

Universidad Autónoma Agraria

Antonio Narro

División de Ingeniería



**Impacto de la Labranza en la Porosidad del Suelo Mediante
Análisis de Imagen**

Por:

José Francisco Hernández Alvarado

Tesis

Que presenta como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Agrícola

Saltillo, Coahuila, México

Abril del 2008

Universidad Autónoma Agraria

Antonio Narro

Impacto de la Labranza en la Porosidad del Suelo mediante Análisis de Imagen

Presentado por:

José Francisco Hernández Alvarado

Tesis, que se somete a consideración del comité asesor, como requisito
parcial para obtener título de:

Ingeniero Mecánico Agrícola

Dr. Martín Cadena Zapata

Asesor principal

MC. Armando López Santos

Asesor externo

Universidad Autónoma Chapingo

Dr. Guillermo González Cervantes

Asesor externo

INIFAP

MC. René F. Domínguez López

Asesor

Dr. Raúl Rodríguez García

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Abril del 2008

Agradecimientos

De forma especial le agradezco a dios que me dio salud y fuerza para culminar una carrera profesional, lejos de mis seres queridos.

A mi **ALMA MATER**, por darme la oportunidad de aceptarme como a un hijo a educarme como todo un profesionalista.

Al **MC. Armando López Santos**, quien con su coordinación, apoyo, asesoría, y su paciencia para poder culminar este trabajo, así como también sus conocimientos transmitidos.

Al **Dr. Martín Cadena Zapata**, quien dispuso de su tiempo tan valioso y dedicación para la revisión de este trabajo, así como sus conocimientos transmitidos durante toda mi carrera.

Al **Dr. Guillermo González Cervantes**, por el asesoramiento y orientación técnica en este proyecto, con su participación y desempeño.

Al **MC. René Félix Domínguez López**, por otorgarme su valioso tiempo para revisar este trabajo muy importante para mí.

A todos los titulares de cada área en el Departamento de Maquinaria Agrícola, **M.C. Uriel Serna Fernández, M.C. Juan Antonio Guerrero Hernández, M.C. Tomas Gaytán Muñiz, M.C. Jesús Rodolfo Valenzuela, M.C. Blanca Elizabeth de la peña Casas, Ing. Juan Arredondo Valdez**. Quienes sin ellos no hubiese terminado mi preparación completa en esta universidad.

Dedicatoria

A mi abuelita:

Que con su incomparable comprensión, apoyo, educación, y amor me ha podido forjar y poder darme la oportunidad de tener una profesión, y poder luchar en la vida.

A mi madre: Por darme cariño, amor, y sobre todo por darme la vida.

A mis tíos y tías: Que también ellos han sido importante en toda mi formación, por el cariño y comprensión, y apoyo incondicional que me han brindado siempre en toda mi carrera. Especialmente a Rodolfo

A la familia Zambrano: Por darme cariño, amor, apoyo incondicional, y ayudar a mi madre.

A mis amigos:, Hugo, Flavio, Fernando, Nibardo, Jorge, Daniel, Ricardo, Ramón, Magda, Gaby, J. Candelario, Eugerio, Chelo, Vera, quienes que con su amistad, cariño, apoyo, he podido terminar mi carrera, y solo puedo decirles gracias por su apoyo incondicional.

A mis compañeros de generación, por todos lo momentos alegres que me dieron y sobre todo su apoyo incondicional en momentos difíciles de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE CUADROS	VI
RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. HIPÓTESIS	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Definición, propiedades de la porosidad del Suelo.....	4
2.1.1. Definición.....	4
2.1.2. Propiedades e importancia de la porosidad.....	5
2.2. Relación de la porosidad con otras propiedades físicas del suelo.....	7
2.3. Algunos factores que modifican la porosidad.....	8
2.4. Técnicas de estudio.....	11
2.4.1. Técnicas indirectas.....	12
2.4.1.1. Porosimetría.....	12
2.4.1.2. Densidad aparente.....	12
2.4.1.3. Modulo de ruptura.....	13
2.4.1.4. Permeabilidad.....	14
2.5. Técnicas directas.....	15
2.5.1. Tomografía computarizada.....	15
2.5.2. Análisis de imagen.....	16

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1. Localización geográfica del sitio de estudio.....	18
3.2. Características generales del área de estudio.....	18
3.2.1 Clima.....	18
3.2.2. Vegetación.....	19
3.3. Aplicación de los tratamientos.....	20
3.4. Técnica avanzada de imagen para determinar porosidad...	21
3.4.1 Muestreo.....	21
3.4.2. Procesamiento de las muestras.....	22
3.4.3. Variables medidas.....	25
3.4.4 Análisis estadístico.....	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1. Porosidad teórica.....	27
4.2. Porosidad real.....	28
4.2.1. Porosidad en el tratamiento testigo.....	28
4.2.2. Porosidad en los tratamientos Iv y Ic.....	31
4.2.3. Representación grafica de la porosidad.....	32
4.2.4. Resultados de la comparación estadística.....	33
V. CONCLUSIONES.....	35
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	36
VII. ANEXOS.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig.1 Representación teórica de las 3 fases del suelo, a una profundidad D.....	4
Fig. 2 Representación de fotografía en el método de técnica avanzada de análisis de imagen.....	16
Fig. 3 Ubicación geográfica del Rancho “Los Ángeles” en UTM, con respecto al territorio nacional sin escala.....	19
Fig. 4 Acciones de labranza, De izquierda a derecha, labranza vertical y convencional, respectivamente.....	20
Fig. 5 Distribución de suelos y localización de las parcelas experimentales.....	21
Fig. 6 Muestra inalterada para su traslado al laboratorio.....	22
Fig. 7 Ilustración de los pasos requeridos para la preparación de las muestras en el laboratorio.....	25
Fig. 8 Porosidad medida en porcentaje en el testigo a 5 y 10 cm de profundidad.....	29
Fig. 9 Distribución del sistema radicular en el perfil de suelo a 0-15 y 15-30 cm de profundidad.....	30
Fig. 10 Matriz de la porosidad medida (%) en función de la profundidad (cm) del suelo sometido a LV.....	31
Fig. 11 Matriz de la porosidad medida (%) en función de la profundidad (cm) del suelo sometido a LC.....	32
Fig. 12 Morfología de los tratamientos y el testigo.....	33

ÍNDICE DE CUADROS

	Págs.
Cuadro 1. Características funcionales del sistema poroso en relación al tamaño y estado del agua.....	7
Cuadro 2. Equivalencias de imagen para la conservación de unidades de medición en escala M1.....	24
Cuadro 3. Equivalencias de imagen para la conservación de unidades de medición en escala M2.....	24
Cuadro 4. Densidad aparente (g/cm^3) y porosidad total por estrato en porcentaje.....	27
Cuadro 5. Especies identificadas en el área definida como testigo.....	30
Cuadro 6. Resultados del ANDEVA para porosidad expresada en porcentaje de área de poros.....	34
Cuadro 7. Resultados de la PRS de Tukey.....	34

Impacto de la Labranza en la Porosidad del Suelo mediante Análisis de Imagen

RESUMEN

La porosidad es el mejor indicador de las condiciones de estructura del suelo, y las mediciones del espacio poroso han sido usadas para cuantificar la estructura del suelo en su tamaño, forma y continuidad de poros que afectan muchos de los procesos en el suelo. Se ha demostrado ampliamente que las prácticas de labranza modifican la estructura del suelo al incrementar o disminuir el volumen de suelo, acción que modifica directamente el espacio poroso y por tanto los procesos asociados a este, como son los fenómenos relacionados con el movimiento de agua en el suelo y las relaciones de humedad, el intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera, así como los procesos biológicos por cambios en las relaciones de humedad y temperatura del suelo, principalmente.

En este contexto, el presente trabajo se enfocó a la medición y comparación de la porosidad en un suelo de pastizal convertido a uso agrícola, mediante el empleo de una técnica avanzada de imagen. Para ello, en el Verano del 2007 en el rancho "Los Ángeles del Municipio de Saltillo, Coahuila; México (25° 6.650' N y 100° 59.413 O) se aplicaron dos tratamientos, uno mediante el uso de un arado de cinceles (LV) y otros con arado de discos (LC) en 2 parcelas de 2.4 ha cada una y un testigo en un área de pastizal adyacente a estas dos. Los resultados indican que los cambios más significativos ($\alpha = 0.1$) en la porosidad para rangos de poros de entre 2 y 10 mm², se producen por efecto de LV.

Palabras claves: Porosidad, Labranza, Técnica Avanzada de Imagen

I. INTRODUCCIÓN

El impacto de las prácticas agrícolas (labranza) sobre el funcionamiento hídrico y la degradación del suelo, puede ser analizada por su estructura (arreglo de los constituyentes de la fase sólida y morfología de los poros), la calidad física de los suelos, es también caracterizada, al promedio de indicadores estructurales.

Lo anterior se basa, sobre la combinación de dos tipos de métodos; uno sobre mediciones físicas que determinan los parámetros hidrodinámicos del suelo (infiltrometría y retención), el otro en base a mediciones morfológicas que determinan la organización de la estructura (análisis de imagen).

Se ha demostrado ampliamente que las prácticas de labranza modifican la estructura del suelo al incrementar o disminuir el volumen de suelo, acción que modifica directamente el espacio poroso y por tanto los procesos asociados a este, como son los fenómenos relacionados con el movimiento de agua en el suelo y las relaciones de humedad, el intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera, así como los procesos biológicos por cambios en las relaciones de humedad y temperatura del suelo, principalmente. (Ceaba, 1998).

El movimiento y la distribución de fluidos a través de los medios porosos están determinados por su geometría. La naturaleza auto similar de la estructura de estos medios ha sido el objeto de numerosos estudios que han documentado las relaciones entre las principales medidas de poros, y la resolución del método utilizado para su análisis (Henderson, 1979; Lal y Vandoren, 1990; Kay y Vanden, 2002; Udawtta, 2008). La presente investigación tiene como propósito medir algunos rasgos de los poros. La técnica de análisis de imagen consiste en la obtención de muestras de suelo sin alterar, que son sometidas a

un proceso de preparación en base a la metodología propuesta por Fitzpatrick y Gudmunson (1975), mismas que son digitalizadas por medio de un proceso fotográfico que registra primordialmente la reflectancia de rayos uv (Ultra violeta).

1.1. OBJETIVOS

El estudio de la calidad física del suelo, relacionadas con la porosidad, prevé la posibilidad de generar información directa sobre los cambios debidos a los sistemas de labranza, mediante el empleo de una técnica avanzada de análisis de imagen; con los siguientes objetivos particulares:

2.1. Medir los cambios de la micro y macroestructura en el perfil de suelo en términos de porcentaje, en sus estratos 0-15 y 15-30 cm., impactado por las operaciones de labranza;

2.2. Determinar la morfología de poros a lo largo del perfil (0-30 cm.), en cuanto a: número, área, tamaño, y forma.

1.2. HIPÓTESIS

“La labranza vertical (LV) y convencional (LC) ejercen cambios significativos en la porosidad del suelo en cuanto a los rangos de tamaño y distribución de poros en el perfil del suelo.”

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Definición, propiedades e importancia de la porosidad del suelo

2.1.1. Definición

Bolonga (1970), Gavande (1982) y Donoso (1992), entre otros, definen a la porosidad como la suma de porcentajes de poros o espacios vacíos de diferente tamaño existentes en una masa de suelo. Esta propiedad, plantea Bolonga (1970) es resultado o consecuencia de la textura y estructura del suelo, o de la manera en que están acomodadas y empacados las partículas y agregados del suelo. Es decir, el espacio poroso está constituido por todo el volumen aparente no ocupado por sólidos. Este concepto, teóricamente se representan en la figura 1, en la que se definen las tres fases del suelo: sólido (V_s), líquido (V_w) y gaseoso (V_a).

