **Juan Francisco, Eugenio, Arturo, Ángel, José Ramón, Mario Alberto, Jorge, Ulises, Álvaro, Carlos, Ascari, Hugo Álvarez, Ricardo, Francisco Velasco, Rubén, Adán, Villatoro, Gumeta, Hugo, Flavio, Nivardo, Pablo Isabel, Francisco Alvarado** por todos los momentos de alegría que pasamos juntos.

A mis amigos por haber pasado momentos inolvidables en especial a: **Gerardo, Víctor, Cesar, Esmeralda, Gregorio, Mario, Jorge, Adrián, Let, Dagoberto, Néstor, Enrique, Pablo, Tokiche, Isac, Sergio.**

Dedicatoria

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

A mis **Padres:**

Sr. Gonzalo López Zúñiga

Sra. Maria Antonia Cruz Correa

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

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

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

A mis hermanos y hermanas

Mauricio

Alejandrina

Braulio

Gabriela

Guadalupe

Por toda su ayuda, motivación y paciencia que me brindaron durante mi estancia en esta universidad y a quienes en todo momento tuve presente, por que se que también ustedes se sentirán orgulloso de mi, gracias por creer en mi.

A mis Tíos y Tías:

Quienes me motivaron a superarme y ser hombre de principios, de fe y esperanza, así como por sus consejos, oraciones y motivaciones que me proporcionaron durante mi estancia en la universidad en especial a: **Antonia López Zúñiga, Atilano López Zúñiga, Ángela López Zúñiga, Manuel López Zúñiga, Ereida Sánchez** gracias por su consejos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	vix
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Compactación del suelo	1
1.2 Laborabilidad del suelo	3
1.3 Objetivos e Hipótesis.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 Importancia de las algas marinas.....	5

2.2 Límites de los estados de consistencia del suelo.....	7
2.2.1 Límite de contracción	9
2.2.2 Límite de plasticidad.....	9
2.3 Importancia de la humedad en la laborabilidad del suelo	10
2.4 Compactación del suelo	11
2.4.1 Origen de la compactación del suelo	13
2.4.2 Factores relacionados con la maquinaria agrícola en la compactación del suelo	14
2.4.3 Efecto del tráfico de maquinaria agrícola sobre la porosidad del suelo.....	17
2.4.4 Influencia del contenido de agua en el suelo	19
2.4.5 Influencia del pisoteo animal en la compactación del suelo.....	20
2.4.6 Soluciones a los problemas de compactación	20
2.5 Método para estimar la permeabilidad al aire del suelo	23
2.5.1 Método indirecto.....	23
2.5.2 Métodos de laboratorio.....	24
2.5.2.1 Distribución del tamaño de agregados.....	24
2.5.2.2 Prueba de columna.....	25
2.5.2.3 Método de campo	25
2.6 Métodos aproximados para estimar el límite superior de laborabilidad del suelo	25
2.6.1 Método manual para calcular el límite inferior de plasticidad.....	25

2.7 Método de la permeabilidad del aire para estimar el límite superior de laborabilidad	26
III. MATERIALES Y METÓDOS	28
3.1 Preparación del terreno y recolección de muestras	28
3.2 Textura del suelo del área experimental	29
3.3 Compactación de las muestras	30
3.4 Prueba de permeabilidad del aire.....	31
3.5 Contenido de humedad de las muestras.....	32
3.6 Densidad aparente	33
3.7 Porosidad del suelo.....	33
3.8 Evaluación de los datos de laboratorio.....	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
4.1 Textura del suelo.....	35
4.2 Resultados de las condiciones físicas del suelo en los tratamientos de algaenzims a los cuales se sometió el suelo	35
4.2.1 Valores del porcentaje de humedad	35
4.2.2 Valores de la densidad aparente	36
4.2.3 Valores de la permeabilidad del aire	38
4.2.4 Valores de la porosidad del suelo	39
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
5.1 Conclusiones.....	41

5.2 Recomendaciones.....	42
VI. LITERATURA CITADA	43
VII. ANEXOS	47
Anexo 1. Viscosidad del aire a diferentes temperaturas	48
Anexo 2. Resultados obtenidos de permeabilidad del aire, densidad aparente y porosidad del suelo con muestras de campo y compactadas en laboratorio	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Ubicación geográfica del sitio experimental	28
Figura 3.2 Recolección de muestras y barrenas extractor de núcleo	29
Figura 3.3 Identificación de la textura del suelo	30
Figura 3.4 Prensa neumática	30
Figura 3.5 Permeámetro de aire.....	31
Figura 3.6 Balanza digital a una precisión de 0.1 g.	32
Figura 3.7 Estufa de secado	32
Figura 3.8 Ubicación de las parcelas	34
Figura 4.1 Suelo de textura de migajón arcilloso	35
Figura 4.2 Comportamiento de la densidad aparente en los diferentes estratos	37
Figura 4.3 Comportamiento de la porosidad del suelo en los diferentes estratos...	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Promedio del porcentaje de humedad de las muestras de suelo..	36
Tabla 4.2 Datos de la densidad aparente antes de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.....	36
Tabla 4.3 Datos de la densidad aparente después de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.....	37
Tabla 4.4 Datos de la permeabilidad del aire después de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio	38
Tabla 4.5 Datos de la porosidad del suelo antes de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.....	39
Tabla 4.6 Datos de la porosidad del suelo después de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio	39
Tabla 7.1 Viscosidad del aire a diferentes temperaturas	49

RESÚMEN

En Coahuila, México, la agricultura mas productiva se realiza en los municipios de las regiones sureste y la laguna en áreas de riego (cultivos anuales y forrajeros). En estos sistemas de producción las labores están altamente mecanizadas, en esta circunstancia el riesgo de el problema de compactación de suelos es debido al uso intensivo de maquinaria agrícola es alto, es que no se cuenta con la información de un manejo adecuado del tráfico de la maquinaria agrícola.

El presente trabajo se realizó con la finalidad de obtener información acerca de los efectos que causa a corto plazo el Algaenzims® en la compactación del suelo.

Para llevar acabo la investigación se realizo un diseño experimental de bloques al azar con dos tratamientos y tres repeticiones. La parcela experimental contó con una área de 50 m² el tratamiento que se aplico al suelo fue una dosis de 50 ml de Algaenzims® disuelto en una bomba de aspersión de 20 L.

El resultado obtenido de esta evaluación fue que a una compactación de las muestras a 4 bars de la simulación del paso de maquinaria agrícola. El suelo presentaba resistencia a la compactación ocasionado por el efecto del algaenzims, este efecto se reflejo en la densidad aparente y el espacio poroso, que a pesar de que las muestras fueron compactadas esta no vario

significativamente en comparación con las muestras que no fueron sometidas a esta simulación, lo que indica que el algaenzims reduce la compactación del suelo a una profundidad de 0-5 cm, esto se debió a que el tratamiento nesecita mayor tiempo para poder tener mayor efecto a mayores profundidades.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo es considerado como uno de los recursos naturales más importantes, de ahí la necesidad de mantener su productividad, para que a través de él y las prácticas agrícolas adecuadas se establezca un equilibrio entre la producción de alimentos y el acelerado incremento del índice demográfico.

El suelo es esencial para la vida, como lo es el aire y el agua, y cuando es utilizado de manera prudente puede ser considerado como un recurso renovable. Es un elemento de enlace entre los factores bióticos y abióticos y se le considera un hábitat para el desarrollo de las plantas.

Gracias al soporte que constituye el suelo es posible la producción de los recursos naturales, por lo cual es necesario comprender las características físicas y químicas para propiciar la productividad y el equilibrio ambiental (Abcagro Compactación de suelo 2006).

Se realizó la investigación para determinar si, el Algaenzims reduce la compactación del suelo ocasionado por el paso de maquinaria agrícola, además de incrementar la resistencia a la laborabilidad cuando el suelo este muy húmedo.

1.1 Compactación del suelo

La compactación del suelo es definida como “el proceso por el cual las partículas del suelo sufren un rearreglo, aumentando el contacto entre si mismas, disminuyendo el espacio poroso e incrementando la densidad aparente” (Soil Science Society of América, 1996). Dicho proceso es considerado un tipo de degradación edáfica y está muy generalizado a nivel mundial.