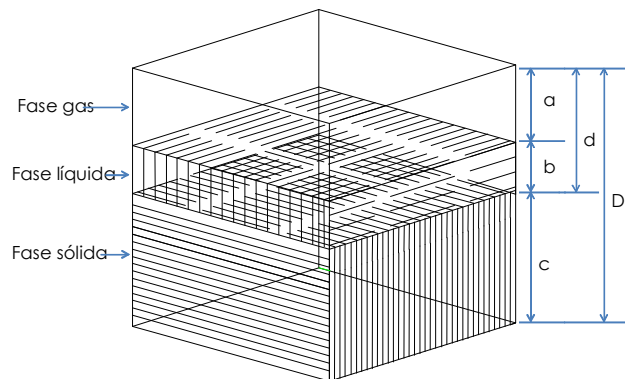


Fig. 1. Representación teórica de las 3 fases del suelo, a una profundidad D .

Por lo tanto, la porosidad del suelo (e) podría expresarse en términos de masa, pero, debido al peso insignificante del aire contenido en los poros,

comparado con la masa de agua y suelo, comúnmente se expresa en términos del porcentaje. De manera que el valor de e está dado por el cociente de volumen poroso total con respecto al volumen aparente del suelo, o sea (1):

$$e = \frac{\text{Volumen poroso total}}{\text{Volumen aparente del suelo}} \quad (1)$$

Es decir, el volumen poroso total está representado por el espacio que comparten las fases líquida y gaseosa ($D^2 \times d$) y el volumen aparente del suelo está conformado por todo el cubo (D^3), por lo que la ecuación (1) puede expresarse igualmente como (2):

$$e = \frac{dD^2}{D^3} = \frac{d}{D} = (1-d/D) \quad (2)$$

Ahora, si se considera a d como la densidad aparente del suelo (D_a) y D como la densidad real (D_r), en la que el valor de referencia en la literatura (Gavande, 1982) es de 2.6 g cm^{-3} , entonces la ecuación final queda como (3):

$$e = (1-D_a/D_r) \quad (3)$$

2.1.2. Propiedades e importancia de la porosidad

El estudio de la porosidad del suelo, básicamente se asocia a la función que esta tiene como medio a través de los cuales circula el agua, aire, solutos, así como hábitat de micro y macroorganismos, condición bajo la cual se crea un ambiente para la rizosfera (Gavande, 1982).

Es así que, los poros vistos como un sistema de sólidos y vacíos, suelen diferenciarse entre: poros macroscópicos y poros microscópicos. Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, pues es a través de ellos que el agua pasa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad; mientras que los segundos, en cambio, están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares (Donoso, 1992).

La alta porosidad del suelo es indicadora de buen sitio si se comparan dos suelos similares en otras características. En cambio, suelos de baja porosidad indican normalmente sitios malos (Lutz y Chandier, 1959) citado por Donoso 1992. Por lo tanto, la porosidad de los suelos influye en la distribución de la vegetación y en las decisiones que se tomen respecto a su manejo (Ibarra, 2005).

La relación entre la capacidad de almacenaje y el movimiento del agua en los suelos, con la porosidad es evidente y fundamental. Sin embargo no es solamente la cantidad total de poros en el sólido lo que define el comportamiento hídrico del suelo, sino también y en muchos casos de manera predominante, las características específicas del sistema poral, en términos de forma, tamaño y distribución (Gil, 2001), como se indica en el Cuadro 1.

Desde el punto de vista agronómico, la distribución de tamaño no solo incide sobre la cantidad de agua que puede retener el suelo, sino que regula la energía con que la misma está retenida, el movimiento hacia la planta, hacia la atmósfera y hacia otras zonas del suelo; procesos todos regulados por diferencias de estados de energía (Gil, 2001).

Cuadro 1. Características funcionales del sistema poroso en relación al tamaño y estado de energía del agua.

Tipo	Tamaño (micras)	Tensión (atm)	Función
Macroporos	> 60	0.05	aireación, infiltración, conductividad Saturada
Mesoporos	60 – 10	0.05-0.33	Conducción lenta
Microporos	10 – 0.2	0.33-15	Almacenaje
Microporos	< 0.2	< 15	Agua no disponible

Fuente: Gil, 2001.

2.2. Relación de la porosidad con otras propiedades físicas del suelo

Así como la textura, la porosidad en forma análoga se relaciona con todas las propiedades físicas del suelo, esto como ya se dijo, debido a que es productos de la textura y la estructura (Gil, 2001).

Se sabe que la mayoría de los suelo presentan cambios de estructura con la profundidad, por lo tanto, el tamaño, forma y distribución de los poros es una característica asociada a esta. Por ello, la mayor parte de los métodos utilizados para evaluar la estructura del suelo, como densidad aparente, análisis de agregados, y módulo de ruptura, entre otros, de manera indirecta dan información sobre la relación del arreglo físico entre sólidos y vacíos (Guerif, 1987).

Del mismo modo, la agregación como resultado de procesos físicos, químicos, biológicos y bioquímicos, al final de cuentas expresa la relación entre sólidos y vacíos. Pues un buen arreglo de agregados implica una buena distribución de poros, de tal manera que le permita a estos retener su identidad, a pesar de las gotas de lluvia o que se les sumerja temporalmente, propiedad conocida como estabilidad estructural (Narro, 1994).

La aireación y el agua del suelo pueden estar ocupando el mismo espacio en forma recíproca, por ello, son dos de las propiedades más importantes que deben observarse (Narro, 1994).

Desde el punto de vista fisiológico, por ejemplo, para las plantas cuando la concentración del dióxido de carbono (CO_2) se torna muy alta y la del oxígeno (O_2) muy baja, el crecimiento de las plantas se retarda, pues la velocidad de difusión de gases a la atmósfera está en relación directa con la porosidad (Torres, 2005).

El agua en el suelo, como un fenómeno en constante movimiento puede ser expresado como infiltración y permeabilidad, los cuales están intrínsecamente relacionadas con el tamaño de poros y la estabilidad de las unidades estructurales (Gavande, 1982).

2.3. Algunos factores que modifican la porosidad

La porosidad es una propiedad que puede variar por la acción de cambios estacionales de la estructura debido a las prácticas de laboreo del suelo, crecimiento de las plantas, irrigación, lluvia y prácticas de manejo (Kung *et al.*, 2005).

Particularmente, los cambios en la formación de agregados, y por tanto la porosidad, se debe primordialmente a que las partículas de suelo y los microagregados son continuamente reagrupados dentro de la matriz del suelo por medio de procesos de humedecimiento-secado y congelamiento-descongelamiento, bioturbación (cambios negativos en micro y macroorganismos), labranza y tráfico de maquinaria, para formar y destruir macroagregados. Los macroagregados son estabilizados por medio de varios constituyentes bioquímicos, y fuerzas fisicoquímicas (Plante, 1999). Sobre esto último, Gavande (1986), previamente había dicho que: "...suelos en descanso poseen una doble capa eléctrica favorable, tienden a regenerar agregados y producir una estructura favorable."

Pero para Ellis *et al.* (1979), la explicación más probable del aumento de poros continuos en los suelos no labrados está asociada a las grietas que se producen entre los elementos estructurales.

Ellis (1979) creen que puede deberse también a una mayor actividad de las lombrices. Este aspecto también fue cuantificado por De Battista *et al.* (1997), quienes encontraron por debajo de la capa superficial cubierta por rastrojo de soya, una zona de gran porosidad estructural por acción de las lombrices.

Por otro lado, otros autores [Bonne *et al.*, (1976); Pidgeon & Soane (1977); Gantzer & Blake (1978) y Lindstrom *et al.*, (1984)], coincidieron en señalar dos características de los suelos bajo siembra directa con relación a sistemas convencionales: los valores de densidad aparente del suelo son superiores y el volumen de los grandes poros (con diámetros equivalentes mayores a 50 mm), o de los poros de transmisión, resulta menor en los horizontes superficiales.

No obstante, para Henderson (1979), siempre que las condiciones físicas del suelo sean favorables para el desarrollo de las raíces, la porosidad presente debe garantizar el agua y aire necesarios.

La estabilidad de la porosidad textural, frente a las acciones compactadoras externas, permite considerar este análisis del espacio poroso en los estudios de compactación del suelo y en sus efectos sobre el desarrollo del cultivo. Fies & Zimmer (1982) y Guerif (1987), citados por Sánchez-Girón (1996), comprobaron que dentro del intervalo de presiones al que se encuentran sometidos los suelos agrícolas, excepto en los casos donde la textura es muy arenosa, la porosidad textural se mantiene estable.

El uso y manejo agrícola provoca modificaciones en la porosidad natural del suelo, afectando la entrada de agua desde la superficie y su redistribución y posterior almacenamiento en los horizontes inferiores. El tamaño de poros define su funcionalidad y presenta importancia directa sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

En tal sentido, los poros de transmisión (>50 mm) son los encargados del movimiento del aire y el drenaje del exceso de agua en el suelo, los comprendidos entre 0.5 y 50 mm son los responsables del almacenamiento y sesión a las plantas, mientras que los < 0.5 mm son los encargados de la difusión de los iones en solución. En tal sentido, pueden existir problemas de circulación de agua y traspaso a los horizontes inferiores, además de aeración insuficiente en períodos húmedos afectando el normal crecimiento y desarrollo de los cultivos (Greenalnd, 1977).

Numerosos trabajos demuestran que en siembra directa (SD) hay una mejora de las propiedades físicas de la superficie del suelo (Lal y Vandoren, 1990; Kay y Vanden Bygaart, 2002, entre otros). Fundamentalmente, se

destaca el papel de las raíces y la actividad de lombrices e insectos que juegan un rol importante en la generación de macroporos. En contraposición, en SD se han registrado aumentos de la densidad del suelo, aunque en la mayoría de las veces no va acompañado con una merma en los rendimientos de los cultivos.

Udawatta *et al* (2008) señalan que las operaciones de labranza en las áreas de cultivo crean más poros cerca de la superficie e interrumpe la continuidad de poros; y también que: “inmediatamente después de la labranza la conductividad hidráulica saturada en la superficie del suelo es mayor, pero disminuye con el tiempo.

Finalmente, estos mismo autores (Udawata *et al.*, 2008), como parte del Conservation Reserve Program (CRP-US) estudiaron y confirmaron la manera en que praderas naturales restauradas, de la parte central de Missouri, mejoraron las propiedades físicas del suelo y los parámetros de poros, comparándolas con parcelas bajo sistema de rotación maíz-frijol soya; y dicen que: “...Las diferencias fueron mayores a 10 cm de la superficie que a mayor profundidad.” Y que: “Los suelos de pradera natural mostraron diferencias a través del perfil comparado con los suelos de cultivo.”

2.4. Técnicas de estudio

La relación entre sólidos y vacíos del suelo implica un sin número de técnicas desarrolladas dentro de la Física de Suelo. En particular las que se enfocan a la estructura, tales como: Densidad aparente, Módulo de Ruptura, Infiltración y Permeabilidad (al agua y al aire), prevén información relacionada con el espacio poroso, pero no de la porosidad en términos de sus parámetros (tamaño, forma, distribución, circularidad y dimensión fractal (Coster y Chermant, 2001).

Para conocer las propiedades del espacio poroso, se han desarrollado diferentes técnicas que proporcionan información muy precisa. Algunas de las cuales se mencionan a continuación.

2.4.1 Técnicas indirectas

2.4.1.1 Porosimetría

Entre las técnicas indirectas, en las cuales se determina la distribución y el tamaño de poros a partir de una variable, como puede ser, porosimetría de mercurio (Diamond y Leemam, 1995; y Diamond, 1999).

Con respecto a la porosimetría por inclusión de mercurio, Cook y Hover (1999) afirman que esta técnica arroja resultados rápidos y reproducibles y cubre casi todo el rango posible de tamaños de poros, presenta dificultades cuando los mismos muestran formas irregulares ya que los volúmenes determinados no son totalmente representativos. Corroborando esta afirmación, Feldman (1985) y posteriormente Suryavanshi et al. (1995), acotan que las distribuciones y el tamaño de poros obtenidos por esta técnica son solamente útiles para realizar medidas comparativas, en un mismo material. Siguiendo con este contexto, la porosimetría de mercurio (MIP) actualmente se encuentra en discusión.

2.4.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente se define como el peso seco de una unidad de volumen de suelo. Los factores que la afectan son principalmente tres: la textura, la estructura y la presencia de materia orgánica. Suelos con texturas arenosas tienden a tener densidades mayores que suelos muy finos, al mismo tiempo en suelos bien estructurados los valores son menores. Valdés (citado por Donoso, 1992).

La densidad aparente del suelo es un buen indicador de ciertas importantes características del suelo, a saber: porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración.

En un tipo de suelo los valores bajos de densidad aparente implican suelos porosos, bien aireados con buen drenaje y buena penetración de raíces, todo lo cual significa un buen crecimiento y desarrollo de los árboles (Ibarra, 2005).

2.4.1.3 Módulo de ruptura

El módulo de ruptura es la fuerza de cohesión aplicada sobre el área de un cilindro de suelo en posición horizontal hasta conseguir su ruptura. La ruptura de los suelos puede presentarse de distintas formas: repentina, rígida o con grandes deformaciones y remanentes. La ruptura misma también puede tener una condición de grieta que sea satisfecha a lo largo de una superficie única, llamada superficie de deslizamiento o falla, mientras que el resto del suelo se encuentre en estado elástico. Las deformaciones de la masa de suelo se deben principalmente a los deslizamientos entre las distintas partículas. Por esta razón se debe entender por resistencia de una masa de suelo, su resistencia al esfuerzo cortante (Kezdi, 1975).

Se toma el cilindro de suelo, secado en estufa a 50 °C y se mide su longitud y diámetro. Luego se coloca en forma horizontal sobre el plato inferior del aparejo para su medición. Se le da vuelta a la manilla de manera constante (1 vuelta/seg), aplicando con el plato superior una fuerza vertical que sea capaz de romper el cilindro de suelo. En este momento la aguja indicadora de la fuerza marca un máximo, regresándose bruscamente. Aquí se registra la lectura máxima. Si la misma supera 900 libras con el anillo de 250, este último debe ser cambiado por uno de 500 libras. Con la lectura obtenida y el gráfico de calibración del aparejo se obtiene el valor de la fuerza en libras (Pla, 1977).

La medición de la fuerza de cohesión entre las partículas cuando el suelo se seca, está relacionada con la resistencia a la roturación del suelo, formación de terrones duros, costras y resistencia mecánica de las plantas a su extensión radical. En este sentido, se puede mencionar que valores del módulo de ruptura mayores de 3 kg/cm², indican posibles problemas a los efectos de alta cohesión en seco, antes señalado (Pla, 1977).

El módulo de ruptura se puede medir en costras de suelo y se ha encontrado que está relacionado con la emergencia de plántulas y el rendimiento de algunos cultivos (Gavande, 1973).

2.4.1.4 Permeabilidad

Permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- a. La porosidad del material
- b. La densidad del fluido considerado, afectada por su temperatura y
- c. La presión a que está sometido el fluido.

Para ser permeable un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, estos deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos a través del material (Wikipedia, 2008).

2.5. Técnicas directas

2.5.1. Tomografía computarizada

La tomografía axial computarizada, también conocida por la sigla TAC o por la denominación escáner, es una técnica de diagnóstico utilizada en medicina. Tomografía viene del griego *tomos* que significa corte o sección y de *grafía* que significa representación gráfica. Por tanto tomografía es la obtención de imágenes de cortes o secciones de algún objeto (Wikipedia, 2008).

LA TAC es una exploración de rayos X que produce imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, la TAC obtiene múltiples imágenes al rotar alrededor del cuerpo. Una computadora combina todas estas imágenes en una imagen final que representa un corte del cuerpo como si fuera una rodaja. Esta máquina crea múltiples imágenes en rodajas (cortes) de la parte del cuerpo que está siendo estudiada (Wikipedia, 2008).

El aparato de TAC emite un haz muy fino de rayos X. Este haz incide sobre el objeto que se estudia y parte de la radiación del haz lo atraviesa. La radiación que no ha sido absorbida por el objeto, en forma de espectro, es recogida por los detectores. Luego el emisor del haz, que tenía una orientación determinada (por ejemplo, estrictamente vertical a 90°) cambia su orientación (por ejemplo, haz oblicuo a 95°). Este espectro también es recogido por los detectores. El ordenador 'suma' las imágenes, promediándolas. Nuevamente, el emisor cambia su orientación (según el ejemplo, unos 100° de inclinación). Los detectores recogen este nuevo espectro, lo 'suman' a los anteriores y 'promedian' los datos. Esto se repite hasta que el tubo de rayos y los detectores han dado una vuelta completa, momento en el que se dispone de una imagen tomográfica definitiva y fiable (Wikipedia, 2008).

2.5.2. Análisis de Imagen

El análisis de imagen, es un proceso que consiste en la digitalización que se basa en adquisición, almacenamiento, análisis y visualización de datos que producen información estadística y gráfica a partir de la manipulación de las propiedades de la imagen digitalizada en un proceso que divide a la imagen en una rejilla o cuadrícula de pequeñas regiones llamadas elementos fotográficos o píxeles (Image Pro Plus, 2001) como se muestra en la figura 2.

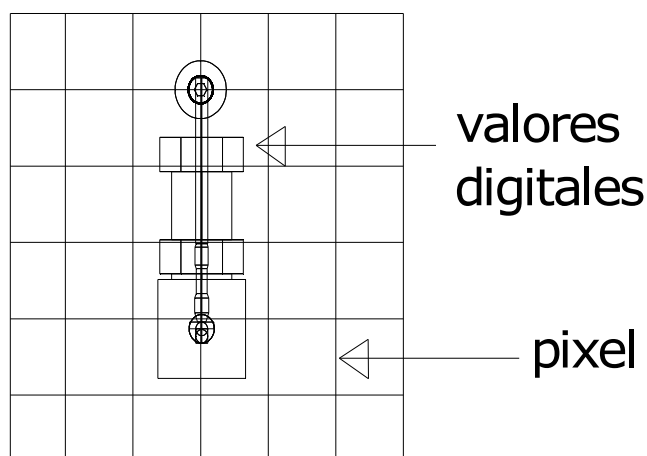


Figura. 2. Representación de fotografía en el método de técnica avanzada de análisis de imagen.

En la computadora la imagen es representada por esta rejilla digital o mapa de bites y cada píxel es identificado mediante su posición en la rejilla con un número referenciado en su renglón (x) y columna (y) (Image Pro Plus, 2001). Pero, las diferencias sobresalientes observadas durante la presente investigación, entre otras, están relacionadas con el proceso de transformación de la imagen y el ajuste de la escala.

El análisis digital de imagen (ADI) se puede definir como el procesado al que se somete una imagen para generar otra, que conserva ciertas características de la original (Davis, 1983). Esta técnica permite transformar la

imagen de partida en una final, de la cual podemos extraer datos reales del objeto del estudio, en este caso porcentaje de porosidad, tamaño y geometría de los poros. El análisis digital de imágenes es una herramienta importante para caracterizar el comportamiento de materiales cuando es necesaria información morfológica (Coster y Chermant, 2001).

III. Materiales y Métodos

3.1. Localización geográfica del sitio de estudio

El presente trabajo se realizó en el rancho experimental “Los Ángeles” propiedad de la UAAAN, según se puede ver en la Figura 3, está localizado en el municipio de Saltillo, Coahuila, México, aproximadamente a 34 Km. Al sur de la capital del estado. Por la carretera Saltillo-Concepción del Oro, Zacatecas, en el Km. 318.5 entronca un camino de terracería con dirección oriente rumbo al Ejido Hedionda Grande, y en el km. 4 de este camino da principio el rancho, terminando en el km. 15, localizándose entre las coordenadas UTM 2 772,627 y 2 782,427 m de latitud Norte y 291,514 y 302, 137 m de longitud Oeste. Su altitud es de 2100 en los valles y 2400 msnm en la cima de la sierra (Serrato, 1983). Las muestras se obtuvieron el 2 de julio al 10 de agosto 2007, en este periodo se realiza la primera etapa que fue el trabajo de campo.

3.2. Características generales del área de estudio

3.2.1. Clima

El clima del lugar de acuerdo a García, E. (1973) es seco árido, semicálido, con invierno fresco, con temperatura media anual que fluctúa entre 18 y 22 °C, con lluvias en promedio anual de 450 a 550 mm distribuidas primordialmente en verano e invierno.

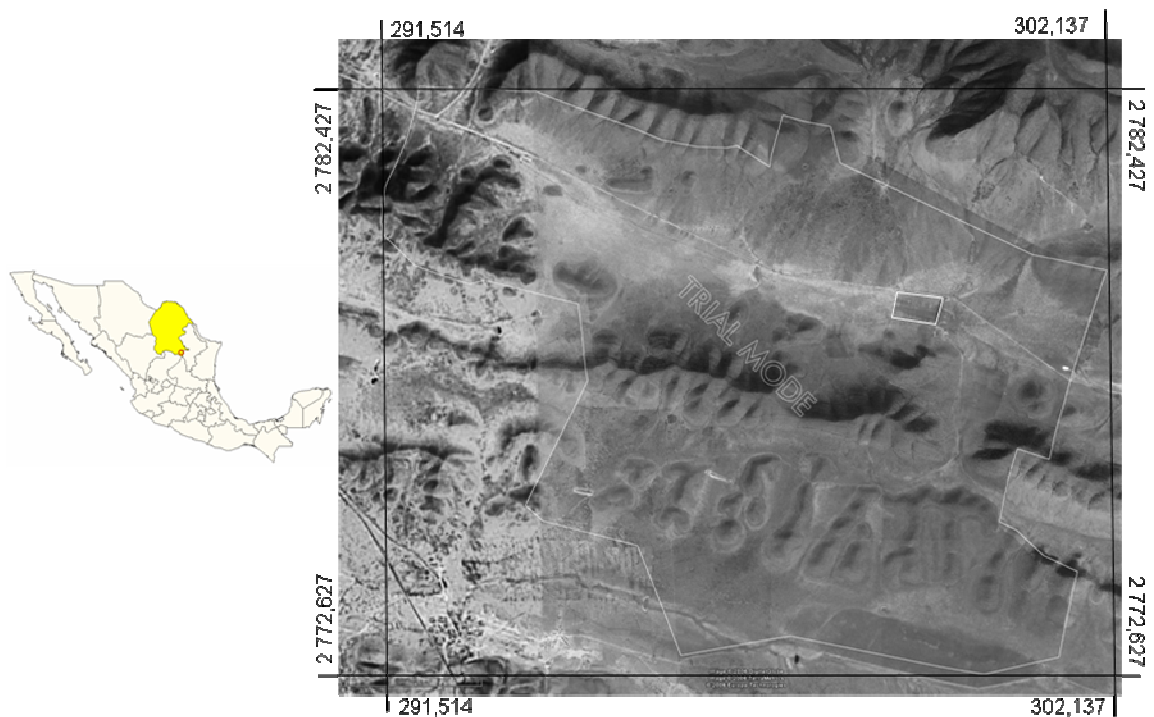


Figura 3. Ubicación geográfica del Rancho “Los Ángeles”, en UTM, con respecto al territorio nacional (sin escala).

3.2.2. Vegetación

Por otro lado, con base en el estudio de digitalización realizado, a partir de la referencia cartográfica del INEGI (1976) y corroboraciones de campo, se encontró que la vegetación tiene una distribución que se relaciona con las características topográficas del lugar. Por ejemplo, en la planicie dominados por suelo aluviales predominan los pastizales naturales combinados con matorral inerme, en las laderas de la sierra predomina la vegetación de matorral rosetófilo espinoso asociado con Izotal, y por último, en las partes altas de la sierra predomina la vegetación de pino con matorral inerme.