En nuestro país, la compactación de los suelos bajo cultivo intensivo, ha sido señalada como una de las formas más generalizadas de degradación de suelo (Florentino, 1989). El uso indiscriminado de labores de mecanización, ha llevado al desarrollo de capas subsuperficiales altamente compactadas las cuales coinciden con la zona de mayor desarrollo radical para la mayoría de los cultivos.

Esta situación genera un descenso en la permeabilidad del suelo al agua y al aire, así como también, una alta resistencia a la penetración, lo que origina una inhibición del crecimiento radical de las plantas que allí se establezcan (Florentino, 1989).

La compactación del suelo es de gran importancia debido a que va a provocar alteraciones en su interior afectando sus propiedades (Handen, 2003), y consecuentemente restringiendo el área de captación de agua y nutrientes de las raíces (Defossez et al., 2002).

El problema se origina en la energía transmitida al suelo por el uso de pesados implementos de labranza, el tránsito de vehículos equipados con neumáticos con una elevada presión de inflado y ancho reducido y por el sobre pastoreo de la ganadería (González Sánchez, 2003; Van Dijck y Van Asch, 2002). Si el contenido de humedad del suelo es elevado, el impacto de la pezuña, la llanta de la maquinaria, suele provocar deformación de la superficie del suelo (Sosa et al., 1995), lo cual genera un aumento en la densificación, disminución de la porosidad, la estabilidad estructural y la capacidad de infiltración (Cadena et al., 1998).

Los efectos de la compactación de suelo sobre los cultivos y sobre las propiedades edáficas, son complejas (Batey, 1990) por lo que es necesario definir parámetros para su caracterización, siendo los más difundidos, la densidad aparente y la resistencia a la penetración (fuerza del suelo).

1.2 La laborabilidad del suelo

La laborabilidad es una cualidad del suelo que describe como este puede ser laborado fácilmente (FAO, 1983). Se determina según la textura, estructura y consistencia del suelo. La laborabilidad varía de suelo a suelo, de máquina a máquina y de una operación a otra (Simalenga, 1992).

Esta variación es influenciada tanto por el contenido de agua transitorio como las características intrínsecas del suelo así como la arcilla o la materia orgánica (Thomson, 1982). La información sobre los criterios de laborabilidad del suelo también carece para la planificación y la operación de opciones de cultivo para alcanzar los requerimientos oportunos (Moreno Rico et al., 1993).

1.3 Objetivo e Hipótesis

1.3.1 Objetivo general.

Determinar el efecto de el Algaenzims® para reducir la compactación del suelo en el límite superior de laborabilidad, obtenido en el laboratorio utilizando el método de la permeabilidad del aire.

1.3.2 Hipótesis.

El Algaenzims® reduce la compactación del suelo, además de aumentar el límite superior de laborabilidad a humedades relativamente altas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1 Importancia de las algas marinas.

Canales (1999) reporta de los estudios hechos en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, y de las pruebas de campo llevadas a cabo con agricultores cooperantes, se reporta, que se han alcanzado rendimientos extras de 1 a 3 ton/ha de maíz, trigo y arroz, los básicos más importantes, cuando se les ha aplicado de 1 a 3 L de Algaenzims® que es un extracto de algas marinas hecho en México.

Según Villarreal (2001) de los extractos de algas Algaenzims®, ha separado cuatro grupos de microorganismos, a saber: fijadores de nitrógeno, halófilos, hongos y levaduras y mesofílicos, mismos, que ha logrado propagar y están en estudio, así como su acción y efectos en el suelo y en la planta. Probablemente los microorganismos halófilos tomen las sales de sodio, disminuyan la cantidad de sodio en la solución del área que ocupan las raíces.

Aitken y Senn (1965), Blaine, et al (1990), Blunden (1973) y Burns (1978) mencionan que los derivados de algas mejoran el suelo. Nicolás (1995) reporta incremento en la materia orgánica.

Tinajero (1993) reportó que en cilantro los rendimientos fueron iguales al aplicar al suelo 2 L/ha de extracto de algas marinas Algaenzims® o 20 ton/ha de estiércol bovino. En la naturaleza, en cada 10, 000,000 moléculas de agua (H₂O), una se disocia (H.OH). El HOH, es el reactivo universal (reacciones de hidrólisis). Las enzimas hidrolasas, provocan y activan las reacciones de hidrólisis.

Reyes (1991 y 1993) al aplicar algas marinas o sus derivados al suelo, encontró que bajan las arcillas y subió el limo y la arena, bajaron los carbonatos, se formaron poros y se ajustó el pH del suelo.

Canales (1997 y 1998) consideran que el pH del suelo se ajusta, esto es debido a que las enzimas que las algas, provocan y/o activan en el suelo, reacciones de hidrólisis enzimáticas catalíticas reversibles, que las enzimas de los seres vivos, inclusive las raíces que en el medran, no son capaces de hacer en forma notoria.

De tal manera, que al reaccionar con las arcillas silícias o las arcillas de hidróxidos más arena, actúan del compuesto que se encuentra en mayor cantidad en favor del que se encuentra en menor proporción y tiende a llevarlo al equilibrio; o sea, al suelo franco, ajustando también el pH, hidroliza, enzimáticamente a los compuestos no solubles del suelo, liberando los nutrimentos y complementado con buen manejo: lo desmineraliza, lo desintoxica y lo desaliniza. Al descomponer la materia orgánica y los carbonatos, libera el anhídrido carbónico formando poros, mismos, que se forman también al coagular las arcillas silícias, descompactándolo; todo, en forma enzimática, paulatina y acumulativa, se logra así: el mejoramiento físico, químico y biológico del suelo, haciendo del mismo un medio propicio para que los microorganismos, lombrices y demás fauna pequeña que medran en el suelo así como las raíces y las plantas mismas, se desarrollen mejor.

La acción enzimática sobre los agroquímicos, es muy lenta, actúa paulatinamente en el suelo y su efecto se lleva mucho tiempo; consecuentemente, si los agroquímicos se aplican junto con extractos de algas marinas, sus acciones enzimáticas, por su corta residencia en tiempo no alcanzan a lisarlos para degradarla.

www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort01/Ponencia_03.pdf

2.2 Limites de los estados de consistencias del suelo.

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

Conforme el nivel de humedad crece, cada partícula del suelo se recubre con una película de agua absorbida cada vez más gruesa, produciendo así la aparición progresiva de los siguientes estados de consistencia: Con bajo contenido de humedad, el suelo es duro y muy coherente. Con mayor humedad las partículas retienen agua sobre sus superficies debilitándose la coherencia, produciéndose así friabilidad en la masa del suelo.

El suelo presenta entonces el estado de consistencia blanda o friable, siendo este rango de humedad óptimo para la mayoría de las operaciones de labranza.

A mayor aumento de la humedad en el suelo existe un “colchón” de agua entre las partículas minerales que forman los agregados por lo que estas, prácticamente pierden atracción entre ellas, esto es la cohesión molecular, este parámetro es función del número de películas de agua entre ellas y varía inversamente proporcional al 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 el estado de consistencia de los agregados tienen su más baja resistencia a la fuerza que ejercen los implementos sobre ellos por los que pueden ser fácilmente destruidas en su tamaño y arreglo sea puede perder completamente la estructura del suelo, hasta llegar al punto de compactación (Ashburner y Sims, 1984).

La consistencia es la característica física que gobierna las fuerzas de cohesión - adhesión, responsables de la resistencia del suelo a ser moldeado o roto.

Dichas fuerzas dependen del contenido de humedades es por esta razón que la consistencia se debe expresar en términos de seco, húmedo y mojado.

Se refiere a las fuerzas que permiten que las partículas se mantengan unidas; se puede definir como la resistencia que ofrece la masa de suelo a ser deformada o amasada. Las fuerzas que causan la consistencia son: cohesión y adhesión.

Cohesión: Esta fuerza es debida a la atracción molecular en razón, a que las partículas de arcilla presentan carga superficial, por una parte y la atracción de masas por las fuerzas de Van der Waals, (Gavande, 1976).

Además de estas fuerzas, otros factores tales como compuestos orgánicos, carbonatos de calcio y óxidos de hierro y aluminio, son agentes que integran el mantenimiento conjunto de las partículas.