Asimismo, se encontró que de los grupos definidos por la FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG (1994) los Fluvisoles ocupan las planicies del 40 % de la superficie total, que se caracterizan por ser profundos, con un horizonte superficial de color oscuro y rico en materia orgánica y los Leptosoles en el 60

% de la superficie restante, los cuales, se encuentran en las serranía compuesta por laderas y mesetas, con presencia de afloramiento rocoso y una capa delgada de suelo, siendo éstos los más susceptibles a la erosión; y además, en la parte alta de la sierra se encuentran suelos forestales de formación in situ ricos en materia orgánica y humus.

3.3. Aplicación de los tratamientos

El día 7 de Junio, 2007, se aplicó el primer tratamiento, denominado labranza vertical (LV), que consistió en el uso de un arado de cinceles provisto con aletas en delta a una profundidad promedio de 25 cm, conectado a un tractor New Holland modelo 6810 de 95 hp. Posteriormente, el 26 de Junio, se realizó el segundo tratamiento, denominado labranza convencional (LC), también a 25 cm de profundidad accionado con un tractor John Deere, modelo 3200 de 84 hp. Ambas acciones se ilustran en la Figura 4.



Figura 4. Acciones de labranza. a) Labranza vertical y b) convencional.

Para contrastar el efecto de las dos prácticas de labranza antes descritas, se seleccionó un área adyacente a estas dos, áreas que se encuentran en el mismo tipo de suelo, como se puede ver en la Figura 5, en un Feozem (cálcico) (Hc). Además, el área elegida como referencia o testigo, tiene como característica

que es un área de pastizal mediano abierto dominada por *Stipa clandestina*, conocido localmente como Zacate picoso.

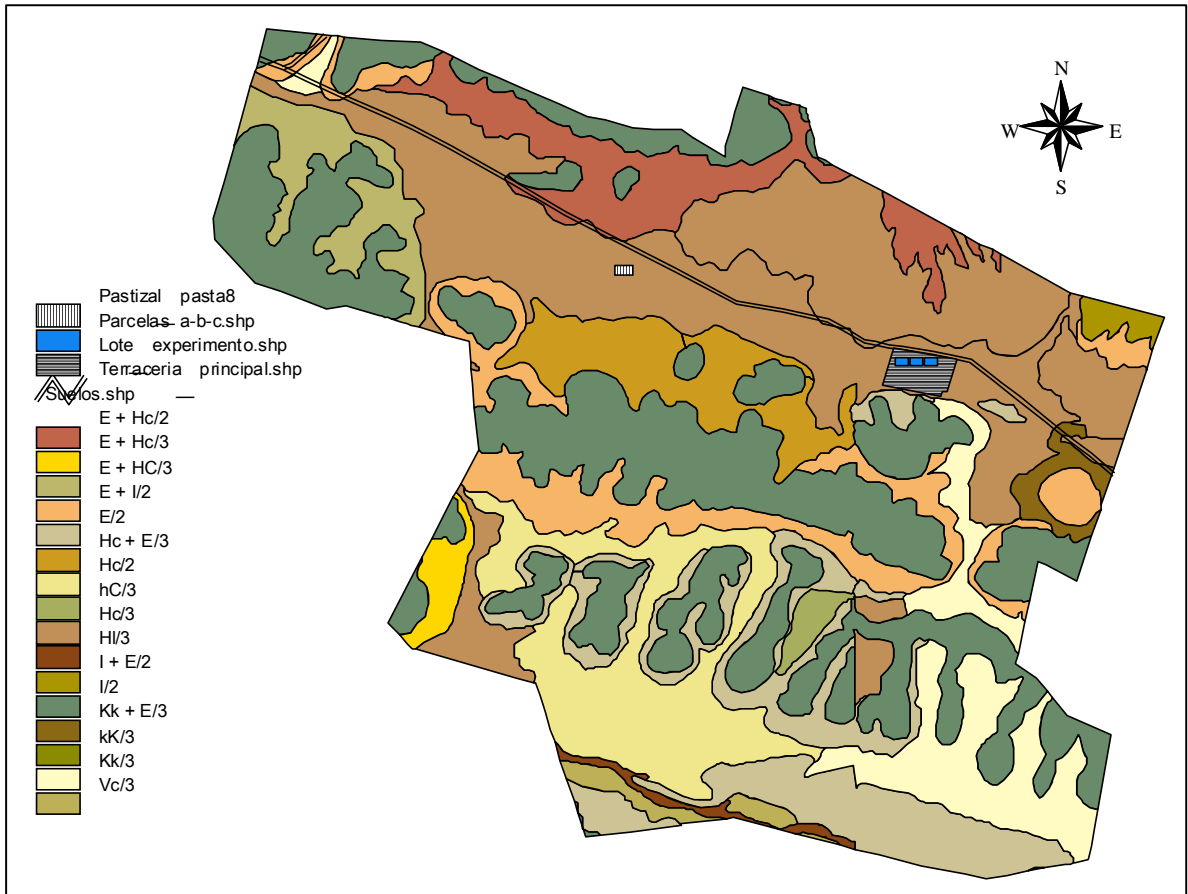


Figura 5. Distribución de suelos y localización de las parcelas experimentales

3.4. Técnica Avanzada de Imagen para determinar porosidad

3.4.1. Muestreo

De los sitios descritos anteriormente, se obtuvieron muestras inalteradas, en forma de monolitos de dimensiones 15X15X15 cm a dos profundidades: 0-15 y 15-30 cm. Las cuales se impregnaron con parafina en campo, (Figura 6) para mantenerlas intactas por efecto del traslado.



Fig. 6. Muestra inalterada para su traslado al laboratorio.

3.4.2. Procesamiento de las muestras en el laboratorio

Las muestras obtenidas en campo, se trasladaron al laboratorio de Física de Suelo y Análisis de Imagen del Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias en Relación-Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (CENID-RASPA-INIFAP), ubicado en el Km. 6+500 margen derecho del canal sacramento en Gómez Palacio Durango.

Los pasos que se siguieron para la preparación de las muestras, de acuerdo a la metodología probada por varios autores (Bourrier 1965; Fitzpatrick y Gudmunson, 1978; y Gonzáles-Cervantes, 2004), se representa de manera general en la Figura 7 y consta de los siguientes pasos:

Paso 1. Registro de laboratorio con los datos de campo, con la finalidad de emplear solamente números consecutivos;

Paso 2. Colocación de las muestras en una cámara de intercambio de agua por acetona (CH_3COCH_3), mediante un proceso que duró en

promedio 72 horas, mediante el empleo de una bomba peristáltica (modelo 77200-60). Este proceso permite que la muestra mantenga la consistencia y aspecto natural como se encuentra en el campo (húmeda).

Paso 3. Para continuar con la preparación de la muestra, se colocan en unos desecadores durante 24 horas, tiempo durante el cual se aplica una mezcla de resina “cristal”, con una sustancia fluorescente y un catalizador (Etil-metil-acetona), para que por medio de vacío la resina pueda entrar a los poros; este último, tiene como función la aceleración del proceso de solidificación.

Paso 4. Una vez que la resina esta lista. La muestra de suelo se coloca en una caja de plástico de 20 X 20 X 20 cm, sobre de esta se colocan bolsas de plástico. Posteriormente una caja de cartón de 17 x 17 x 17 cm y dentro de ella la muestra del suelo de 15 cm³.

Paso 5. Posteriormente son trasladadas a temperatura constante de 48° C, durante 24 hr. Al término de este tiempo son llevados al sol para que la resina termine de secar, expuestos a los rayos del sol durante 8 días, posteriormente son cortados con una sierra eléctrica.

Paso 6. Corte y pulido de muestras

Terminado el proceso antes descrito se procede a realizar los cortes de los monolitos, para ello se utilizo una sierra cortadora de metal 355 mm (Marca Makita, modelo 2414NB) y dos discos para corte de piedra de 14X1/8X1 pulgada (Marca ASH). Se realizaron dos cortes horizontalmente al monolito con respecto al nivel del suelo, obteniendo tres facciones para después ser pulidas y pasar a la sesión de fotografía.

Paso 7. Sesión fotográfica

Las muestras pulidas se pasaron a una sesión de fotografía en el Laboratorio de Imagen, donde se utilizó una cámara OLYMPUS (modelo C4040), con Zoom 7.5x de 4.1 MP y dos lámparas que emiten rayos UV en una longitud de onda 254-365 NM (Mineralight Lamp), las cuales se emplean para iluminar cada muestra al momento de tomarles la fotografía. Para ello, se definió una escala rectangular (M1) cuyas unidades equivalentes y factores de conversión se indican en los cuadros 2 y 3, de tal manera que el factor de conversión para obtener las mediciones en las unidades cuadradas deseadas, obviamente será el producto X•Y.

Cuadro 2. Equivalencias de la imagen para la conversión de unidades de medición en la escala M1

Eje	Equivalencias de unidades		Factores de conversión	
	mm	píxeles	píxeles/mm	mm/píxeles
X	125	2272	18.176	0.0550176
Y	90	1704	18.933	0.0528169

Cuadro 3. Equivalencias de la imagen para la conversión de unidades de medición en la escala M2

Eje	Equivalencias de unidades		Factores de conversión	
	mm	píxeles	píxeles/mm	mm/píxeles
X	14	2272	162.285	0.0061619
Y	10	1704	170.400	0.0058685



Figura 7. Ilustración de los pasos requeridos para la preparación de las muestras en el laboratorio. 2) Colocación de las muestras en una cámara de intercambio agua por acetona; 3) Colocación de las muestras en los desecadores; 4) Incorporación de la resina a la muestra; 5) Traslado a la estufa durante 24 hr; 6) Corte y pulido de muestras; 7) Sesión fotográfica.

3.4.3 Variables medidas

Una vez que se identificaron los sitios y los límites de las parcelas donde se aplicaron los tratamientos, de las muestras preparadas en campo y laboratorio, se midieron las siguientes variables:

- a. Densidad aparente a las siguientes profundidades: 0-7.5, 7.5-15, 15-22.5 y 22.5-30 cm.;
- b. Número de poros;

- c. Área de poros, de acuerdo a los siguientes rangos de área en mm²: macro (2-10), meso (0.04-0.5) y micro (<0.04).
- d. Distribución de poros en el perfil de suelo: 0-30 cm.

3.4.4 Análisis estadístico

Por último, de las imágenes obtenidas, tanto para microestructura y porosidad del suelo, se trabajó con los tratamientos de labranza vertical (LV), convencional (LC) y pastizal (testigo). Cada una de ellas, fueron sometidas a todo el proceso de análisis de imagen. Para posteriormente generar las mediciones de área y perímetro de poros que fueron guardadas y concentradas en tablas de Excel. Las mediciones agrupadas sirvieron como base para hacer contrastes apareados en términos de los rangos de tamaño para macro, meso y microporos y el porcentaje que ocupan con respecto a la superficie total de la imagen.

Por último, la porosidad medida en porcentaje fue analizada por medio de PROC GLM en SAS (SAS, 2006), bajo un diseño de bloques al azar, para lo cual se consideraron como bloques a los tres rangos de tamaños y como tratamientos a las cuatro profundidades ya comentadas. De tal modo que se analizaron un total de 30 observaciones. Las comparaciones, tanto para tratamientos como para bloques se realizó mediante la prueba de Tukey para la porosidad expresada en porcentaje con un nivel de significancia estadística del 90 % ($\alpha = 0.1$).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de las mediciones y cálculos morfomatemáticos de la porosidad del suelo a 0.05 y 0.1 m de profundidad, tomadas de muestras inalteradas de suelo de tres sitios del rancho “Los Ángeles, del Mpio. de Saltillo, Coah, México.