La cohesión, entonces es la atracción entre partículas de la misma naturaleza.

Adhesión: Se debe a la tensión superficial que se presenta entre las partículas de suelo y las moléculas de agua. Sin embargo, cuando el contenido de agua aumenta excesivamente, la adhesión tiende a disminuir. El efecto de la adhesión es mantener unidas las partículas por lo cual depende de la proporción Agua/Aire.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto se puede afirmar que la consistencia del suelo posee dos puntos máximos; uno cuando esta en estado seco debido a cohesión y otro cuando esta en estado húmedo que depende de la adhesión.

[www.monografias.com /suelos-consistencia/suelos-consistencia](http://www.monografias.com/suelos-consistencia/suelos-consistencia).

2.2.1 Limite de contracción

Entre las consistencias friables y de cementado se presenta el límite de contracción. Este punto es alcanzable cuando al reducir el contenido de humedad un nivel mas 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).

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

2.2.2 Límite 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 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 o numero 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 dificultara su laboreo, ya que el tiempo disponible para trabajarlo en el estado friable será muy corto; es necesario reducir el índice de plasticidad.

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

2.3 Importancia de la humedad en la laborabilidad del suelo

La laborabilidad es una cualidad del suelo que describe como este puede ser laborado fácilmente (FAO, 1983). Se determina según la textura, estructura y consistencia del suelo. La laborabilidad varía del suelo a suelo, de máquina a máquina y de una operación a otra (Simalenga, 1992). Esta variación es influenciada tanto por el contenido de agua transitorio como las características intrínsecas del suelo como la arcilla o la materia orgánica (Thomson, 1982). La información sobre los criterios de laborabilidad del suelo también carece para la planificación y la operación de opciones de cultivo para alcanzar los requerimientos oportunos (Moreno Rico et al., 1993).

Dexter y Birkas (2004) mencionan que el contenido de humedad óptimo de un suelo es definido como aquel en el que la cantidad de agregados producidos durante la labranza es mínimo, y concluyen 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.

2.4. Compactación del suelo

La compactación de suelo disminuye la aireación del mismo (el intercambio gaseoso), dificulta el crecimiento radicular, disminuye la infiltración así como también promueve la erosión hídrica debido a que favorece la escorrentía superficial (McGarry, 2001).

Los efectos de la compactación de suelo sobre los cultivos y sobre las propiedades edáficas, son complejas (Batey, 1990) por lo que es necesario definir parámetros para su caracterización, siendo los más difundidos, la densidad aparente y la resistencia a la penetración (fuerza del suelo).

La densidad aparente se define como masa de suelo seco por unidad de volumen y es el parámetro más utilizado para caracterizar el estado de compactación de un suelo (Panayiotopoulos et al., 1994). Por otra parte, la determinación de la fuerza del suelo también es muy utilizada porque refleja fielmente la resistencia del suelo a la penetración radicular (Hamza y Anderson, 2001). A su vez, la tasa de infiltración de agua se presenta como un indicador indirecto del estado de compactación del suelo, especialmente en el horizonte superficial (Hamza y Anderson, 2003).

Debido a que no siempre la compactación del suelo tiene efectos negativos, se ha definido un nivel de compactación tal (denominado umbral crítico) por encima del cual se presentan problemas para la producción. Este umbral varía dependiendo del tipo de suelo y sistema de producción y, su conocimiento es importante para definir prácticas de manejo a los fines de no superarlo.

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:

- Implementos de labranza.
- Cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre.
- Pisoteo de animales (Agroinformacion2000).

Breland y 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) dice 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 practica de labranza se tiene mas riesgo de destruir que de mejorar la estructura del suelo. Así, cuando un suelo débil se labra con un 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.

2.4.1 Origen de la compactación del suelo.

La compactación del suelo es de gran importancia debido a que va a provocar alteraciones en su interior afectando sus propiedades (Handen, 2003), y consecuentemente restringiendo el área de captación de agua y nutrientes de las raíces (Defossez et al., 2002).

El problema se origina en la energía transmitida al suelo por el uso de pesados implementos de labranza, el tránsito de vehículos equipados con neumáticos con una elevada presión de inflado y ancho reducido y por el sobre pastoreo de la ganadería (González Sánchez, 2003; Van Dijck y Van Asch, 2002). Si el contenido de humedad del suelo es elevado, el impacto de la pezuña, la llanta de la maquinaria, suele provocar deformación de la superficie del suelo (Sosa et al., 1995), lo cual genera un aumento en la densificación, disminución de la porosidad, la estabilidad estructural y la capacidad de infiltración (Cadena et al., 1998).

La compactación de suelo por debajo de la profundidad normal de labranza es de una creciente importancia, debido a sus efectos detrimentales consecuentes y persistentes (Blake et al., 1976; Voorhees et al., 1986) sobre el rendimiento de los cultivos (Gaultney et al., 1982).

www.abcagro.com/riego/compactacion_suelos.asp

Así como las labranzas permiten disminuir la compactación superficial, al menos temporalmente, los efectos que producen son variados y se ven reflejados tanto en las características del suelo, la infiltración del agua y su posterior acumulación. La resistencia a la penetración es un parámetro adecuado para la caracterización del efecto producido por las labranzas, su disminución favorece el crecimiento radicular y por lo tanto un volumen mayor de suelo explorado implica una mayor disponibilidad de agua y nutrientes para el desarrollo de las especies (Hakansson et al., 1987).

La tendencia hacia el uso de maquinaria pesada, equipos de labranza y el tráfico vehicular sobre tierras agrícolas ha incrementado no solo la severidad, sino además la profundidad a la cual ocurre la compactación del suelo. El excesivo laboreo incrementa la compactación. Esto es particularmente cierto por los frecuentes pases de rastra cuando las condiciones de humedad del suelo no son las ideales (Hakansson, 1982 citado por Materechera et al., 1992).

www.larevistadelriego.com.ar/noticias/efectos-de-la-labranza-sobre-la-velocidad.htm

2.4.2 Factores relacionados con la maquinaria agrícola en la compactación del suelo

El tráfico de la maquinaria es común en todas las operaciones agrícolas, incluso en siembra directa (SD) (Tullberg, 1990). Es muy reconocida la gran presión que ejercen los rodados de la maquinaria sobre el suelo debido la escasa superficie de contacto en relación al peso de las mismas.

El grado de compactación ejercido por los rodados de la maquinaria depende de la fuerza mecánica del suelo, que es influenciada por la textura y la materia orgánica (MO) (Larson et al., 1980), de la humedad edáfica y de la carga del implemento

sobre el suelo, la que a su vez depende de la carga en el eje, de la dimensión de las ruedas y la velocidad. Tanto el tráfico con maquinarias pesadas como las labranzas pueden promover también la compactación subsuperficial (Mosaddeghi et al., 2000).

Wiermann et al. (2000) para suelos franco limosos en Alemania comprobaron que bajo labranza convencional (LC), la aplicación de una carga dinámica de 2.5 ton produjo una gran degradación estructural mientras que bajo labranza reducida (LR), dicha carga no le produjo al suelo modificaciones físicas importantes. Los autores atribuyen estos resultados a la mayor estabilidad de los agregados que se generan bajo LR.

La mayoría de los tractores y maquinarias generan presiones sobre los suelos mayores que las recomendadas como máximas para minimizar la compactación. Es por esto que la única manera de proteger el suelo de la degradación estructural es utilizar implementos que realicen varias operaciones simultáneamente (Aliev, 2001). Numerosos trabajos han indicado que las propiedades físicas del suelo son menos alteradas al disminuir el número de pasadas (Chygarev y Lodyata, 2000; Seker y Isildar, 2000). Sin embargo la primera pasada de rueda es la que causa la mayor parte de la compactación del suelo (Bakker y Davis, 1995).

La compactación subsuperficial puede ser inducida mediante el tráfico repetido con implementos de bajo peso y esta alteración generalmente perdura por mucho tiempo (Balbuena et al., 2000).

La carga en cada rueda, el tipo de neumático y la presión del mismo juegan un importante rol en la compactación del suelo (Horn et al., 2001). En general la utilización de altas cargas por rueda, el uso de neumáticos de sección angosta, costura diagonal y con altas presiones de inflado, contribuye a agravar los problemas de compactación (Ridge, 2002; Febo y Planeta, 2000).

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 estas 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 el mantener 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.

2.4.3 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 causado por 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, así como un volumen de suelo explorado y una reducción en la absorción de agua y nutrientes.

La compactación modifica la actividad bioquímica y microbiológica del suelo y 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 pequeño y ligeros no es precisamente beneficioso, ya que requiere pasadas más frecuentes, que pueden tener 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. (agroinformación 2000).

Para Gavande (1982) una de las propiedades físicas que se ve afectada, tanto por los implementos como por la maquinaria agrícola, es la compactación del suelo. Es común encontrar en suelos que han sido trabajados constantemente con arado una capa compactada 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 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 forman agregados; y a altos contenidos de humedad, al secarse el suelo produce terrenos grandes y compactos, el suelo debe manipularse a un contenido de humedad de consistencia friable.

Según Raper y 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 y 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 lote, a tener pocas huellas muy profundas.

Ewa A. Czyz, (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 el terreno plano solamente cerca de 2 toneladas de peso, puede producir condiciones de suelo en el cual la aireación puede ser limitada para el crecimiento del cultivo.

El uso de llantas dobles puede producir resultados más bajos de densidad aparente del suelo, asociado a una aireación más grande. Menciona que la aireación del suelo es una componente muy importante dentro de las cualidades físicas del suelo.

2.4.4 Influencia del contenido de agua en el suelo

El contenido de humedad edáfico es el factor más importante que influencia los procesos de compactación (Soane y Van Ouwerkerk, 1994). Para todos los niveles de compactación, la resistencia a la penetración aumenta a medida que disminuye el potencial agua del suelo (Lipiec et al., 2002). Conocer como la compactación varía con los cambios en el contenido de agua del suelo puede ayudar a programar el tráfico, las operaciones mecánicas y los momentos de pastoreo con el fin de efectuarlos en adecuadas condiciones de humedad (Ohu et al., 1989).

En general, no se recomienda ejercer ningún tipo de presión sobre el suelo cuando el mismo se encuentra húmedo.

Así Weber et al. (2000) reportaron que en suelos con bajo contenido de humedad, la siembra directa (SD) no tuvo influencias en la densidad aparente a 30 cm de profundidad. En concordancia con lo anterior, Medvedev y Cybulko (1995) indicaron que ante un bajo contenido de humedad en el suelo, incluso con altas cargas, éste no se deformó más de 2 cm en profundidad, mientras que con un alto contenido de humedad, el valor de carga permisible (la carga que no causa una compactación significativa) fue apreciablemente menor. Esto significa que el máximo valor de carga permisible disminuye a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo.

www.chapingo.mx/terra/contenido/19/1/art67-74.pdf

2.4.5 Influencia del pisoteo animal en la compactación del suelo

El pisoteo de animales en pastoreo puede tener efectos adversos sobre las propiedades físicas del suelo y sobre el crecimiento de las plantas, particularmente bajo condiciones de suelo húmedo. El grado de compactación que el pisoteo animal puede generar depende fundamentalmente de la intensidad del pisoteo (asociada a la carga animal), del tipo y la humedad del suelo y de la cobertura vegetal.

Mapfumo et al. (1999) reportaron que tanto la densidad aparente como la resistencia a la penetración fueron mayores en lotes bajo pastoreo con animales pesados comparados con lotes pastoreados con animales livianos y medianos. También, Donkor et al. (2002) mostraron que el mismo nivel de compactación puede ser alcanzado con un pequeño número de animales pastoreando por un largo período, que con un gran número de animales pastoreando por períodos cortos.

Numerosos autores demostraron que la compactación originada por el pisoteo animal se limita solo a los 5 – 10 cm de profundidad, a diferencia de lo ocurrido con las maquinarias (Ferrero and Lipiec, 2000; Vzzotto et al., 2000; Terashima et al., 1999). Además que los problemas más serios se dan en suelos de textura fina.

2.4.6 Soluciones a los problemas de compactación

Si bien evitar que la compactación se produzca es la mejor forma de abordar este problema, existen algunas prácticas que pueden utilizarse una vez que se ha producido una degradación en la estructura del suelo. Algunas de ellas son adicionar o favorecer la acumulación de materia orgánica (MO), controlar el tráfico, utilizar algún tipo de labranza vertical profunda y seleccionar una adecuada rotación de cultivos.

- **Compactación y materia orgánica**

Es muy conocida la capacidad de la materia orgánica (MO) de favorecer la estructuración del suelo y la resistencia de los agregados, disminuyendo de esta forma la densidad aparente y la resistencia a la penetración (Carter, 2002). Es por esto que todos aquellos factores que promuevan la acumulación o el mantenimiento de altos niveles de materia orgánica (MO) en el suelo, favorecerán consecuentemente las propiedades físicas del mismo. Los materiales orgánicos poseen menor densidad y mayor porosidad que los suelos minerales, por lo tanto, el mezclado de suelo con residuos vegetales o estiércol puede mejorar la densidad aparente del suelo (Zhang, 1994). Por otro lado, el tipo de MO también es importante (Ball et al, 2000) reportaron que la materia orgánica (MO) más hábil parece ser más relevante que el contenido total de materia orgánica (MO) en determinar el comportamiento mecánico del suelo.

- **Control del tráfico**

Controlar el tráfico puede ayudar a mantener una zona más favorable para el crecimiento de las plantas mediante la restricción de la compactación a las sendas de los rodados (Braunack et al., 1995). LiYuXia et al. (2001), demostraron que la

infiltración del agua en un suelo bajo siembra directa (SD) en el que se controló el tráfico, fue similar a la de un suelo virgen. Las sendas de los rodados en un sistema de tráfico controlado pueden representar el 20% de la superficie, pero las pérdidas de rendimiento de los cultivos que se generan en esa área es compensada por los mayores rendimientos obtenidos (Li Hong Wen et al., 2000).

- **Laboreo profundo**

El laboreo profundo puede ser una importante práctica para contribuir a solucionar los problemas de compactación (Jarvis et al., 1986). Su utilización se ha difundido mucho en situaciones de compactación subsuperficial con el fin de favorecer la infiltración del agua y el desarrollo radicular (Bateman y Chanasyk, 2001).

Numerosos trabajos han reportado aumentos en los rendimientos de los cultivos luego de efectuar una labranza vertical profunda a suelos compactados y generalmente esto es atribuido al mayor desarrollo radicular (Clark y Humpreys, 1996). Por otro lado, pueden darse procesos de re-compactación luego de un tiempo de efectuada la labor (Spoor, 1995). Dichos procesos ocurren después de precipitaciones repetidas y son más importantes en suelos de textura fina. La adición de algún agente floculante como yeso o residuos orgánicos puede ayudar a evitar los problemas de re-compactación, sobre todo en sistemas de alta producción (Hamza y Anderson, 2002).

- **Raíces y compactación**

La habilidad de las raíces de las plantas para penetrar el suelo se ve restringida en suelos cuya resistencia a la penetración es mayor a 2.5 kPa (Taylor, 1971). En general, las plantas que crecen bajo suelos compactados poseen menor cantidad de raíces secundarias y menor materia seca radicular total que las que crecen bajo condiciones controladas (Panayiotopoulos et al., 1994). La capacidad de las raíces de las plantas de romper capas compactadas varía entre especies, por lo tanto, la

incorporación de cultivos con vigorosos sistemas radiculares a la rotación, puede considerarse como una forma de “labranza biológica” (Jayawardane y Chan, 1994).

- **Control del pisoteo animal**

El impacto del pisoteo animal puede ser reducido en gran manera si la superficie del suelo se encuentra cubierta con vegetación. El efecto adverso que ejercen los animales cuando el suelo está desnudo es más importante que cuando se cuenta con un recurso forrajero bien desarrollado (Greene et al., 1994).

Por otro lado, si existe la posibilidad, es aconsejable retirar los animales en pastoreo luego de precipitaciones intensas debido a la gran influencia que tiene la humedad edáfica sobre los procesos de compactación (Warren, 1986).

www.abcagro.com/riego/compactacion_suelos.asp

2.5 Métodos para estimar la permeabilidad al aire del suelo

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

Los métodos que propone para estimar la permeabilidad al aire del suelo son:

Métodos indirectos, de laboratorio y método de campo.