4.1. Porosidad teórica

De antemano, es importante aclarar que para la estimación de la porosidad total (Pt) se recurrió a la ecuación propuesta por Gavande (1982), definida como: $e=1-(Da/Dr)$, de tal manera que los valores estimados de acuerdo a la condición estructural, en cuanto a densidad aparente (Da) y porosidad total (Pt), de cada tratamiento, se presenta en el siguiente Cuadro (4):

Cuadro 4. Densidad aparente ($g\ cm^{-3}$) y porosidad total por estrato en porcentaje

Tratamiento	Densidad aparente x estrato		Porosidad total x estrato	
	0-15	15-30	0-15	15-30
Testigo	0.95	0.95	64%	64%
LV	0.90	1.00	66%	62%
LC	1.00	0.95	62%	64%

Los datos mostrados en el Cuadro anterior (4), son coincidentes con las características de suelo analizadas y clasificados con base en el triángulo de texturas, pues en la literatura se reporta (Narro, 1994) que para la clase textural

denominada: "Arcilla en agregados" la densidad aparente, se encuentra en el rango de 0.9 a 1.1 gcm⁻³, pues de acuerdo al análisis mecánico de suelo (Hidrómetro de Bouyoucos) de muestras tomadas en los mismos sitios, en la profundidad 0-30 cm, las proporciones de arena, limo y arcilla fueron de: 32, 24 y 44 %, respectivamente.

Por otro lado, estos primeros datos de la Da y Pt permiten advertir que ambos sistemas de labranza tiene un efecto directo sobre estas dos variables, siendo más evidente en el estrato 0-15, pues mientras que en LV el suelo aumenta su volumen en LC disminuye, siendo esto coincidente con lo reportado en la literatura para suelos sujetos a labranza en los que frecuentemente aumenta la densidad de volumen (Udawatta et al, 2008).

El análisis de la Da y Pt, permitió describir la densidad de volumen y porosidad total, entre el testigo y el sistema de labranza utilizado. Pero la interpretación de estos resultados no permite diferenciar el impacto de la LV y LC en la repartición de los poros, de ahí la necesidad de analizar la porosidad real.

4.2. Porosidad real

La porosidad fue medida en relación a número y tamaño de poros a lo largo del perfil con una aproximación para los microporos de 10 micras, pues para microporos inferiores a esta medida solo son visibles con el microscopio de barrido electrónico. Con excepción de ese rango, a continuación se exponen los resultados en los tres casos implicados en el presente estudio.

4.2.1. Porosidad en el tratamiento testigo

Como puede verse en la Figura 8, la distribución de la porosidad en el testigo indica que los mesoporos son predominantes en ambas profundidades, con valores ubicados alrededor del 45 % de la porosidad total (Pt), mientras que los macroporos pasan de menos del 10 % a 5 cm de profundidad a cerca del 15

% a los 10 cm. Caso contrario ocurre con los microporos, porque en la primera profundidad su valor es ligeramente mayor al 10 %, mientras que en la segunda su valor es menor a este mismo porcentaje.

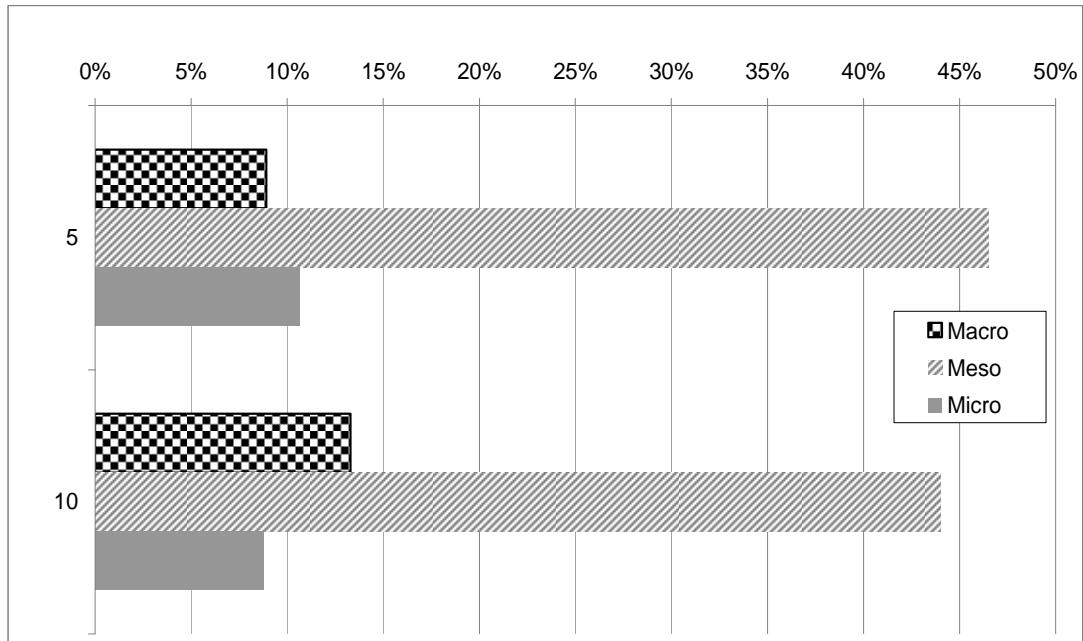


Figura 8. Porosidad medida en porcentaje en el testigo a 5 y 10 cm de profundidad

El indicador de la estructura mostrado en la Figura 8, para las condiciones de suelo no disturbado, sin duda está asociada a la vegetación nativa presente en la temporada de verano. En este caso, es importante mencionar que como resultado de las mediciones realizadas por diferentes métodos (Transectos y línea de Kanfield), se encontraron las especies que se enlistan en el Cuadro 5, de las que destaca de manera predominante *Stipia clandestina* Hack o *Amelichola clandestina*, especie que forma parte de un grupo de cinco especies, cuya distribución Arriaga y Barkworth (2006), dicen que cuatro son de Sudamérica y *A. clandestina* del Norte de México.

Cuadro 5. Especies identificadas en el área definida como testigo

Familia	Nombre técnico	Nombre común
Asteraceae	<i>Brickellia laciniata</i> Gray.	Jarilla
Asteraceae	<i>Zinnia acerosa</i> (DC.) Gray	Hierba del burro
Asteraceae	<i>Xanthocephalum sarothrae</i> (Pursh) Shinnars	Escobilla
Asteraceae	<i>Aphanostephus ramosissimus</i> DC.	Perezosa
Acanthaceae	<i>Dischoryste linearis</i> (T.&G.)O. Ktze	Acanto
Onagraceae	<i>Calylophus belandieri</i> (Spach) Towner	Amapola
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia furcillata</i> H.B.K.	Hierba del coyote
Boraginaceae	<i>Tiquila canescens</i> (DC.) Richardson	Oreja de ratón
Chenopodiaceae	<i>Eurotia lanata</i> (Pursh) Moq.	Gordura de invierno
Poaceae	<i>Stipa clandestina</i> Hack	Zacate picoso

Tomando como base esta característica de dominancia, se hicieron observaciones para ver la manera mediante la cual se desarrolla el sistema radicular de esta especie, de modo que fue posible también medir la distribución radicular como se muestra en la Figura 9, donde se puede observar que la mayor parte del sistema radicular se localiza cerca de la superficie. Aunque este comportamiento radicular no explica por completo el hecho de que la Da sea la misma en las dos profundidades indicadas.



Figura 9. Distribución del sistema radicular en el perfil de suelo a 0-15 y 15-30 cm de profundidad

4.2.2. Porosidad en los tratamientos LV y LC

En las Figuras 10 y 11, se muestran los valores puntuales de los porcentajes de las áreas medidas en mm^2 para los 3 rangos de tamaño de poro ya definido anteriormente, para cuatro profundidades dadas en cm (5, 10, 15 y 25) realizadas para los tratamientos LV y LC.

En ambos casos es interesante ver que la macroporosidad a 5 cm de profundidad es similar en ambos sistemas de labranza, pero tiende a ser completamente diferente para meso y microporos, pues desde la primera profundidad predominan los micro y mesoporos, cuyas sumas para estos dos rangos son de 60 y 56 % para LV y LC, de Pt, respectivamente, pues los macroporos alcanzan valores máximos de 13 % para LV y 17 % para LC.

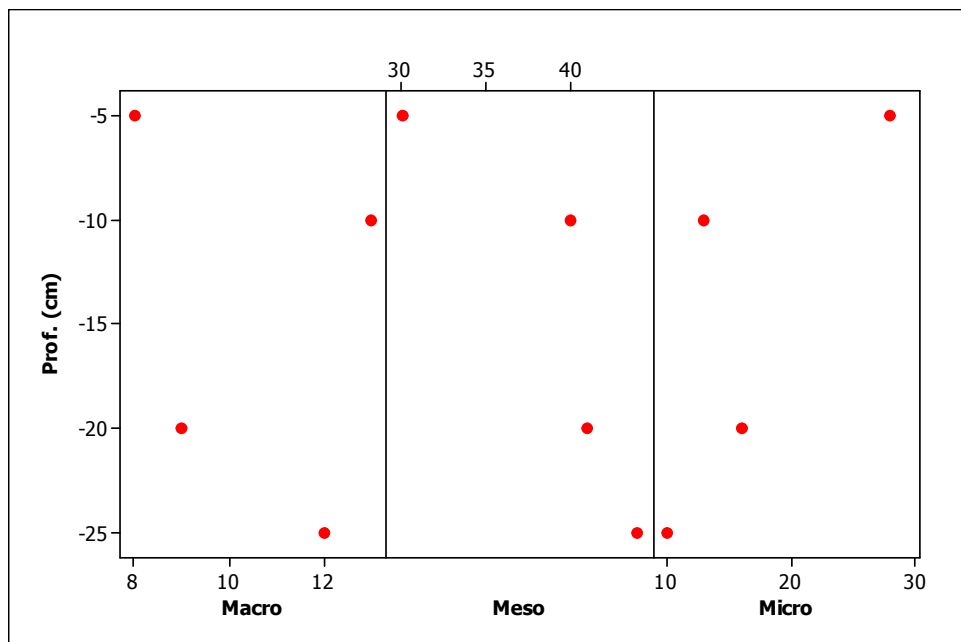


Figura 10. Matriz de la porosidad medida (%) en función de la profundidad (cm) del suelo sometido a LV

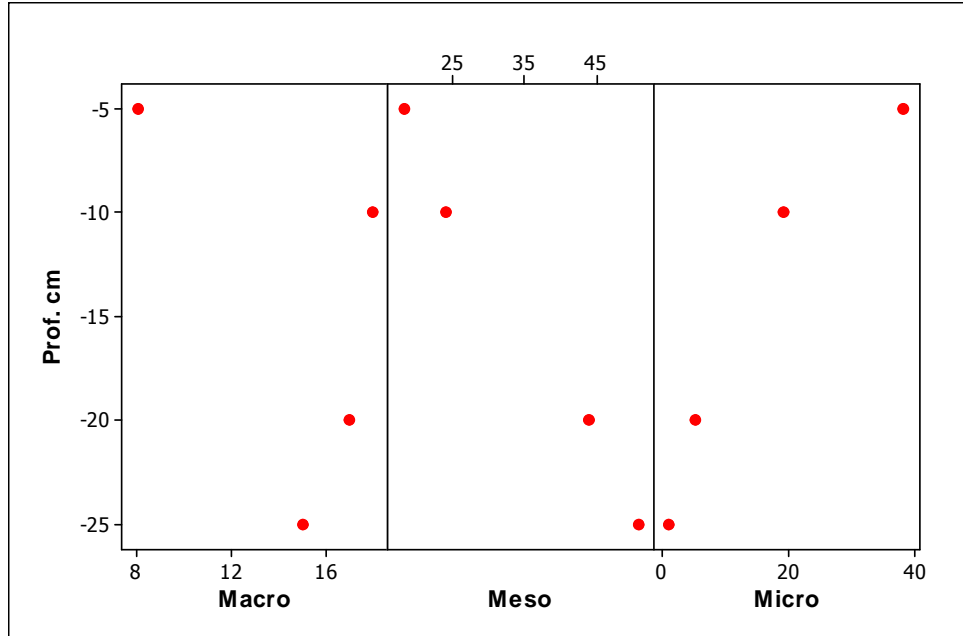


Figura 11. Matriz de la porosidad medida (%) en función de la profundidad (cm) del suelo sometido a LC

4.2.3. Representación gráfica de la porosidad

Además de lo anteriormente expuesto, en la Figura 12 se presenta una composición de la imágenes binarias donde se observa la morfología del suelo a las cuatro profundidades ya explicadas. Aunque, esto no fue evaluado numéricamente, es importante observar que en el tratamiento LV la presencia de fracturas al menos en las profundidades 0.1 y 0.20 m, en el primer caso es mucho más marcada que en el segundo.