2.5.1 Método indirecto

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

$$K_i = kv / \rho g$$

Donde:

K_i = Permeabilidad intrínseca (m^2)

K = Conductividad hidráulica del agua saturada (m/s)

V = Viscosidad dinámica del agua (g/m-s)

P = Densidad del agua (g/cm^3)

g = Constante de gravitación (m/s^2)

2.5.2 Métodos de laboratorio.

Los métodos que propone para estimar la permeabilidad del aire en laboratorio son: Distribución del tamaño de agregado, prueba de columna y método de campo. A continuación se describen cada uno de ellos.

2.5.2.1 Distribución del tamaño del agregado.

La permeabilidad al aire esta en función del radio medio de poro, se puede estimar muy aproximadamente a través del análisis del tamaño del agregado 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 agregado para el cual 15 % del peso de las partículas son pequeñas.

Obteniendo una ecuación final:

$$K = 0.125 (0.1)^2 D_{15}^2$$

2.5.2.2 Pruebas de columna.

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

Estos estudios se pueden limitar por dependencia de la escala, y así los resultados no se pueden extrapolar a un diseño escala - campo. Realizadas en suelos de grano fino tales como estiércol y arcilla sugieren que es posible que circule poco o nada de aire. Sin embargo, los estudios de campo conducidos en estos tipos de suelo pueden revelar que la circulación de aire significativa puede ser alcanzada por los macroporos (Perdok y Hendrikse, 1982).

2.5.2.3 Método de campo

Dentro del método de campo están las pruebas de bombas neumáticas que ofrecen una alternativa a métodos indirectos y de laboratorio para calcular la permeabilidad del aire. Estas pruebas tienden a proporcionar las estimaciones más realistas de permeabilidad del aire y son capaces de caracterizar una parte más grande de la zona insaturada en cada posición de prueba. Un número de investigadores han desarrollado soluciones transitorias y fijas para la corriente de aire, que puede ser usada para el análisis de datos de pruebas de bombas neumáticas (Olearte et, al 1979).

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

2.6.1 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 g 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 aproximadamente 8 g; comprima y enrolle la masa del suelo entre los dedos y una lamina 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 plg rómpalo en 6 u 8 pedazos; comprima los pedazos conjuntamente con los dedos hasta que obtenga una masa uniforme.

Vuelva a enrollar el suelo 1/8 plg y repita el procedimiento hasta que los rollos se desmoronen y el suelo 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 le peso de suelo seco y posteriormente el contenido de humedad, el cual será el límite inferior de plasticidad de ese suelo.

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

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

Una muestra es preparada llenando completamente un cilindro de 100 cm³ 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 (mediante 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 y 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 $1 \times 10^{-12} m^2$, y mediante esto se puede establecer con más precisión cuando debemos realizar las operaciones de labranza (Ríos Camey, 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS.

Esta investigación se realizó en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que esta ubicada en la ex hacienda Buenavista, localizada a 7 km. Al sur de la ciudad de Saltillo (Figura 3.1); en las coordenadas $100^{\circ} 59' 57''$ longitud oeste y $25^{\circ} 23' 42''$ latitud norte, a una altitud de 1743 msnm.

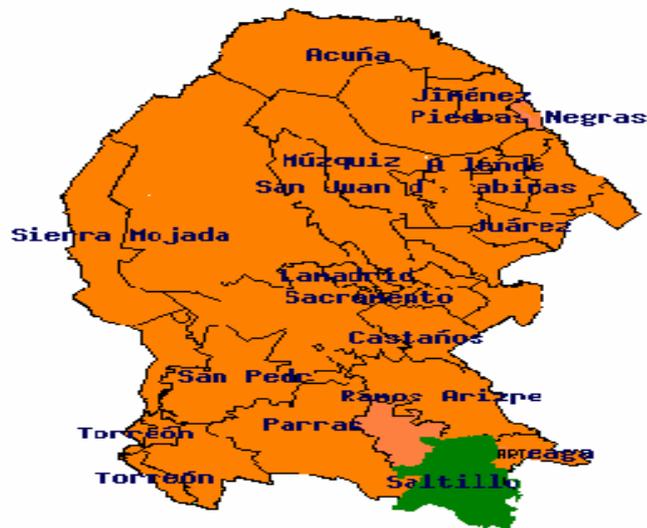


Figura. 3.1 Ubicación geográfica del sitio experimental

3.1 Preparación del terreno y recolección de muestras.

El sitio experimental fue seleccionado debido a que era un suelo sin laborar por al menos dos ciclos, una vez identificado se procedió a eliminar las malezas con la chapoleadora y se dividió en 9 parcelas de las dimensiones de 5 x 10 m, estas parcelas fueron limpiadas dejando el suelo sin cobertura vegetal, donde se les aplicó a tres de ellas Algaenzims con una dosis de aplicación 50 ml disuelto en 20 L de agua aplicado con una bomba de aspersión de mochila las otras tres se tomaron como testigo para comparar las muestras.

Se dejó el suelo reposar por 5 meses para dejar que el producto Algaenzims tuviera efecto sobre el suelo, después de ese periodo de tiempo se regaron las parcelas hasta llevar el suelo a saturación para poder obtener una humedad uniforme para después recolectar las muestras de suelo.

Se recolectaron un total de 36 muestras de suelo realizando dos repeticiones por parcelas a una profundidad de 0-5, 5-10 y 10-15 cm con una barrena de extractor de núcleo (Figura 3.2). Después de la recolección de las muestras fueron llevadas al laboratorio para su respectivo análisis.



Figura. 3.2 Recolección de muestras y barrenas extractor de núcleo.

3.2 Textura del suelo del área experimental

Para iniciar la investigación se identificó un lote de suelo de uso agrícola. Se empleo el método de Hidrometro de bouyoucos para determinar la textura del mismo (Figura 3.3).



Figura. 3.3 Identificación de la textura del suelo.

3.3 Compactación de las muestras.

Una vez obtenidas las muestras de campo; se procedió a la compactación de las mismas en laboratorio. El procedimiento es el siguiente:

Primero se pesaron el cilindro, el capacillo y la placa rectangular (esta fue usada como apoyo para que las muestras no se disturbanan al momento de compactar), y posteriormente la muestra fue llevada a la prensa neumática simuladora de compactación previamente calibrada (Figura 3.4). La muestra fue comprimida gradualmente de arriba hacia abajo hasta alcanzar una presión de 4 bars (1.5 kg/cm^2). Este valor según Perdok y Hendrikse (1982), es utilizado con el objeto de simular carga por el paso de maquinaria agrícola, posteriormente se mide la distancia entre el borde del cilindro y el nivel de suelo compactado con un vernier.



Figura 3.4 Prensa neumática.

3.4 Prueba de permeabilidad del aire.

La muestra, previamente compactada fue llevada al permeámetro de aire, (Figura 3.5), una vez colocada se midió el tiempo que tardó el flotador en recorrer 1cm de la barra conductora, también se midió la temperatura ambiente usada para determinar la viscosidad del aire. La altura después de la compresión fue determinada midiendo la distancia de la parte de arriba del cilindro hasta el suelo comprimido por medio de un vernier una vez que el suelo estuviera compactado.

La permeabilidad del aire fue calculada por medio de la formula, 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 1 cm (s)

A = Área de sección transversal (m^2)

P = Presión del aire (N/ m^2)



Figura 3.5 Permeámetro de aire

3.5 Contenido de humedad de las muestras.

Para determinar el contenido de humedad, se utilizó el método gravimétrico, por lo tanto las muestras se pesaron con la balanza digital con una precisión de 0.1 g (Figura 3.6) obteniendo así el peso de suelo húmedo (Psh). Para obtener el peso de suelo seco (Pss) se colocaron las muestras en la estufa de secado (Figura 3.7) a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, una vez transcurrido el tiempo se retiraron de la estufa y fueron pesadas nuevamente para obtener el peso de suelo seco.



Figura 3.6 Balanza digital con precisión de 0.1 g.