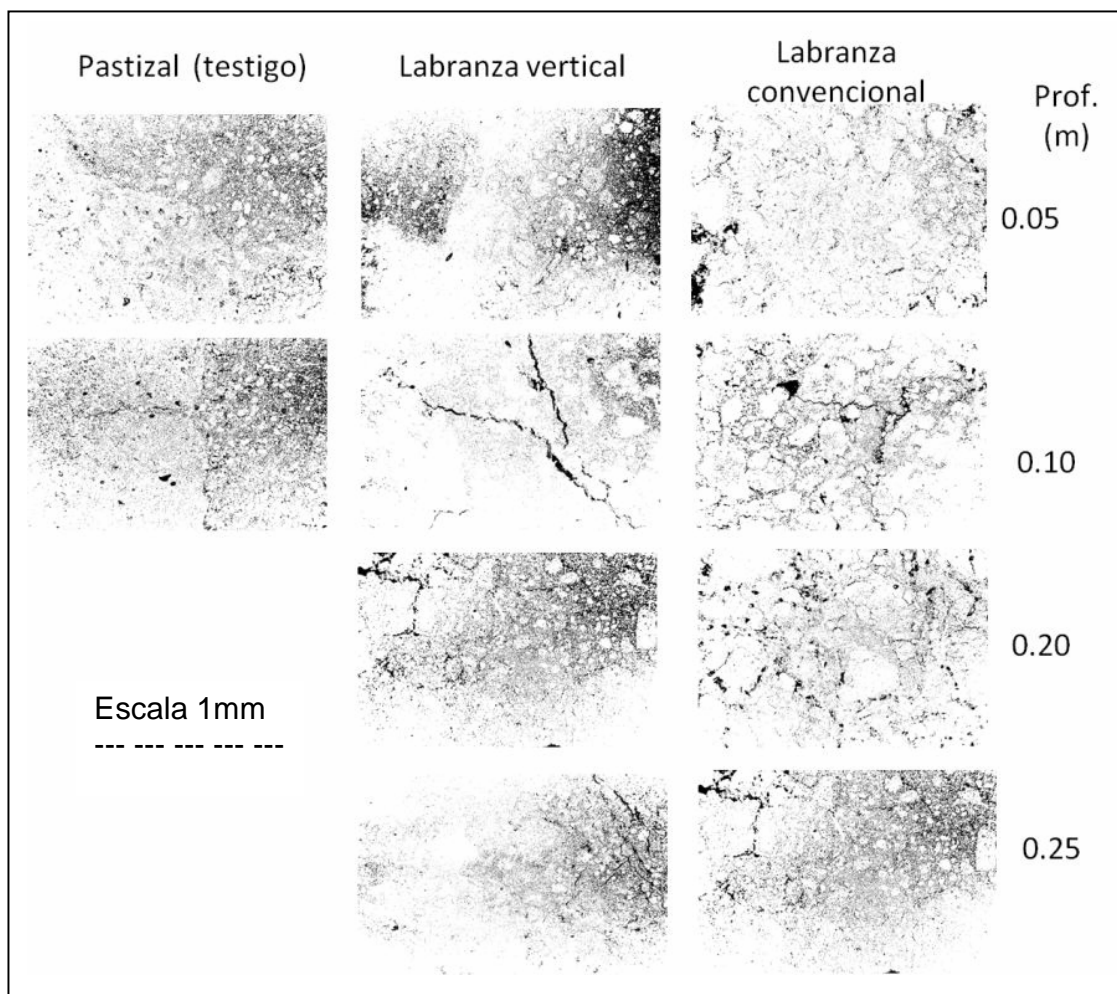


Figura 12. Morfología de los dos tratamientos y el testigo

4.2.4. Resultados de la comparación estadística

Las mediciones de las áreas de poros por rangos de tamaño, como ya se indicó anteriormente, expresados en porcentaje, fueron comparados estadísticamente, considerando como bloques a los tres rangos de tamaños y como tratamientos a las cuatro profundidades de 0.05 a 0.25 m. Los resultados indican que entre los tratamientos no hay diferencia significativa, pero entre bloques si la hay (Valor de $F = 16.54$) a un nivel de significancia del 90 % ($\alpha = 0.1$), como se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Resultados del ANDEVA para porosidad expresada en porcentaje del área de poros

Fuente	DF	Tipo I SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr >F
Trat	9	9.5	1.05	0.01	1.0
Blo	2	4106.46	2053.23	16.54	0.0001

Este mismo resultado fue confirmado mediante la Prueba de Tukey, de tal manera que en el agrupamiento, según se puede ver en el Cuadro 7, entre macro y microporos no hay diferencia significativa, pero para mesoporos la diferencia es altamente significativa a un 90 % de probabilidad ($\alpha=0.1$) y los parámetros que a continuación se enumeran:

- Error de grados de libertad 18
- Error de cuadrado medio 124.1222
- Valor crítico del rango 3.09800
- Diferencia significativa mínima 10.915

Cuadro 7. Resultados de la PRS de Tukey

Agrupamiento de Tukey	Media	Número de observaciones	Tipo de poros
A	38.300	10	Meso
B	15.000	10	Micro
B	12.200	10	Macro

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

V. CONCLUSIONES

En la literatura revisada se ha encontrado que la Técnica Avanzada de Imagen para el estudio de la porosidad en sus diferentes variables (tamaño, forma, distribución, continuidad, etc.), tiene muchas ventajas con respecto a otras como la tomografía computarizada, y además, ha mostrado ser muy eficiente para evaluar los cambios debidos a diversos factores, especialmente el manejo del suelo.

En este caso, los resultados obtenidos son una aproximación a la evaluación del impacto real de las dos prácticas de labranza estudiadas. Desde luego, en otra etapa deberán considerarse otros aspectos de la porosidad, por lo pronto, al menos quedó demostrado que las operaciones de labranza tienen un efecto sobre los mesoporos cuyos tamaños están entre 2 y 10 μm^2 , en tanto que para los otros rangos de tamaños, micro y macroporos, al parecer la variable estudiada no ayuda a verificar los cambios que ejercen las operaciones de labranza.

Otro aspecto a considerar es la temporalidad de los cambios en la estructura y otras variables morfológicas, que dicho sea se dan no solo por las acciones directas como consecuencia del manejo del suelo, sino aquellos cambios asociados a la naturaleza físico-química del suelo, las condiciones ambientales de clima (periodos de sequía y lluvia), cambios en la vegetación, así como de lugares contiguos debidos a la lixiviación coloidal y erosión del suelo, entre otros.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Arriaga M. O. y Barkworth M. E. 2006. *Amelichloa*: A new Genus in the *Stipia* (Poacea). *SIDA* 22: 145-149
- Bologna, 1970. Porosidad de suelo. Wikipedia 2007, la encyclopedia libre. Revisado (02/11/08) en http://es.wikipedia.org/wiki/Porosidad_del_suelo
- Bonne FR, Slager S, Miedma R, Eleveld R. 1976. Some influences of zero tillage on the structure and stability of a fine textured levee soil. *Neth. J. Agric. Sci.* 24: 105-119. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- Ceaba, 1998. *Manual de difusión Técnica de Soya 2006* - FUNDACRUZ, Bolivia. Revisado (03/04/08) en <http://www.planetasoja.com/trabajos/trabajos800.php?id1=20761&id2=20769&publi=88&idSec=31>
- Cook, R. A., K.C. Hover, 1999. "Mercury porosimetry of hardened cement pastes" *Cement Concrete Research* 29, 933 -943. Revisado (02/26/08) en:<http://scielotest.conicyt.cl/scielo.php?pid=S07180764200400&script=>
- Cook, R. A., K.C. Hover, 1999. "Mercury porosimetry of hardened cement pastes" *Cement Concrete Research* 29, 933 -943. Revisado (02/26/08) en:http://scielotest.conicyt.cl/scielo.php?pid=S071807642004000500006&script=sci_arttext&lng=es
- Coster, M., Chermant, J.L. 2001. *Cement and Concrete Composites*, 23, 133-151.
- Davis, E. 1983. *Thinning algorithms: A critique and now methodology*. *Pattern Recognition.* 14, 53-63. Revisado (02/26/08) en <http://www.sociedadgeologica.es/archivos/geogacetas/Geo41/G41Art09.pdf>

- De Battista, JJ; C Pecorari & R Albrecht. 1997. Evaluación del estado estructural en suelos con agricultura continúa en siembra directa. INTA, EEA Rafaela. Información Técnica N° 205. 12 páginas. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- Diamond, S. (1999), "Aspects of concrete porosity revisited", *Cement Concrete Research*, 29, 1181 -1188 Revisado (02/26/08) en http://scielotest.conicyt.cl/scielo.php?pid=S071807642004000500006&scrypt=sci_arttext&tlng=es
- Diamond, S., M.E. Leemam, (1995). "Pore size distributions in hardened cement paste by SEM image analysis", *Material Research Society, Symposium Procedure*, 370, 217-226. Revisado (02/26/08) en http://scielotest.conicyt.cl/scielo.php?pid=S071807642004000500006&scrypt=sci_arttext&tlng=es
- Donoso, C. 1992. *Ecología Forestal: El Bosque y su Medio Ambiente*. Universidad Austral de Chile. Editorial Universitaria. Santiago. Chile. Revisado (02/16/08) en <http://biblioteca.uct.cl/tesis/pedrogajardo/tesis.pdf>
- Ellis, FB; JG Elliot; F Pollard; RQ Cannell & BT Barnes. 1979. Comparison of direct drilling reduced cultivation and ploughing on the growth of cereal. *J. Agric. Sci.* 93: 391-401. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- FAO-ISRIC-ISSS-AISS-IBG, 1994. *World reference base for soil resources*. Wagening, Rome. P 56
- Feldman, R.F. y H. Chewy-Hg, (1985) "Porosity and surface properties", *Cememt Concrete Res.* 15(5), 765-774. Revisado (02/26/08) en http://scielotest.conicyt.cl/scielo.php?pid=S071807642004000500006&scrypt=sci_arttext&tlng=es
- Gantzer, CJ & GR Blake. 1978. Physical characteristics of Le Sueurs clay loam soil following no till and conventionatial tillage. *Agron.J.* 70: 853-857. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- Gavande, A. 1982. *Física de Suelos, Principios y Aplicaciones*. Editorial Limusa, cuarta reimpresión 1982 S.A. México D.F.
- Gavande, S. 1973. *Fisica de suelos. Principios y aplicaciones*. México. Ed Limusa-Willey S.A. 351 p. Revisado (03/10/08) En

<http://www.ceniap.gov.ve/pbd/Monografias/compa/compac.html#RESUMEN>

- Gil, R. (2001). El Comportamiento Físico-Funcional De Los Suelos. Instituto De Suelos. INTA Castelar. Mafredi, Córdoba, Argentina
- Greenalnd, D.J. 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent. *Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. B*, 281: 193-208. Revisado (29/02/08) en http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/suelos/indicadores_cal/30222_060810_poro.htm
- Guerif, J. 1987. L'analyse de la porosité: Application à l'étude du compactage des sols. *Soil Compaction and Regeneration*. Monnier and Goss editors. CEE pbl. 165 pp: 1-13 Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- Henderson, DW. 1979. Soil management in semiarid environments. *In: Crop productivity in arid and semiarid environments*. Hall A.E. (ed). *Ecol. Studies N° 35*. Springer Verlag: 224-237. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- Ibarra, 2005. Densidad aparente. Temuco, Temuco; Chile. Revisado (03/04/08) en <http://araucarias.blogspot.com/2005/09/densidad-aparente.html>
- Ibarra, 2005. Porosidad del suelo. Temuco, Temuco, Chile. Revisado (29/02/08) en <http://araucarias.blogspot.com/2005/09/porosidad-del-suelo.html>
- Kay, B.D. and Vanden Bygaart, A.J. (2002). Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118. Revisado (29/02/08) en http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/suelos/indicadores_cal/30222_060810_poro.htm
- KEZDI, A. 1975. Manual de la mecánica de suelos. Hungría. Universidad Técnica de Budapest. 264 p. Revisado (03/10/08) En <http://www.ceniap.gov.ve/pbd/Monografias/compa/compac.html#RESUMEN>
- Kung K J S, Hanke M, Helling C S, Kladvko E L, Gish T J, Steenhuis T S and Jaynes D B. 2005. Quantifying Pore-Size Spectrum of Macropore-Type Preferential Pathways. *Ssa Soil Sci. Soc Am. J.* 69:1196-1208

- Lal, R. y Vandoren, D.M. (1990). Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. *Soil Tillage Res.* 16, 71-84. Revisado (02/11/08) en http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/suelos/indicadores_cali/30222_060810_poro.htm
- Lindstrom, MJ; WB Voorhees y CA Onstad. 1984. Tillage system and residue cover effects on infiltration in northwestern Corn Belt soil. *I. Soil Water Conservation* 39: 64-69. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- Narro, E. 1994. Física de Suelos: Con Enfoque Agrícola—México: Editorial Trillas: uaaan.
- Pidgeon, JD & BD Soane. 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley monoculture system. *J. Agric. Sci. Camb.* 88: 431-442. Revisado (02/11/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- PLA, I. 1977. Metodología para caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Maracay, Ven. UCV-FAGRO. 112 p. Revisado (03/10/08) En <http://www.ceniap.gov.ve/pbd/Monografias/compa/compac.html#RESUMEN>
- Plante A F, Duke M J M, and McGill W B. 1999. A Tracer Sphere Detectable by Neutron Activation for Soil Aggregation and Translocation Studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1248-1290
- Sánchez Girón Renedo, V. 1996. Dinámica y Mecánica de Suelos. Ediciones. Agrotecnicas, S.L. Madrid. Revisado (02/26/08) en <http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v23n2/v23n2a07.pdf>
- SAS, Institute, 2006. SAS 0.13 User's Guide. Statistics. SAS Inst. Cary NC, US
- Suryavanshi A.K., J.D. Scantlebury y S.B. Lyon, (1995) "Pore size distribution of OPC & SRPC mortars in presence of chorides", *Cement Concrete Research* 25 (5), 980 - 998. Revisado (02/26/08) en http://scielotest.conicyt.cl/scielo.php?pid=S071807642004000500006&script=sci_arttext&tlng=es
- Torres, Rojo, J. M. Guevara Sangines, A. 2005. El potencial de México para la protección de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. INE-SEMARNAT. Revisado (18/01/08) en

http://www.ine.gob.mx./ueajei/publicaciones/gasetas/63/ca3.html?id_pu b=361&id

Udawtta Ranjith P, Anderson Stephen H, Gantzer Clark J, y Garret Harold E. 2008. Influence of Praire Restoration on CT-measured Soil Pore Characteristics. J. Environ. Qual. 37: 219-228

Wikipedia, 2008. Permeabilidad. Wikipedia, la enciclopedia libre. Revisado (03/04/08) En http://es.wikipedia.org/wiki/Permeabilidad#Permeabilidad_del_suelo

Wikipedia, 2008. Tomografía axial computarizada. Wikipedia, la enciclopedia libre. Revisado (03/10/08) En http://es.wikipedia.org/wiki/Tomograf%C3%ADa_axial_computarizada#Principio_de_funcionamiento

VII. ANEXOS

Cuadro 1. Resultados de laboratorio para la medición de densidad aparente (Da) para cada tratamiento a diferentes profundidades

Id. muestra	Psh+bote	Pbote	Psh	Pss+bote	Pbote	ms	mw	Pw	Da (ms/Vt)	Prof. Del muestreo (cm)	Parcela (Tratamiento)
k55	241.8	121.4	120.4	210	121.4	88.6	31.8	35.9	0.9	0-7.5	TESTIGO
k65	242.4	114.9	127.5	205.4	114.9	90.5	37	40.9	0.9	7.5-15	
k304	225.6	123.2	102.4	203.2	123.2	80	22.4	28.0	0.8	15-22.5	
k44	250	121.4	128.6	215	121.4	93.6	35	37.4	1.0	22.5-30	
k52	240.2	113.7	126.5	203.5	113.7	89.8	36.7	40.9	0.916	0-7.5 cm	LV
k129	229.6	124	105.6	208.6	124	84.6	21	24.8	0.863	7.5-15 cm	
151	245.5	117.9	127.6	211.6	117.9	93.7	33.9	36.2	0.956	15-22.5 cm	
k292	256.7	125.6	131.1	221	125.6	95.4	35.7	37.4	0.973	22.5-30 cm	
k59	265.2	122.4	142.8	217.8	122.4	95.4	47.4	49.7	1.0	0-7.5	LC
k298	252.4	125.7	126.7	217.7	125.7	92	34.7	37.7	0.9	7.5-15	
k139	233.8	123.2	110.6	212.9	123.2	89.7	20.9	23.3	0.9	15-22.5	
k131	261.2	126.5	134.7	216.2	126.5	89.7	45	50.2	0.9	22.5-30	

Nomenclatura

Psh= Peso del suelo húmedo + peso del bote

Pbote= peso del bote

Psh= Peso del suelo húmedo

Pss+bote= Peso del suelo seco + bote

Ms=Masa del suelo

Mw= Masa del agua

Pw= Contenido Gravimétrico del agua

Da= Densidad aparente

Cuadro 2. Da y Porosidad total (Pt) de 22 muestras tomadas en campo

MUESTRA	profundidad en cm	Da gr/cm ³	Dr gr/cm ³	n=1-(Da/Dr)
1	0-15	0.95	2.65	0.64
2	0-15	0.95	2.65	0.64
3	15-30	0.9	2.65	0.66
4	0-15	0.95	2.65	0.64
5	15-30	0.9	2.65	0.66
6	15-30	0.9	2.65	0.66
7	0-15	0.8895	2.65	0.66
8	0-15	0.9	2.65	0.66
9	0-15	0.8895	2.65	0.66
10	0-15	0.9	2.65	0.66
22	0-15	0.9	2.65	0.66

Cuadro 3a. Registro de laboratorio de las muestras del suelo del Rancho “Los Ángeles”, Mpio. de Saltillo; Coahuila, México. Tomadas a mediados del 2007.

Cuadro 3b. Los números con fondo coloreado son las muestras que se utilizaron en este trabajo

Cuadro 3a.

No. Muestra	Descripción de campo	Profundidad en cm
1	Lab. Convencional	0-15
2	Lab. Convencional	0-15
3	Lab. Convencional	15-30
4	Lab. Convencional	0-15
5	Lab. Convencional	15-30
6	Lab. Convencional	15-30
7	Lab. Vertical surco	15-30
8	Pastizal	0-15
9	Lab. Vertical bordo	0-15
10	Pastizal	0-15
11	Testigo	15-30
12	Lab. Vertical bordo	0-15
13	Testigo	0-15
14	Lab. Vertical surco	15-30
15	Lab. Vertical surco	15-30
16	Pastizal	15-30
17	Testigo	0-15
18	Testigo	0-15
19	Lab. Vertical bordo	0-15
20	Pastizal	15-30
21	Testigo	15-30
22	Lab. Vertical bordo	0-15
23	Testigo	15-30
24	Pastizal	15-30
25	Pastizal	0-15

Cuadro 3b.

Organización de las muestras por tratamiento			
Tratamiento	No. Registro (laboratorio)	Profundidad (cm)	
		0-15	15-30
Testigo	11		x
	13	x	
	17	x	
	18	x	
	21		x
	23		x
Lab. Vertical (LV)	7	x	
	9	x	
	12	x	
	14		x
	15		x
	19	x	
Lab. Convencional (LC)	1	x	
	2	x	
	3		x
	4	x	
	5		x
	6		x
Pastizal	8	x	
	10	x	
	16		x
	20		x
	24		x
	25	x	

Cuadro 5. Resumen de la porosidad (área de poros en mm²) expresada en porcentaje con respecto al área total de la ventana (125 x 90 mm) a 5 cm de profundidad

	POROS %	M1_1_cSUP	M1_2_cSUP	M1_3_cSUP	M1_5_cSUP	M1_6_cSUP	M1_7_cSUP	M1_8_cSUP	M1_9_cSUP	M1_10_cSUP	M1_22_cSUP
Macroporos M1	<2 mm ²	6%	5%	6%	8%	2%	5%	5%	6%	10%	6%
	2 a 10 mm ²	3%	0%	1%	2%	2%	3%	1%	1%	2%	1%
	>10 mm ²	1%	1%	2%	3%	2%	9%	0%	8%	0%	2%
	TOTAL	10%	6%	9%	13%	6%	17%	6%	15%	12%	8%
Mesoporos M2	<0.04 mm ²	3%	8%	7%	8%	8%	8%	8%	6%	8%	9%
	0.04 a 0.5 mm ²	5%	8%	8%	13%	13%	11%	11%	6%	16%	9%
	>0.5 mm ²	8%	4%	20%	23%	23%	26%	26%	47%	24%	12%
	TOTAL	16%	21%	35%	44%	44%	44%	45%	59%	48%	30%
Microporos M3											
		39%	37%	22%	9%	16%	5%	15%	-7%	7%	28%
Porosidad Total (teórica)		64%	64%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%

Cuadro 6. Resumen de la porosidad (área de poros en mm²) expresada en porcentaje con respecto al área total de la ventana (125 x 90 mm) a 10 cm de profundidad

POROS %	M1_1_cINF	M1_2_cINF	M1_3_cINF	M1_4_cINF	M1_5_cINF	M1_6_cINF	M1_7_cINF	M1_8_cINF	M1_19_cINF	M1_10_cINF	M1_22_cINF
Macroporos											
M1											
<2 mm ²	6%	2%	3%	7%	8%	9%	9%	10%	3%	8%	10%
2 a 10 mm ²	2%	1%	7%	3%	2%	2%	2%	2%	1%	2%	1%
>10 mm ²	0%	30%	1%	2%	2%	2%	4%	3%	1%	1%	9%
TOTAL	8%	33%	12%	12%	12%	13%	15%	15%	5%	11%	20%
Mesoporos											
M2											
<0.04 mm ²	6%	4%	8%	6%	5%	8%	8%	8%	10%	7%	9%
0.04 a 0.5 mm ²	4%	5%	11%	7%	10%	1%	22%	16%	10%	13%	13%
>0.5 mm ²	8%	22%	30%	24%	29%	5%	21%	25%	19%	19%	20%
TOTAL	18%	31%	49%	38%	44%	14%	51%	49%	39%	39%	42%
Microporos											
M3											
Porosidad Total (teórica)	38%	0%	5%	17%	10%	39%	1%	2%	22%	16%	4%
	64%	64%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%	66%