Figura 3.7 Estufa de secado

Obtenidos estos valores, el contenido de humedad se cálculo con la fórmula que se menciona en seguida.

$$\% H = [PSH - PSS / PSS] * 100$$

Donde:

% H = Contenido de humedad del suelo (%)

PSH = Peso del suelo húmedo (g)

PSS = Peso del suelo seco (g)

3.6 Densidad aparente (Da).

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

Para determinar la densidad aparente de cada muestra.

$$Da = PSS / Vt$$

Donde:

Da = Densidad aparente en (g / cm³)

PSS = Peso del suelo seco (g)

Vt = Volumen total de las muestras (cm³)

3.7 Porosidad del suelo.

El espacio poroso fue determinado mediante un método indirecto, utilizando la determinación de la densidad aparente para diferentes profundidades con la aplicación de la siguiente fórmula:

$$Es = \{1 - Da / Dr\} \times 100$$

Donde:

Es = Espacio poroso en %

Da = Densidad aparente (g/cm³)

Dr = Densidad real (igual a 2.65 g/ cm³)

3.8. Evaluación de los datos de laboratorio.

Para el análisis de los datos obtenidos, se utilizó el diseño experimental de bloques al azar del programa de la Universidad de Nuevo León, este método consiste en seleccionar las variables y los tratamientos al azar que se van analizar, se asignan los valores correspondientes a cada variable y el programa procesa la información de los datos. Después del análisis de ANOVA (Análisis de Varianza) se utilizó el método de diferencia mínima significativa, para el análisis de medias utilizando los datos del diseño de bloques al azar, estos datos fueron comparados con un nivel de significancia de 0.05. En la (Figura 3.8) se muestra de la distribución de las parcelas en el terreno.

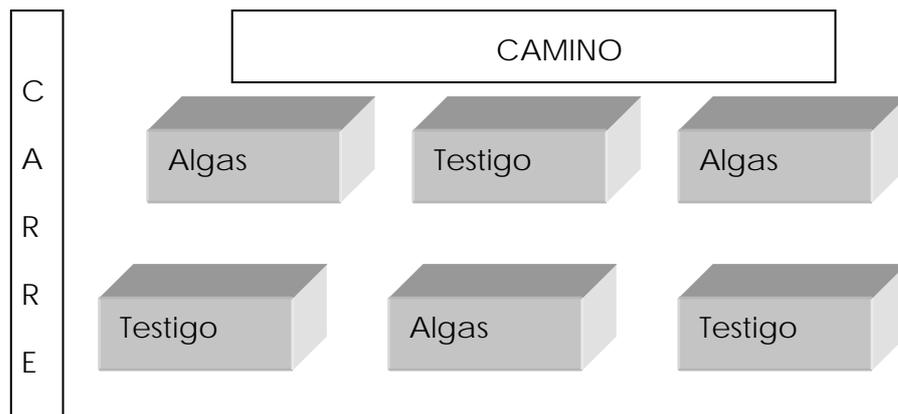


Figura 3.8 Ubicación de las parcelas al azar.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Caracterización del sitio de evaluación.

4.1 Textura del suelo.

Los resultados del suelo bajo estudio, muestran que contiene 32.5 % de arena, 33.4 % de limo y 34 % de arcilla. De acuerdo al triángulo de texturas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) corresponde a un suelo migajón – arcilloso con 2.09 % de materia orgánica (Figura 4.1), por lo que se considera medianamente rico, en este aspecto.



Figura. 4.1 Suelo de textura de migajón - arcilloso

4.2 Resultados de las condiciones físicas del suelo, en los tratamientos de Algaenzims® a los cuales se sometido el suelo.

4.2.1 Valores del porcentaje de humedad.

Las muestras de suelo fueron analizadas con los porcentajes de humedad que contenía el suelo (Tabla 4.1) se muestra el contenido de humedad a diferentes profundidades en los estratos utilizados.

Tabla 4.1 Promedio del porcentaje de humedad de las muestras del suelo.

Profundidad en cm.	Tratamiento (Algas)	Testigo
	%H	% H
0-5	25.165	28.81
5-10	21.165	28.13
10-15	20.70	21.26

4.2.2 Valores de la densidad aparente (Da).

Los datos de densidad aparente antes del experimento de laboratorio permiten tener una referencia para ver la variación con la del estado original del suelo a diferentes profundidades con la densidad del suelo después de la simulación de la compactación en laboratorio.

Tabla 4.2 Datos de la densidad aparente antes de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.

Profundidad cm.	Densidad aparente (g. cm ⁻³)	
	Tratamiento (algaenzims)	Testigo
0-5	1.1970A	1.2880B
5-10	1.3580A	1.2180 B
10-15	1.4100 A	1.3400B

Comparación de medias por el método de Diferencia mínima significativa, con un nivel de significancia de 0.05

La densidad aparente en campo después de cinco meses de la aplicación del algaenzims fue menor significativamente en un estrato de 0 a 5 cm en comparación con el testigo. A profundidades de 5-10 y 10-15 cm el valor de la densidad aparente en el testigo es menor que en el tratamiento de algaenzims (Tabla 4.2).

Tabla 4.3 Datos de la densidad aparente después de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.

Profundidad cm.	Densidad aparente (g. cm ⁻³)	
	Tratamiento (algaenzims)	Testigo
0-5	1.39 A	1.51 B
5-10	1.59 A	1.42 B
10-15	1.61 A	1.65 B

Comparación de medias por el método de Diferencia mínima significativa, por un nivel de significancia de 0.05

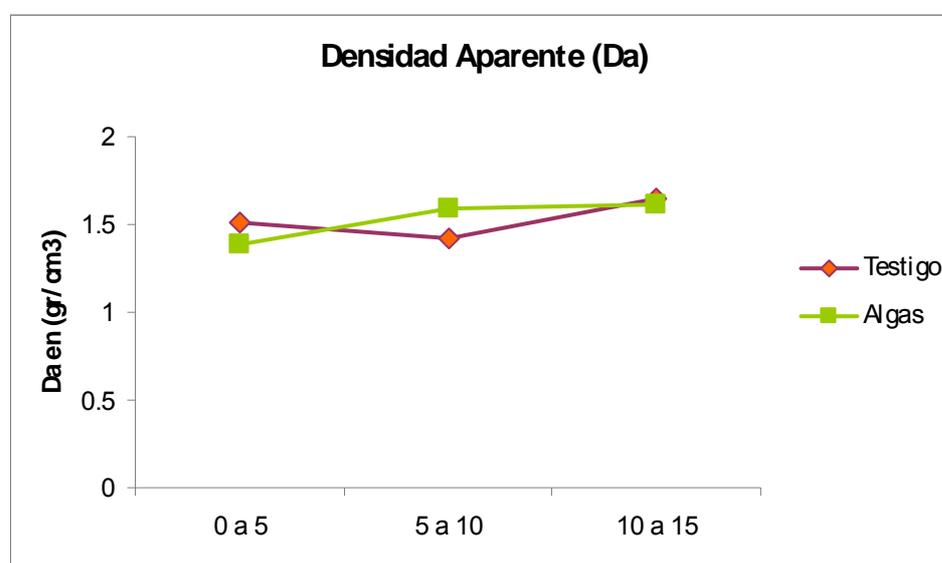


Figura 4.2 Comportamiento de la densidad aparente (Da) en los diferentes estratos.

En la tabla 4.3 se muestra el comportamiento de la densidad aparente en el tratamiento y el testigo después que las muestras fueron compactadas a una presión de 4 bars. Tomando en cuenta que el porcentaje de humedad es muy similar para las muestras en un mismo estrato, la prueba de comparación se realizó por el método de Diferencia Mínima Significativa (DMS). Este resultado que existe menor compactación de 0-5 y 10-15 cm de profundidad.

En la gráfica 4.2 se puede observar que a una profundidad de 0 a 5 cm, la densidad aparente del testigo es mayor que la del tratamiento esto indica que

el tratamiento con Algaenzims tiene un efecto positivo al aumento de la densidad aparente con la simulación de paso de maquinaria agrícola es menor en el tratamiento comparado con el testigo. En un trabajo similar por Martill Robledo, J. F. (2005). Donde se utilizo composta, menciona que la densidad aparente en un estrato de 0 a 5 cm hubo una variación significativa en la disminución de la Da, pero también recomienda que se evalué a largos periodos de tiempo para observar un efecto favorable a mayores profundidades sobre el suelo.