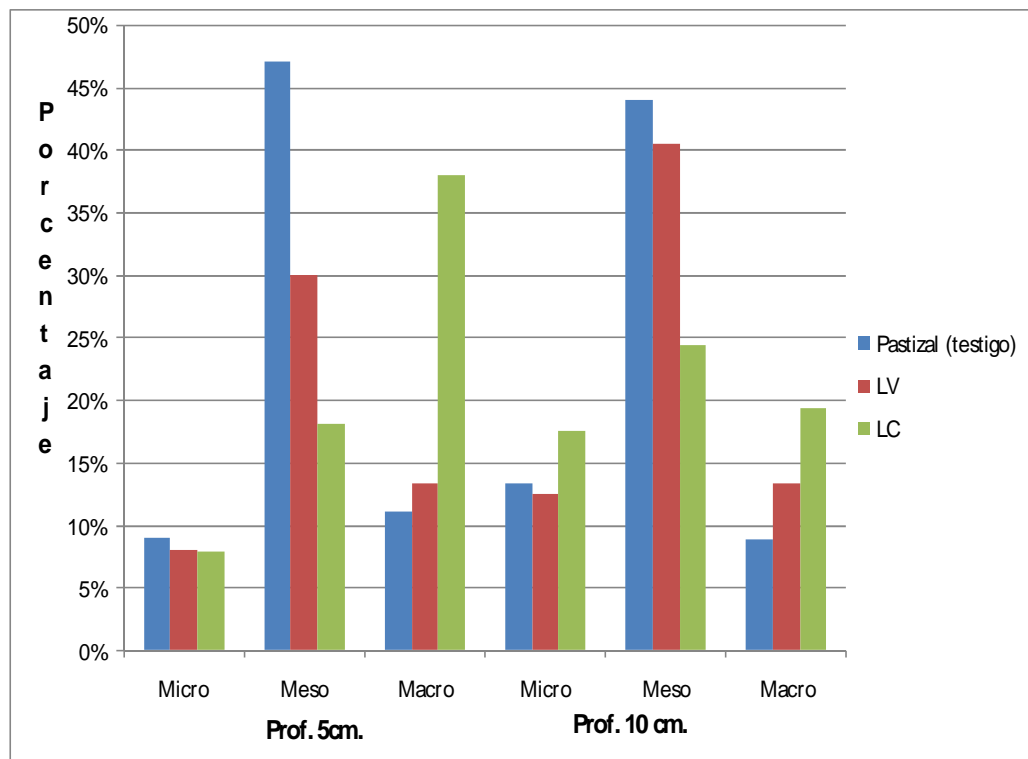


Figura 1. Porosidad medida en porcentaje del suelo de labranza convencional labranza vertical y pastizal a 5 y10 cm de profudidad

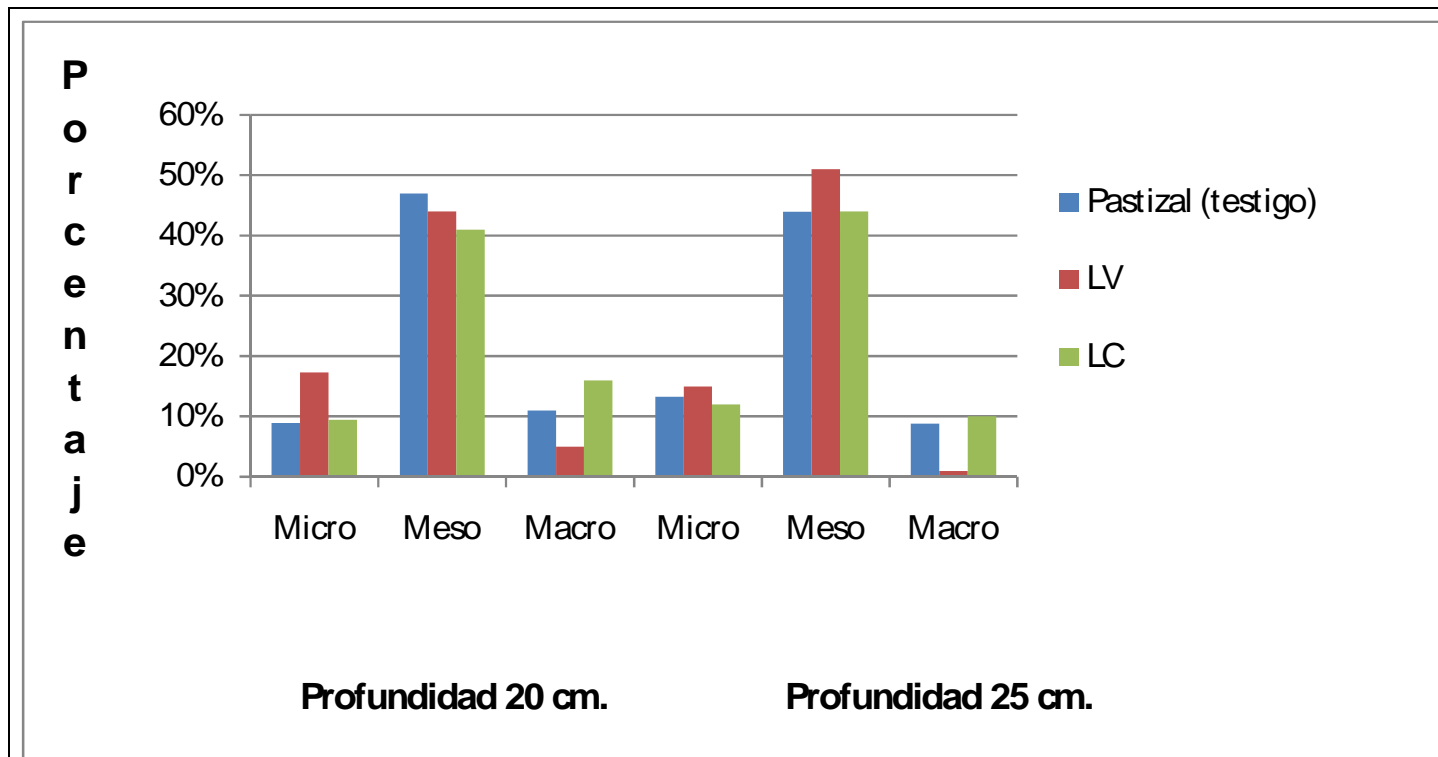


Figura 2. Porosidad medida en porcentaje del suelo de labranza convencional labranza vertical y pastizal a 20 y 25 cm de profundidad

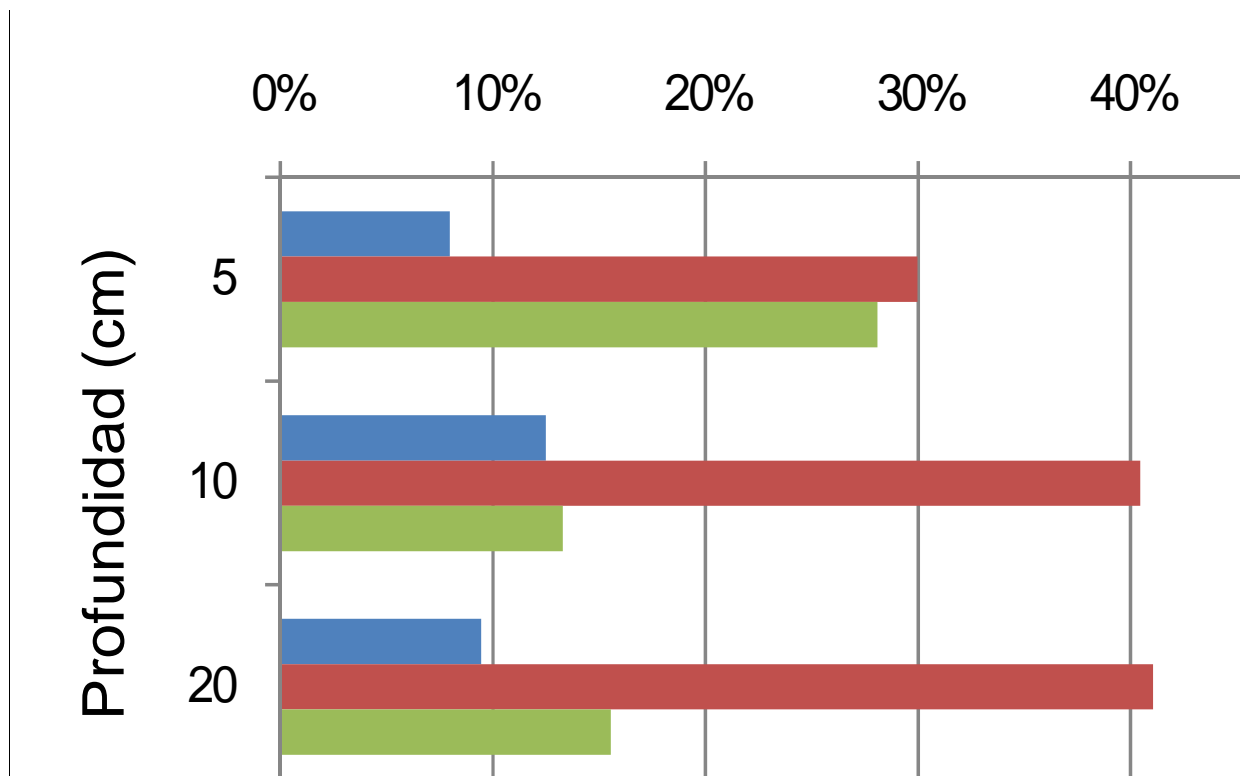


Figura 3. Porosidad medida en porcentaje del suelo de a labranza vertical a 5, 10, 20 y 25 cm de profudidad

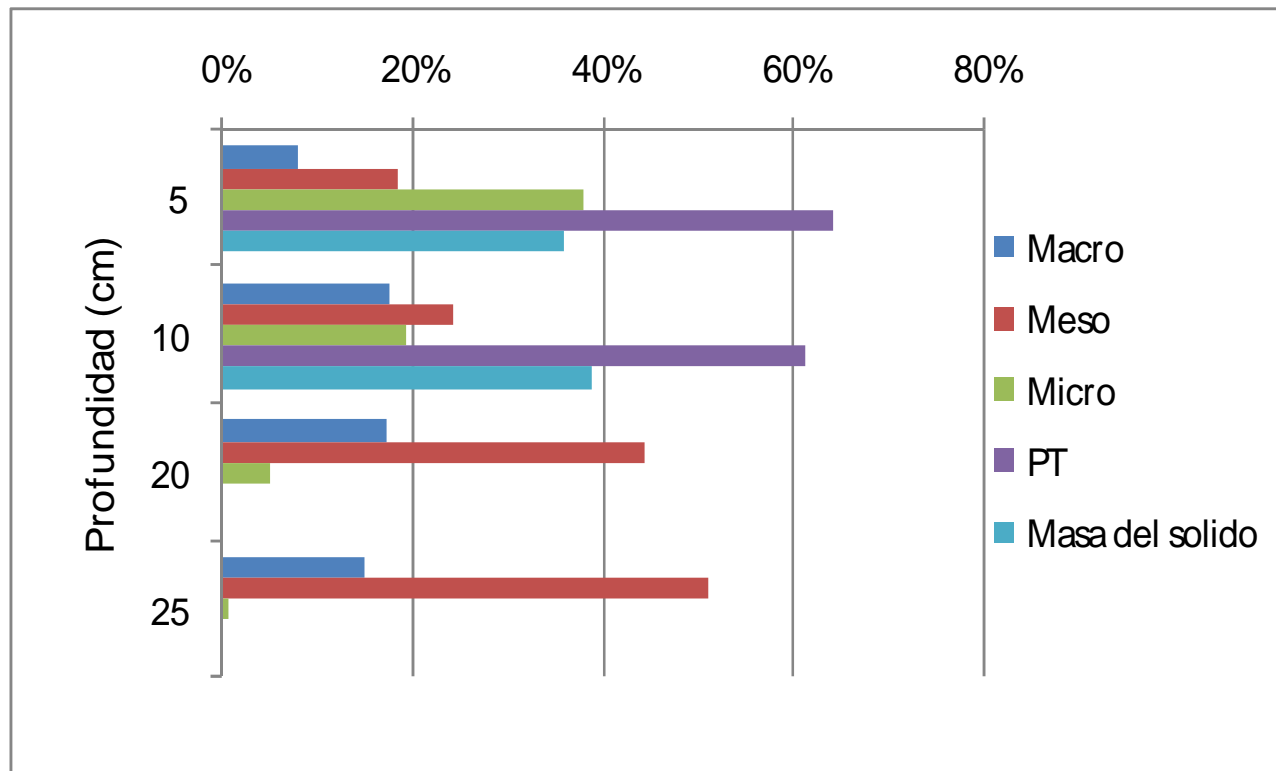


Figura 4. Porosidad medida en porcentaje del suelo de a labranza convencional a 5, 10, 20 y 25 cm de profudidad