4.2.3 Valores de la permeabilidad del aire (Ka).

En la tabla 4.4 se muestra la relación de la permeabilidad del aire a que fueron sometidas las muestras de suelo, estas muestras fueron compactadas a una presión de 4 bars. La prueba de comparación se realizo por el método de Diferencia mínima significativa (DMS).

Tabla 4.4 Datos de la permeabilidad del aire después de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.

Profundidad cm.	Permeabilidad del aire (m ²).	
	Tratamiento (algaenzims)	Testigo
0-5	1.56 E-7 A	0.134 E-12 B
5-10	1.64 E-10A	0.135 E-13 B
10-15	1.55 E-12 A	0.211 E-13 B

Comparación de medias por el método de Diferencia mínima significativa, por un nivel de significancia de 0.05

En la tabla 4.4 la permeabilidad del aire en el tratamiento de 1.56E-7A a una profundidad de 0.5 es mayor en comparación con el testigo, esto nos indica que el algaenzims tiene un efecto pues el valor de la permeabilidad con simulación del paso de maquinaria agrícola es mayor comparado con el testigo.

A una profundidad de 5-10 y 10-15 cm la permeabilidad del aire no muestra diferencia mínima significativa esto se debe a que el tratamiento requiere de más tiempo para poder tener un efecto a esas profundidades.

4.2.4 Valores de la porosidad del suelo (P).

Los datos de la porosidad del suelo antes del experimento nos permiten realizar una comparación para ver la variación con respecto al estado original del suelo a diferentes profundidades con respecto a las muestras que se sometieron a la compactación.

Tabla 4.5 Datos de la porosidad del suelo antes de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.

Profundidad cm.	Porosidad del suelo (%)	
	Tratamiento (algaenzims)	Testigo
0-5	54.80 A	51.37 B
5-10	48.74 A	54.02 B
10-15	46.78 A	49.78 B

Comparación de medias por el método de Diferencia mínima significativa, por un nivel de significancia de 0.05

La porosidad del suelo en campo después de cinco meses de la aplicación del algaenzims fue menor significativamente en un estrato de 0 a 5 cm en comparación con el testigo. A profundidades de 5-10 y 10-15 es mayor el porcentaje de porosidad en el testigo (Tabla 4.5).

Tabla 4.6 Datos de la porosidad del suelo después de la compactación de las muestras de suelo en laboratorio.

Profundidad cm.	Porosidad del suelo (%)	
	Tratamiento (algaenzims)	Testigo
0-5	45.56 A	43.17 B

5-10	37.94 A	46.59 B
10-15	37.28 A	37.78 B

Comparación de medias por el método de Diferencia mínima significativa, por un nivel de significancia de 0.05

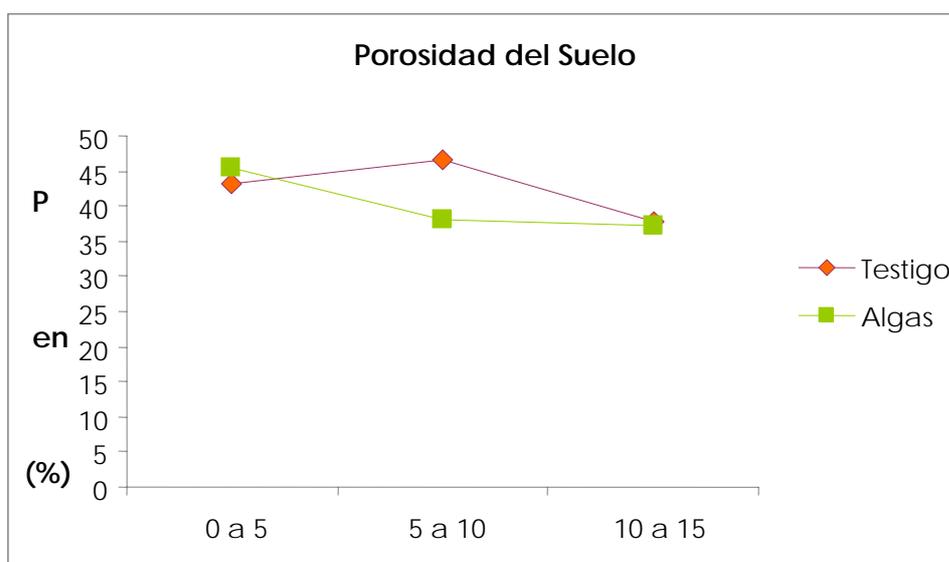


Figura 4.3 Comportamiento de la porosidad del suelo (P %) en los diferentes estratos.

En la tabla 4.6 se muestra la relación de la porosidad del suelo, estas muestras fueron compactadas a una sola presión de 4 bars. La prueba de comparación se realizó por el método de Diferencia mínima significativa (DMS). Este resultado indica que existe menor compactación en el tratamiento con algaenzims de 0-5 cm de profundidad.

La gráfica 4.3 indica que de 0 a 5 cm de profundidad el espacio poroso es mayor, en el tratamiento con algaenzims, esto nos indica que el tratamiento con algaenzims tiene un efecto positivo en la compactación de las muestras.

A mayor profundidad se puede observar en la grafica que el espacio poroso disminuyó en el tratamiento con algaenzims en comparación de la primera muestra, esto se debe a que el tratamiento requiere de más tiempo para poder tener efecto a esas profundidades.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Con base a los resultados obtenidos de la permeabilidad al aire medida con muestras compactadas en el laboratorio, se puede concluir que el tratamiento algaenzims ayuda a reducir la compactación del suelo a una profundidad de 0-5 cm de profundidad y en relación a la densidad aparente y la porosidad del suelo el algaenzims reduce significativamente la compactación del suelo, de acuerdo a que se simuló con una presión de 4 bars (1.5 kg/cm^2) del peso ejercido por la maquinaria agrícola sobre el suelo.
- En base a los resultados obtenidos en laboratorio de la densidad aparente, porosidad del suelo y la permeabilidad del aire a las profundidades de 5-10 y 10-15 cm el efecto del algaenzims no se puede apreciar debido a que se necesita más tiempo para observar los resultados en relación al efecto del algaenzims sobre el suelo.

RECOMENDACIONES.

- Se recomienda dejar por mas tiempo el tratamiento, para que este pueda tener mayor efecto sobre el suelo.
- Es recomendable realizar la aplicación del algaenzims en épocas de lluvias o bajo sistemas de riego, debido a que es un producto que trabaja con hidrólisis.
- Se recomienda realizar mas investigaciones sobre este producto de algaenzims, ya que es nuevo en el mercado y contiene nutrientes esenciales para las plantas, además de ser un mejorador de suelo que reduce la compactación del suelo.

VI. LITERATURA CITADA.

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

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

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

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

FAO, 1983. Guidelines: land evaluation for rainfed africulture. Rome, FAO Soils Bulletin 52.

Flores. F. G. 1997. Evaluación de Algas Marinas en el Cultivo de Tomate de Cascara (*physalis ixocurpa brot*) CV. Imperial. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coah, México.

- Gandoy Bernasconi (1991). Manual de laborabilidad para el manejo físico de suelos: límites de Atterberg. 1ª edición depto. De publicaciones de la dirección de difusión cultural de la UACH. Pp 123-29
- Gavande, S. 1973. Física de suelos. Principios y aplicaciones. México. Ed Limusa-Willey S.A 351 p.
- Gavande Sampat, A., 1982. Física de suelos. Principios y aplicaciones. Limusa. Composición mecánica de suelo pp 34-83
Textura del suelo.
- Hoogmoed, W. B., Cadena Zapata, m., Perdok, U. D (2003). Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, México. Soil and Tillage research. Pp 74, 169-178.
- López. Velasco. J. S. Validación con muestras de campo del límite superior de laborabilidad medido por el método de la permeabilidad del aire. Tesis UAAAN. Saltillo, Coahuila, México.
- Martill R. J. F. 2005. Influencia de la Composta Miyaorganic en la Disminución de la Intensidad de Labranza en un Suelo Migajón Arcilloso. Tesis de maestría. UAAAN. Saltillo, Coahuila México.
- Moreno Rico, D., Cadena Zapata, M., Jacome Maldonado, S., 1993. Proyecto para un centro nacional de pruebas y evaluación de maquinaria agrícola. SARH. INIFAP, Campo Experimental Cotaxtla, 25 pp.
- Mott Robert L., 1996. Mecánica de fluidos aplicad. Ed. Prentice Hall, 4ª edición, México. Pp. 572.

Olearte R. Luis, et , al., 1979. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geografico Agustin Codazz (IGAC), 4ª edición. Bogotá Colombia, pp. 664.

Ortiz Villanueva B. y Ortiz Solorio C. A., 1990. Edafología., 7ª edición, Universidad, Autonoma de Chapingo, México. Pp 394.

Ríos. Camey. S. M. 2004. Determinación del limite superior de laborabilidad de dos texturas del suelo del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) Saltillo, basado en el método de la permeabilidad del aire. Tesis UAAAN. Saltillo, Coahuila, México.

Simalenga, T. E y H. Have. 1992. Estimation of soil tillage workdays in a sem-arid area. Journal of Agric. Eng. Res. 51: 81-89

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

PAGINAS WEB CITADAS

Agroinformación, (2000). "La compactación del suelo" (documento web), [http:// www. Abcargo.com/riego/compactación suelos.asp](http://www.Abcargo.com/riego/compactación_suelos.asp) (consultado el 8 de diciembre del 2007).

www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort01/Ponencia_03.pdf (consultado el 22 de noviembre del 2007).

www.abcagro.com/riego/compactacion_suelos.asp(consulta el 21 de enero del 2008)

www.chapingo.mx/terra/contenido/19/1/art67-74.pdf (consulta el 23 de noviembre del 2007).

www.chapingo.mx/terra/contenido/17/3/art271-276.pdf (consulta el 4 de diciembre del 2007).

www.larevistadelriego.com.ar/noticias/efectos-de-la-labranza-sobre-la-velocidad.htm. (consulta el 4 de diciembre del 2007)

www.monografias.com/trabajos15/suelos-consistencia/suelos-consistencia.shtml (consulta del 24 de enero del 2008)

VII. ANEXOS

ANEXO I

Viscosidad del aire a diferentes temperaturas

Tabla 7.1

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:

$$Y = 1.772941176 \cdot 10^{-5} + 4.6470578824 \cdot 10^{-8} X$$

Con $r^2=0.99$

ANEXO 2

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

RESULTADOS DE LA PERMEABILIDAD DEL AIRE

TABLA 2.1

Algaenzims®.

Cilindro	Profundidad	% H	T (°C)	η_a (Pa*s)	L (m)	V(m ³)	A (m ²)	t (s)	P (N/m ²)
124K	0 - 5 cm	24.08	18	1.79E-05	0.0451	4.65E-04	1.96E-03	1552	323
309K	5 - 10 cm	17.63	18.7	1.79E-05	0.04488	4.65E-04	1.96E-03	28	323
144K	10 – 15 cm	19.07	18.1	1.79E-05	0.03431	4.65E-04	1.96E-03	58	323

% H = Porcentaje de humedad, T= Temperatura, η_a = Viscosidad dinámica del aire, L= Longitud de la muestra del cilindro, V = Volumen del aire del flotador, A = Área de la sección transversal de la muestra, t = Tiempo de que tardo el flotador en recorrer 1 cm de la barra conductora, P = Presión del aire del flotador, Ka = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.

TABLA 2.2

Algaenzims®.

Cilindro	Profundidad	% H	T (°C)	η_a (Pa*s)	L (m)	V(m ³)	A (m ²)	t (s)	P (N/m ²)
284K	0 - 5 cm	31.95	19	1.79E-05	0.04165	4.65E-04	1.96E-03	1309	323.
78K	5 - 10 cm	21.86	19.1	1.79E-05	0.04398	4.65E-04	1.96E-03	2127	323.
303K	10 – 15 cm	21.39	19.5	1.80E-05	0.04431	4.65E-04	1.96E-03	3371	323.

% H = Porcentaje de humedad, T = Temperatura, η_a = Viscosidad dinámica del aire, L = Longitud de la muestra del cilindro, V = Volumen del aire del flotador, A = Área de la sección transversal de la muestra, t = Tiempo de que tardo el flotador en recorrer 1 cm de la barra conductora, P = Presión del aire del flotador, Ka = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.

TABLA 2.3

Algaenzims®.

Cilindro	Profundidad	% H	T (°C)	η_a (Pa*s)	L (m)	V(m ³)	A (m ²)	t (s)	P (N/m ²)	Ka
63K	0 - 5 cm	38.38	19.7	1.80E-05	0.04293	4.65E-04	1.96E-03	12760	323.24	5.70
72K	5 - 10 cm	18.07	21.1	1.81E-05	0.04171	4.65E-04	1.96E-03	46	323.24	2.10
60K	10 – 15 cm	22.61	21.2	1.81E-05	0.04045	4.65E-04	1.96E-03	3243	323.24	1.40

% H = Porcentaje de humedad, T = Temperatura, η_a = Viscosidad dinámica del aire, L = Longitud de la muestra del cilindro, V = Volumen del aire del flotador, A = Área de la sección transversal de la muestra, t = Tiempo de que tardo el flotador en recorrer 1 cm de la barra conductora, P = Presión del aire del flotador, Ka = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.

TABLA 2.4

Testigo

Cilindro	Profundidad	% H	T (°C)	η_a (Pa*s)	L (m)	V(m ³)	A (m ²)	t (s)	P (N/
292K	0 - 5 cm	32.98	21.7	1.81E-05	0.04267	4.65E-04	1.96E-03	3262	323
291K	5 - 10 cm	24.16	22.6	1.82E-05	0.04244	4.65E-04	1.96E-03	2648	323
151K	10 - 15 cm	24.11	22.4	1.82E-05	0.0448	4.65E-04	1.96E-03	2218	323

% H = Porcentaje de humedad, T = Temperatura, η_a = Viscosidad dinámica del aire, L = Longitud de la muestra del cilindro, V = Volumen del aire del flotador, A = Área de la sección transversal de la muestra, t = Tiempo de que tardo el flotador en recorrer 1 cm de la barra conductora, P = Presión del aire del flotador, Ka = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.

TABLA 2.5

Testigo.

Cilindro	Profundidad	% H	T (°C)	η_a (Pa*s)	L (m)	V(m ³)	A (m ²)	t (s)	P (N/
127K	0 - 5 cm	25.88	22.4	0.0000182	0.0474	4.65E-04	1.96E-03	3	323
308K	5 - 10 cm	20.99	22.6	0.0000182	0.0417	4.65E-04	1.96E-03	577	323
158K	10 - 15 cm	18.82	22.6	0.0000182	0.0443	4.65E-04	1.96E-03	48	323

% H = Porcentaje de humedad, T = Temperatura, η_a = Viscosidad dinámica del aire, L = Longitud de la muestra del cilindro, V = Volumen del aire del flotador, A = Área de la sección transversal de la muestra, t = Tiempo de que tardo el flotador en recorrer 1 cm de la barra conductora, P = Presión del aire del flotador, Ka = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.

TABLA 2.6

Testigo.

Cilindro	Profundidad	% H	T (°C)	η_a (Pa*s)	L (m)	V(m ³)	A (m ²)	t (s)	P (N/m ²)
75K	0 - 5 cm	40.93	21.7	0.0000182	0.0436	4.65E-04	1.96E-03	3930	323.24
130K	5 - 10 cm	22.48	21.4	0.0000182	0.0419	4.65E-04	1.96E-03	283	323.24
121K	10 – 15 cm	21.17	21.4	0.0000182	0.0422	4.65E-04	1.96E-03	660	323.24

% H = Porcentaje de humedad, T = Temperatura, η_a = Viscosidad dinámica del aire, L = Longitud de la muestra del cilindro, V = Volumen del aire del flotador, A = Área de la sección transversal de la muestra, t = Tiempo de que tardo el flotador en recorrer 1 cm de la barra conductora, P = Presión del aire del flotador, Ka = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire.