



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA LABRANZA SOBRE LAS PROPIEDADES
HIDRÁULICAS DE UN SUELO ARCILLOSO BAJO
CONDICIONES DE FLUJO TRANSITORIO**

POR:

JOSÉ NIBARDO GALVÁN LUNA

T E S I S

Presentada como Requisito Parcial para

Obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Mayo de 2008**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA LABRANZA SOBRE LAS PROPIEDADES
HIDRÁULICAS DE UN SUELO ARCILLOSO BAJO
CONDICIONES DE FLUJO TRANSITORIO**

Por:

JOSÉ NIBARDO GALVÁN LUNA

TESIS

**Que Somete a la 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

Asesor Interno

Asesor Externo

**Dr. Guillermo González Cervantes
Asesor externo INIFAP**

**M. C. Armando López Santos
Asesor externo UACH**

Coordinador de la División de Ingeniería

Dr. Raúl Rodríguez García

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México Mayo de 2008.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS nuestro señor por darme el privilegio de vivir en este mundo y conocer a todas aquellas personas que han sido parte de mi vida hasta este momento; por haberme permitido concluir mis estudios profesionales y completar una etapa mas en mi vida, por darme el regalo más grande y preciado que pude recibir de el que es la vida.

Con mucho amor y respeto para las personas que más amo en esta vida y que lo merecen todo y han recibido tampoco, mi familia y amigos.

*A mi mamá **Sra. Juana Luna Gallaga** por darme la vida y brindarme el apoyo de madre en todos los buenos y malos momentos de la vida, por los sacrificios, el esfuerzo y el apoyo moral que siempre me has brindado, gracias mamá por ser la mejor mamá del mundo y estar en todos los momentos que te necesitado en mi vida gracias.*

*A mi papá **Sr. Rosendo Galván Miranda** por ser el pilar de mi familia, por brindarme su apoyo y la confianza depositada en mi, para salir adelante en todo momento, sobre todo por el esfuerzo moral y el sacrificio económico que siempre me has brindado, gracias papá por ser el mejor papá del mundo por que en ti veo un gran ejemplo de vida gracias.*

*A mis hermanas: **Maria de los Ángeles y Maria de Lourdes Galván** por la confianza depositada en mí y el apoyo que siempre me han brindado desde mi niñez hasta estos momentos solo me resta decirles que la quiero y las amo con todo mi corazón gracias.*

*A mis hermanos: **Rogelio Galván** por que a pesar de que se bien que tenemos difencias en formas de pensar yo estoy seguro que siempre nos hemos deseado lo mejor, con todo cariño y respeto para ti hermano tu sabes que te quiero mucho. De igual maneras a mis de mas hermanos; **Evelio, Juvenal, Ismael, y Rosendo Galván** gracias.*

*A mis sobrinos: **Viridiana Abigail, Jenet Yaquelinne, Andrea Joselin, Edgar Bladimir, Eric Ulises y Yahir Francisco** y los que faltan, espero y me vean como un ejemplo y decirles que si se puede, los quiero como si fueran mis hijos por que dios me dio la oportunidad de verlos crecer junto a mi cuidense los quiero mucho..*

*A mis tíos y tías: Muy en especial a mi tía **Elena Luna** por permitirme crecer junto a usted y darme el cariño y el amor como si fuero yo otro de sus hijos gracias.*

*A mis primos y primas: En especial a **Pamela, Anacelia, Daniel y Benjamín** por que la vida algunas veces es muy injusta pero de alguna manera hay que saberla enfrentarla pese a todo lo cruel que pueda ser, los quiero mucho por que los he visto siempre como mis hermanos siempre les voy a desear lo mejor cuidense mucho.*

“Amigos son aquellos extraños seres llamados ángeles que dios nos mando para cuidarnos y protegernos en este mundo, y ellos son como la sangre cuando uno esta herido.... Acuden sin que les llames, así que si tienes uno cuídalo”.

*A mis amigos que se hicieron mis carnales: **Luís Daniel y Jorge Alberto** por permitirme a traves de ustedes tener hermanos más chicos que yo y por ofrecerme su cariño y su amistad ya saben que los quiero y les voy a desear en todo momento lo mejor de la vida se los digo de corazón muchas GRACIAS.*

*A mis amigos que se hicieron mis hermanos: **Magdalena Ramírez, Gabriela Portugal, Yadira Méndez, Hugo Rivera, Fernando Ascari Quijas, Flavio Alvarado, Francisco Hernández, Ricardo Martínez, Ismael Vargas,** por que algunas veces un hermano puede no ser siempre un amigo, pero un amigo siempre pobra ser un hermano, por que ustedes saben que son lo mejor que me pudo haber pasado en esta etapa de mi vida, haberlos conocido y por permitirme ser parte a un que sea por muy poco tiempo parte de sus vidas y espero que esto no quede aquí, que fueron tantos los momentos que seria imposible contarlos todos, solo quiero desearles que se realicen todos y cada una de sus sueños y que tengan mucha fe en dios y los voy a tener siempre en fondo de mi corazón cuídense mucho donde quiera que el destino los lleve es lo único que les desea su amigo Nibardo.*

*Por ultimo agradecerle también a la **Cerveza, Tequila y la sal,** por ayudarme a pasar todos los sin sabores que pase para poder llegar hasta donde hoy estoy por haberme acompañado en los momentos de tristeza y de alegría junto a mis amigos y compañeros gracias.*

“A los hermanos te los manda dios, a los amigos los escojes tú”

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Terra Mater por abrirme las puertas y sus instalaciones para la culminación de una etapa más en mi vida, siempre estaré agradecido y me sentiré muy orgulloso de ser Narro.

Al Dr. Martín Cadena Zapata por su asesoría profesional y apoyo para la realización de este proyecto de investigación por compartir experiencias y conocimientos.

Al M. C. Armando López Santos por su apoyo tanto moral como de su asesoría profesional el cual fue fuente básica para llevar a cabo la finalización de esta investigación.

Al M. C. Guillermo González Cervantes por su apoyo y asesoría profesional el cual fue fuente básica para llevar a cabo la finalización de esta investigación.

A mis compañeros de la generación de Maquinaria Agrícola, y amigos Yefes, Vera, Ramón, Sapo, Álvaro, Chelo, Chaco, Chombo, Mario, Cando, Paco, Rubén, Chacho, por todos los buenos y malos momentos que pase con cada uno de ustedes les deseo lo mejor en su vida futura échense ganas, para tras ni para tomar impulso eh cuídense mucho y mucha suerte.

A los maestros del departamento de Maquinaria agrícola: Dr. Martín Cadena, M.C. Héctor Uriel Serna, Ing. Juan Arredondo, Ing. Juan Antonio Guerrero, Ing. Blanca Elizabeth de la Peña, M.C. Tomás Gaytán, Ing. Ramiro Luna, Ing. Rosendo Garza, M.C. Jesús Rodolfo Valenzuela, Ing. Jorge Alberto Flores Berruelo, por los conocimientos transmitidos para conmigo durante mi estancia en la universidad.

	ÍNDICE	Pág.
Índice de figuras		viii
Índice de cuadros		ix
RESUMEN		x
I. Introducción		1
1.1. Importancia y justificación.....		1
1.2. Objetivos		2
1.3. Hipótesis		2
II. Revisión de Literatura		3
2.1. Descripción y delimitación de suelos de pastizal del norte de México, convertidos a uso agrícola.....		3
2.1.1. Generalidades.....		3
2.1.2. Origen geológico		4
2.1.3. Composición típica.....		5
2.2. Movimiento del agua en el suelo.....		6
2.2.1. Conductividad hidráulica del suelo.....		9
2.2.2. Infiltración.....		12
2.3. Modelos para determinar la infiltración		13
2.3.1. Ecuaciones para el cálculo de la velocidad de infiltración.....		14
2.3.2. Ecuación de Horton.....		14
2.3.3. Ecuación de Philip.....		14
2.3.4. Ecuación de Kostiaikov-Lewis.....		15
2.3.5. Ecuación de Green y Ampt		15
2.4. Medición de la infiltración por medio de la técnica de Infiltrómetro de discos.....		16
III. Materiales y Métodos		19
3.1. Localización geográfica general del sitio de estudio		19
3.2. Características generales del sitio de estudio		20
3.3. Clima.....		22
3.4. Vegetación		22
3.5. Suelo.....		23
3.5.1. Propiedades físicas y químicas del suelo		24

3.5.2.	Especies identificadas en el área de estudio	24
3.5.3.	Uso del suelo	25
3.6.	Mediciones con el infiltrómetro de discos en los sitios de estudio	25
3.6.1.	Primera etapa.....	25
3.6.2.	Segunda etapa.....	26
3.6.3.	Tercera etapa.....	27
3.6.4.	Cuarta etapa	27
3.7.	Diseño experimental	28
3.8.	Variables medidas.....	29
3.9.	Análisis estadístico.....	29
IV.	Resultados y Discusión	31
4.1.	Velocidades de infiltración a distintas tensiones	32
4.1.1	Velocidad de infiltración mínima en la superficie.....	32
4.1.2.	Velocidad de infiltración mínima a 8 cm de profundidad	33
4.1.3.	Velocidad de infiltración máxima en la superficie.....	34
4.1.4.	Velocidad de infiltración máxima a 8 cm de profundidad	35
4.2.	Análisis estadístico.....	36
4.2.1.	Velocidad min. y máx. en la superficie ($K_{\theta min 0}$ y $K_{\theta max 0}$) ...	36
4.2.3.	Clasificación de la conductividad hidráulica	42
V.	Conclusión	43
VI.	Bibliografía.....	44
VI.	Páginas web consultadas	52

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Distribución de Suelos de Tipo Feozem.....	4
Figura 2.2. Relación entre la conductividad hidráulica (K) de dos suelos de diferentes texturas y las cargas por presión (h) positivas y negativas.	11
Figura 3.1. Ubicación geográfica del Rancho los Ángeles, Mpio., de Saltillo, Coahuila México, en coordenadas UTM, con respecto al territorio nacional (sin escala).....	19
Figura 3.2. Ubicación del sitio de estudio en el rancho los Ángeles.....	20
Figura 3.3. Sitio de estudio en la parcela donde estaba la NL.	21
Figura 3.4. Sitio de estudio donde se realizó la NL.	21
Figura 3.5. Sitio de estudio donde se realizó LC.....	21
Figura 3.6. Áreas de estudio antes durante y después de la utilización de los cilindros infiltrómetros de discos.....	26
Figura 3.7. Cilindro infiltrómetro de discos en campo.	26
Figura 3.8. Fotos de los tratamientos después de llegar a infiltraciones constantes.....	27
Figura 3.9. Recolección de los datos en campo. (Foto tomada por Flavio Alvarado).....	28
Figura 4.1. Velocidad de infiltración mínima promedio en cm hr^{-1} en la superficie a 4 tensiones.	32
Figura 4.2. Velocidad de infiltración mínima promedio en cm hr^{-1} a 4 tensiones a 8 cm de profundidad.	33
Figura 4.3 Velocidad de infiltración máxima promedio en cm hr^{-1} en la superficie a 4 tensiones.	34
Figura 4.4. Velocidad de infiltración máxima promedio en cm hr^{-1} a 4 tensiones a 8 cm de profundidad.	35

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 2.1. Gradientes de energía y conductividades que generan transporte de algunos materiales y energía.....	8
Cuadro 2.2. Las clases propuesta para indicar la conductividad hidráulica consideran las siguientes láminas de agua.....	11
Cuadro 3.1. Propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental obtenidas del laboratorio.....	24
Cuadro 3.2. Especies identificadas en el área definida como testigo donde se realizo el trabajo de investigación	24
Cuadro 3.3. Estructura matricial del diseño estadístico.....	29
Cuadro 4.1. ANOVA para la variable $K\theta_{min0}$	36
Cuadro 4.2. ANOVA para la variable $K\theta_{max0}$	36
Cuadro 4.3. ANOVA para la variable $K\theta_{min8}$	37
Cuadro 4.4. ANOVA para la variable $K\theta_{max8}$	37
Cuadro 4.5. ANOVA para $K\theta_{min0}$ en función de las fuentes de variación ..	38
Cuadro 4.6. ANOVA para $K\theta_{max0}$ en función de las fuentes de variación .	38
Cuadro 4.7. ANOVA para $K\theta_{min8}$ en función de las fuentes de variación ..	38
Cuadro 4.8. ANOVA para $K\theta_{max8}$ en función de las fuentes de variación .	38
Cuadro 4.9. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labraza para $K\theta_{min0}$	39
Cuadro 4.10. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labraza para $K\theta_{max0}$	40
Cuadro 4.11. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labraza para $K\theta_{min8}$	40
Cuadro 4.12. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labraza para $K\theta_{max8}$	41
Cuadro 4.13. Velocidad de infiltración promedio para los tres sistemas de labranza	42

RESUMEN

Buena parte de los suelos de pastizales de México, del tipo Feozem, por su alta fertilidad física, biológica y química, han sido convertidos a uso agrícola; suelos que también se caracterizan por su alta susceptibilidad a la erosión. De antemano se sabe que el empleo de maquinaria produce modificaciones importantes en la estructura del suelo y consecuentemente cambios en los patrones de flujo hidráulico. Para explicar la magnitud de dichos cambios, los objetivos de la presente investigación fueron: 1) Explicar el comportamiento hidrodinámico de un suelo sometido a diferentes tensiones y sistemas de labranza; y 2) Evaluar el impacto de la labranza convencional (LC) y vertical (LV) en las tasas de infiltración comparado con un área sin labranza (NL). Para ello, se empleó la técnica del infiltrómetro de disco a tensión, técnica que está siendo ampliamente usada para determinar propiedades hidráulicas *in situ* de suelos saturados o cercanos a la saturación. La medición del flujo hidráulico se realizó en parcelas de uso agrícola del “Rancho los Ángeles” del Municipio de Saltillo, Coah. México (UTM 2 772,627 y 2 782,427 m de latitud Norte y 291,514 y 302, 137 m de longitud Oeste), durante el periodo comprendido de Agosto a Septiembre del 2007, donde fueron seleccionados los sitios bajo un sistema aleatorio con tres repeticiones. Los resultados obtenidos del ANOVA en SAS indican diferencias altamente significativas (**) para la velocidad de infiltración mínima en la superficie ($K_{\theta min 0}$) y máxima ($K_{\theta max 0}$), así como las máximas y mínimas a 8 cm de profundidad ($K_{\theta min 8}$ y $K_{max 8}$) con valores de R^2 de 0.68, 0.71, 0.88 y 0.86 respectivamente. Con base en estos resultados se estableció que la tensión tiene un efecto altamente significativo para las cuatro variables de respuesta. También que la velocidad de infiltración máxima y mínima en la superficie, para los sistemas labranza, estadísticamente son iguales. Pero, a 8 cm de profundidad el comportamiento estadísticamente es diferente.

Palabras clave: Infiltrómetro de discos, Flujo hidráulico, Comportamiento hidrodinámico

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia y justificación

Los suelos Feozem donde se arraigan los pastizales de México, se caracterizan por ser muy fértiles y aptos para el cultivo y proclives a la erosión. Con frecuencia son suelos profundos y ricos en materia orgánica; debido a ello, históricamente los agricultores los han preferido para uso agrícola (CONAFOR, 2005).

Según datos del INEGI (2008), se distribuyen en gran variedad de climas y regiones de México, en climas templados y húmedos, por lo que se encuentran recubriendo el eje neovolcánico transversal y porciones de la sierra madre occidental, la superficie que ocupan los suelos de este tipo (Feozem) es del 9.7% con respecto al total nacional, aunque se reconoce que junto con esta son cinco unidades predominantes: Leptosoles, con 24%; Regosoles, con el 18.5%; los Calcisoles con un 18.2%; y Vertisoles con 8.3%.

Los impactos en el cambio de uso del suelo han sido evaluados y documentados de manera extensa, de tal manera que a la fecha se sabe que las actividades agrícolas, entre otras cosas, tienden a incrementar la densidad de volumen (Udawatta et al., 2008), afectando con ello otras propiedades físicas, como es la capacidad para conducir y almacenar humedad en la capa arable. Por ejemplo, Cabria y Culot (2000) reportan que la labranza convencional ejerce a largo plazo un efecto sobre el flujo vertical del agua en suelos de textura franca arcillosa; en tanto que Auki y Sereno

(2005) mencionan que el arado de discos tiene una gran influencia sobre la conductividad hidráulica debido a cambios ejercidos sobre la estructura y agregación de suelos de tipo franco limosos.

Los infiltrómetros de disco a tensión descritos por Perroux y White (1988) están siendo ampliamente usados para determinar propiedades hidráulicas *in situ* de suelos saturados o cercanos a la saturación (Clothier y White, 1981; Wilson y Luxmoore, 1988; Smettem *et al.*, 1995; Jarvis y Messing, 1995).

1.2. OBJETIVOS

Con base en lo anteriormente expuesto, en la presente investigación se empleo el infiltrómetro de discos, por ser una prueba que no modifica el suelo, porosidad y la medición es expeditiva, ya que el flujo en estado estacionario es alcanzado rápidamente. De tal manera que los objetivos planteados en este caso son:

- Explicar el comportamiento hidrodinámico de un suelo sometido a diferentes tensiones y sistemas de labranza; y
- Evaluar el impacto de la labranza convencional (LC) y vertical (LV) en las tasas de infiltración comparado con un área sin labranza (NL).

1.3. HIPÓTESIS

“El manejo del suelo mediante la labranza convencional (LC), produce cambios significativos en la velocidad de infiltración promedio.”

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.2. Descripción y delimitación de suelos de pastizal del norte de México, convertidos a uso agrícola

2.1.1. Generalidades

Los suelos de pastizal del norte de México se caracterizan por encontrarse dentro de climas de tipo árido y semiárido, cuya precipitación es menor a 500 mm anuales, que presentan una distribución de lluvias muy irregular durante el ciclo vegetativo, que cuentan con una temperatura media anual que oscila entre los 15 y 25°C y con no menos de 7 meses de sequía y cuya cubierta vegetal es menor al 70%, predominando en ella los elementos xerófitos (Villa, 1981).

Existe una clara asociación entre el suelo y la vegetación. Los calcisoles y arenosoles están restringidos prácticamente a las zonas áridas y semiáridas, cubiertas por matorrales y pastizales. Los feozems y andosoles son típicos de los bosques y pastizales templados. La humedad de varias zonas selváticas hace que ciertos suelos que se forman en presencia de grandes cantidades de agua, como los gleysoles y los alisoles, sean más frecuentes bajo esta vegetación (CONAFOR, 2005).

En particular, los suelos Feozem, (del griego phaios, oscuro y del ruso zemlja, suelo), se caracterizan por ser muy fértiles y aptos para el cultivo y proclives a la erosión. Con frecuencia son suelos profundos y ricos

en materia orgánica. Según se puede ver en la Figura 2.1, se distribuyen en gran variedad de climas y Regiones de México, en climas templados y húmedos, por lo que se encuentran recubriendo el Eje Neovolcánico Transversal y porciones de la Sierra Madre Occidental (CONAFOR, 2005)

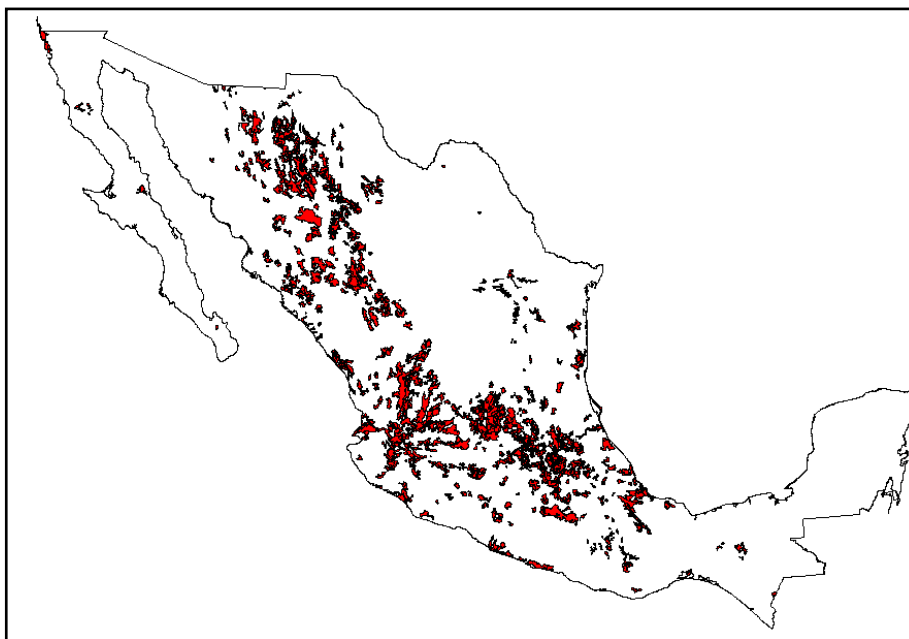


Figura 2.1. Distribución de Suelos de Tipo Feozem

Según datos del INEGI (2008) la superficie que ocupan lo suelos de este tipo (Feozem) es del 9.7% con respecto al total nacional, aunque se reconoce que junto con esta son cinco unidades predominantes: Leptosoles, con 24%; Regosoles, con el 18.5%; los Calcisoles con un 18.2%; y Vertisoles con 8.3%.

2.1.2. Origen geológico

México tiene una compleja historia geológica. Mientras que en varios estados del norte existen rocas antiquísimas que datan de los albores de la vida, en otras entidades los suelos aún no han cumplido un año de edad. Áreas considerables del territorio nacional emergieron del fondo oceánico, como casi todo el oriente del país; otras han sido conformadas en gran medida por la actividad volcánica, como el cinturón de volcanes que corre de

Colima hacia el centro de Veracruz. Así como la península de Baja California empezó hace años a desgajarse lentamente del resto del territorio, la porción de corteza que ahora es Oaxaca originalmente fue una isla que colisionó contra el continente para formar un escarpado sistema de serranías (CONAFOR. 2005).

Con ello se explica la complejidad geológica del territorio, donde se encuentra una gran diversidad de rocas con características y orígenes distintos. Cada roca interactúa en forma diferente con el agua, el clima y la biota que habita en su región. El producto de dicha interacción es el suelo. En México, dada su intrincada geología, se han derivado 25 de las 28 unidades de suelo reconocidas en 1988 por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), (CONAFOR 2005).

2.1.3. Composición típica

El material original lo constituye un amplio rango de materiales no consolidados; destacan los depósitos glaciares y el loess con predominio de los de carácter básico (unex, 2005).

Se asocian a regiones con un clima suficientemente húmedo para que exista lavado pero con una estación seca; el clima puede ir de cálido a frío y van de la zona templada a las tierras altas tropicales. El relieve es llano o suavemente ondulado y la vegetación de matorral tipo estepa o de bosque (FAO, 2005).

El perfil es de tipo ABC el horizonte superficial suele ser menos oscuro y más delgado que en los Chernozem. El horizonte B puede ser de tipo Cámbico o Árgico (FAO, 2005).

Los Feozems vírgenes soportan una vegetación de matorral o bosque, si bien son muy pocos. Son suelos fértiles y soportan una gran variedad de

cultivos de secano y regadío así como pastizales. Sus principales limitaciones son las inundaciones y la erosión (unex, 2005).

2.2. Movimiento del agua en el suelo

El flujo del agua en el suelo se realiza por los espacios vacíos (porosidad); de ahí que la organización y características de estos espacios condicionen el transporte y retención del agua, para posteriormente ser aprovechados por las plantas o para alimentar los mantos acuíferos. Un parámetro hidrodinámico como la conductividad hidráulica a saturación depende en gran medida de la abundancia relativa y de la distribución espacial de los vacíos existentes en el suelo; la descripción de tales espacios, considerando solo su volumen, generalmente no es suficiente para explicar la dinámica que sigue el agua en el suelo (Hallaire et al., 1997).

Por lo que la caracterización del espacio poroso basado en los caminos de circulación preferencial del agua puede ser descrita y cuantificada a partir de tres criterios morfológicos: tamaño, forma y continuidad de los poros y sus variaciones en el perfil. Esto puede realizarse a través de técnicas de análisis de imágenes, procedimiento que cuenta con ya un importante desarrollo en el estudio de la porosidad de los suelos (Bouma et al., 1979; Stengel, 1979; German y Beven, 1981; Bullocky Mc Keague, 1984; Bruand, 1986; Curmi, 1988; Grimaldi y Boulet, 1989 – 1990; Hallaire, 1997; Hallaire et al., 1997; González, 2002).

Los principales mecanismos que participan en el movimiento del agua en el suelo son el gradiente hidráulico, el potencial mátrico y la gravedad (Iversen et al., 2001; Wallach et al., 1992). La velocidad del flujo no saturado depende del tamaño de los poros que están activos y de la tensión con que el agua está retenida (William et al., 1991). En el flujo no saturado existe una fuerte relación entre la conductividad hidráulica, el contenido de agua y el espesor de las películas de agua (Baver y Gardner, 1973).

Cuando se aplica agua en el suelo, esta se infiltra y se desplaza dentro de los poros del suelo, siempre que no existan barreras impermeables que restrinjan su movimiento. El principio de este fenómeno es la presencia de un gradiente de energía del agua (potencial hídrico) y la capacidad que tiene el suelo, como cuerpo poroso, para conducir agua (Narro, 1994).

El movimiento del agua en el suelo, al igual que el transporte de calor, de electricidad y la difusión de gases, obedece a lo que se ha denominado “ley general del transporte”, aplicable a un gran número de procesos.

Esta ley establece que el flujo de energía o materia a través de un medio dado es directamente proporcional al gradiente de energía entre dos puntos en estudio, e inversamente proporcional a la resistencia que opone el medio al transporte; o bien, directamente proporcional a la capacidad que tiene el medio para conducir la materia o energía. La ecuación expresa la ley general del transporte (Narro, 1994).

$$f_i = K_i \Delta E_i$$

Donde:

f_i = es el flujo de energía o de materia i ;

K_i = es la conductividad del medio para i ;

ΔE_i = es el gradiente de energía para i .

La ecuación está basada en condiciones estables.

En el cuadro 2.1 se incluyen varias aplicaciones de la ley del transporte (Narro 1994).

Cuadro 2.1. Gradientes de energía y conductividades que generan transporte de algunos materiales y energía.

Materia o energía transportada	Conductividad	Gradiente energético	Ley aplicable
Agua	Hidráulica	Potencial hídrico	De Darcy
Gas, difusión	Coeficiente de difusión	Potencial químico	De Fick
Sedimentos s/c* Partículas		Potencial gravitacional	
Moléculas		Potencial gravitacional + Potencial químico	
Iones**		Potencial electrostático + Potencial químico	
Calor	Térmica	Temperatura	De Fourier
Electrones	Eléctrica	Potencial electrostático	De Ohm

*Sin carga eléctrica

**Electroforesis

Por conveniencia, se distinguen dos tipos principales de flujo de agua en el suelo.

- Saturado, cuando prácticamente todos los poros del suelo conducen agua. La velocidad del flujo se determina por la conductividad hidráulica; el tamaño y la distribución de los poros determinan la facilidad con que el agua atraviesa el suelo (Fitzpatrick, 1996).
- No saturado, en el cual los poros mas grandes están llenos de aire y prácticamente no conducen agua. Este movimiento ocurre con respuesta a la gravedad y al gradiente de humedad, se realiza la traslocación del

material en solución y suspensión, y equilibra la tensión superficial de la humedad del suelo (Fitzpatrick, 1996).

Otra ley que se utiliza para el cálculo de movimiento del agua en el suelo es la llamada ecuación de continuidad la cual relaciona el gasto Q , medido sobre dos secciones transversales y velocidades diferentes (Aguilera, 1996).

$$Q = A_1V_1 = A_2V_2$$

Donde:

Q = es el gasto, m^3/seg .

A_1, A_2 = es el área, m^2 .

V_1, V_2 = es la velocidad, m/seg .

Existen dos fuerzas que influyen en la retención de humedad por los suelos. Una es la atracción a través del área de la superficie de las partículas minerales (adherencia). La otra es la atracción de las moléculas de agua entre sí (cohesión). Por la adherencia, los sólidos retienen las moléculas de agua rígidamente en los microporos. Estas moléculas, a su vez, retienen por cohesión otras moléculas de agua. Ambas fuerzas juntamente hacen posible que los sólidos del suelo retengan agua y controlen en alto grado su movimiento y utilización. Además, las fuerzas acentúan que esta energía actúe en la relaciones suelo-agua y hacen que la tensión con que el agua esta retenida varíe con la distancia de las moléculas a los sólidos del suelo (Chávez, 2004).

2.2.1. Conductividad hidráulica del suelo

La conductividad hidráulica es la permeabilidad que presenta un suelo al agua; también se le puede definir como el cociente del flujo unitario de agua entre el gradiente hidráulico, en la ley de Darcy. Sus unidades dependen de las del gradiente hidráulico, ya que las unidades del flujo unitario generalmente son cm^3 de agua / cm^2 de área/seg., o alguna otra unidad de tiempo más conveniente (Narro, 1994).

La conductividad hidráulica a saturación (flujo permanente) se define como la capacidad máxima que presenta un suelo al paso de agua y se calcula a partir de una ecuación monofásica, es decir considera únicamente el movimiento gravitacional del agua por los espacios vacíos del suelo y se representa por la ley de Darcy (1800) a través del flujo unitario del agua entre el gradiente hidráulico (Chávez, 2004).

Por su parte la conductividad hidráulica (flujo transitorio) se define como la capacidad real que presenta el suelo al paso del agua y se cuantifica mediante una ecuación bifásica (González, 2003), en estas ecuaciones considera el movimiento del agua y la importancia del aire al interior de los espacios vacíos del suelo y se representa por las ecuaciones de Philip; Reynolds; Green y Ampt (1911) (Chávez, 2004).

La permeabilidad del suelo (K) depende de la porosidad de este, de la distribución del tamaño de los poros y de la geometría de éstos. La fluidez del agua depende de su temperatura, la cual afecta directamente su viscosidad y densidad; además, depende de la gravedad (Narro, 1994).

La conductividad hidráulica depende también del contenido de humedad del suelo. En condiciones de saturación el valor de K es constante; pero en condiciones de no saturación, es decir para los valores de $h < 0$, K es directamente proporcional al contenido de humedad, menor número de poros del suelo conducirán agua; los que conducen agua son los de radio más pequeño (Narro, 1994). Nótese que el valor de la conductividad se hace constante para valores de h iguales o superiores a cero.

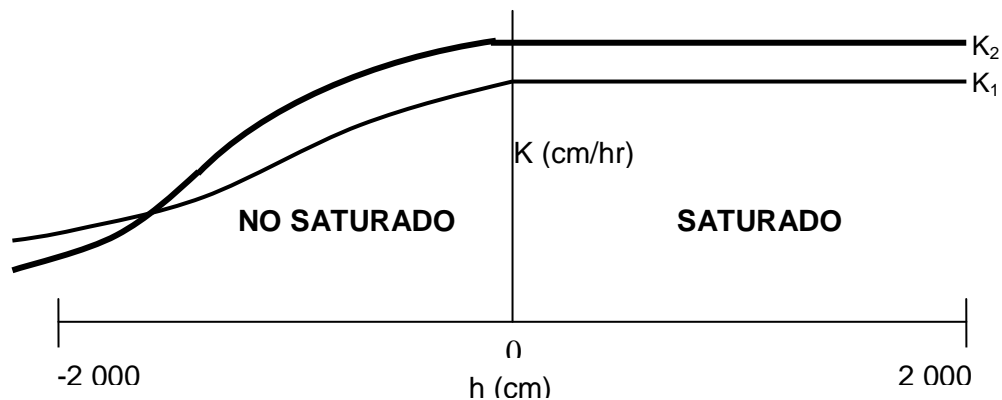


Figura 2.2. Relación entre la conductividad hidráulica (K) de dos suelos de diferentes texturas y las cargas por presión (h) positivas y negativas.

Bajo ciertas circunstancias y especialmente cuando la superficie del suelo ha estado sumergida bajo el agua durante largo tiempo y cuando la conductividad hidráulica casi no varía con la profundidad, el gradiente hidráulico debajo de la superficie puede aproximarse al valor de la unidad o sea que no hay ningún gradiente de presión y la fuerza de empuje hacia abajo se compone solamente de la gravedad. Bajo estas condiciones, la infiltración es igual a la conductividad hidráulica (Cuadro 2.2). Esto con seguridad, más que una regla es una excepción, bajo condiciones de campo (Aguilera, 1996).

Cuadro 2.2. Las clases propuesta para indicar la conductividad hidráulica consideran las siguientes láminas de agua.

Velocidad	Lamina de agua (cm/hr)
Muy lenta	Menos de 0.15
Lenta	De 0.15 a 0.50
Moderada	De 0.50 a 15
Rápida	De 15 a 25
Muy rápida	Más de 25

Fuente: Aguilera, 1996

2.2.2. Infiltración

La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores. Muchos factores del suelo afectan el control de la infiltración, así como también gobiernan el movimiento del agua dentro del mismo y su distribución durante y después de la infiltración. (Vélez et al, 2002).

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Este fenómeno es influenciado por varios factores, entre los cuales están: las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, y el contenido de humedad en el suelo, (*Chow et al., 1993*).

Entonces la capacidad de infiltración conocida también como “infiltrabilidad del suelo” es simplemente el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie, cuando es mantenido en contacto con el agua a presión atmosférica. Mientras la velocidad de aporte de agua a la superficie del suelo sea menor que la infiltrabilidad, el agua se infiltra tan rápidamente como es aportada, esto nos dice que la velocidad de aporte determina la velocidad de infiltración (o sea, el proceso es controlado por el flujo). Sin embargo existe también la posibilidad que la velocidad de aporte exceda la infiltrabilidad del suelo y en ese mismo momento ésta última es la que determina la velocidad real de infiltración; de ese modo el proceso es controlado por las características del perfil (Gurovich, 1985).

La velocidad de infiltración depende de muchos factores, como son el espesor de agua empleado para el riego o lluvia, la temperatura del agua y el suelo, la estructura y la compactación, textura, estratificación, contenido de humedad, agregación y actividades microbianas (Gavande et al. 1972), además los distintos manejos que se le imponen al suelo modifican a estos factores y por ende las labranzas modifican la velocidad de entrada de agua al perfil de

suelo. Cuando las labranzas modifican la distribución del tamaño de los poros, en la capa arable, se produce un incremento en la capacidad del suelo para retener agua a bajas succiones lo que hace que incremente la infiltración, por debajo de la capa arable la capacidad de retención de agua es menor por lo que hace disminuir la infiltración, esto es debido a los cambios en la geometría del espacio poroso (compactación, piso de arado) inducidos por las labranzas (Pla Sentis, 1994).

Muchas de las actuales investigaciones sobre el movimiento del agua a través del suelo están centradas en el rol de los macroporos que pueden ser afectados drásticamente por las prácticas de manejo y por factores ambientales. En este sentido, Aoki y Sereno (1999) han observado, a través de mediciones con simulador de lluvia, que el proceso de infiltración es un sistema dinámico, en el que seguramente se van produciendo cambios a nivel de la estructura y la porosidad del suelo a medida que el agua va infiltrando.

La labranza convencional crea poros cerca de la superficie que contribuyen al movimiento de agua, pero son menos estables y más tortuosos que los creados por la fauna y raíces en labranzas conservacionistas (Logsdon, Kaspar 1988).

2.3. Modelos para determinar la infiltración

A continuación se mencionan algunos modelos clásicos para estimar la infiltración de agua en el suelo. Como modelo de base física se presenta el *Modelo de Richards* (1931), con la solución monodimensional de *Philip* (1957) y la tridimensional con forma cilíndrica de *Wooding* (1968). Como modelo conceptual es analizado el modelo monodimensional de *Green y Ampt* (1911).

2.3.1. Ecuaciones para el cálculo de la velocidad de infiltración

Se han elaborado varios modelos empíricos por medio de los cuales los datos de campo, estos modelos se discuten enseguida:

2.3.2. Ecuación de Horton

Citado por Forsythe (1975), propuso la siguiente ecuación para la velocidad de infiltración (Aguilera, 1996).

$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt}$$

Donde

f = Velocidad de infiltración, cm/hr.

f_o = Velocidad inicial de infiltración, cm/hr.

f_c = Velocidad final de infiltración, cm/hr.

k = Constante, adimensional.

t = Tiempo, hr.

2.3.3. Ecuación de Philip

Citado por Gavande (1973) desarrollo una teoría de infiltración y en base a ella propuso la siguiente ecuación:

$$Z = St^{1/2} + bt$$

Donde

Z = Infiltración acumulada, l.

S = Sortividad, l/t^{1/2}.

B = Transmisibilidad, l/t.

t = Tiempo, t.

El parámetro S indica la capacidad de un suelo homogéneo de absorber o liberar agua y por eso se le ha llamado sortividad, Gavande (1973). El parámetro b según Gavande depende de la conductividad del suelo al agua, de su contenido inicial de agua y hasta cierto punto del agua que el suelo ha absorbido y por lo tanto podría llamársele trasmisibilidad. Philip, citado por Forsythe (1975) estimó que para valores de t entre 10^5 y 10^6 su ecuación no es válida.

2.3.4. Ecuación de Kostiakov-Lewis

Determina la infiltración acumulada o lamina de agua acumulada que penetra en el suelo en un tiempo determinado, expresada en cm (Chávez, 2004).

$$L = K * T^n + B$$

Donde

L = lamina infiltrada.

T = Tiempo.

K = Parámetro que depende de la estructura y la condición del suelo en el momento en que se aplica el agua.

n = Parámetro que depende de los cambios de estructura del suelo, resultantes de la mojadura.

B = Infiltración básica.

2.3.5. Ecuación de Green y Ampt

Green y Ampt en 1911, propusieron una ecuación para la capacidad de infiltración de un suelo basada en una ecuación bifásica, que tiene la forma siguiente (Chávez, 2004).

$$i(t) = \frac{K_s + K_s (h_o - h_f)\theta_s - \theta_i + 1}{l(t)}$$

Donde

$I(t)$ = Velocidad de infiltración.

K_s = Continuidad hidráulica a saturación.

h_o = Carga hidráulica a la superficie del suelo.

h_f = Presión capilar efectiva.

Θ_s = Humedad volumétrica del suelo.

Θ_i = Humedad volumétrica inicial del suelo.

$I(t)$ = Representa la lamina de agua infiltrada.

2.4. Medición de la infiltración por medio de la técnica de Infiltrómetro de discos

Los infiltrómetros de disco a tensión descritos por Perroux y White (1988) están siendo ampliamente usados para determinar propiedades hidráulicas *in situ* de suelos saturados o cercanos a la saturación (Clothier y White, 1981; Wilson y Luxmoore, 1988; Smettem *et al.*, 1995; Jarvis y Messing, 1995).

Estos instrumentos permitirían identificar en términos cuantitativos la contribución relativa de algunos de los parámetros hidrodinámicos fundamentales de los que depende el caudal de agua infiltrada, seleccionando determinado rango de presión durante la aplicación de agua. Es una técnica no destructiva, que no modifica el suelo, porosidad y la medición es expeditiva, ya que el flujo en estado cuasi estacionario es alcanzado rápidamente. En este caso, la infiltración de agua en un suelo no saturado en condiciones de estado estacionario refleja las características de la red de poros, formada por yuxtaposición de partículas sólidas y elementos estructurales (Taboada Castro *et al.*, 1998).

Algunas de las propiedades hidráulicas del suelo más importantes, que permiten cuantificar el tamaño, la distribución y la continuidad de la red de poros

son: la conductividad hidráulica a saturación, la relación entre potencial mátrico y contenido hídrico, y la sortividad del suelo (S_0), que es una medida de la habilidad que tiene un suelo de absorber agua durante el proceso de humedecimiento; Todas ellas están interrelacionadas y pueden ser evaluadas a partir de esta técnica, en donde el flujo es no confinado y se elimina el disturbio estructural provocado por cilindros, como así también la posible modificación de la estructura superficial por el impacto de la gota de lluvia (Smettem y Clothier, 1989). A su vez estas propiedades son muy importantes en estudios de erosión, balance hídrico y producción vegetal.

White y Sully (1987) propusieron que los resultados de infiltración obtenidos con técnicas de medidas *in situ*, podrían ser usados para estimar las consecuencias de la degradación estructural del suelo desde el punto de vista hidrológico. Además, estos aparatos han demostrado ser útiles para caracterizar prácticas de manejo de suelo (Ankeny *et al.*, 1991) y estructura del suelo (Wilson y Luxmoore, 1988; Coughland *et al.*, 1991; Angulo Jaramillo *et al.*, 1997).

Muchas de las actuales investigaciones están centradas en el rol de los macroporos en el movimiento del agua a través del suelo (Ela *et al.*, 1992; Baird, 1997). La fracción de la porosidad total que contribuye al flujo de agua influye en la profundidad a la que el agua penetra después de la infiltración.

En este sentido, los infiltrómetros de disco a tensión proveen un mecanismo útil para diferenciar el movimiento del agua a través de fisuras y poros biológicos del que ocurre a través de la matriz del suelo (Clothier y White, 1981; Perroux y White, 1988; Ankeny *et al.*, 1988). Además, los infiltrómetros de disco pueden ser usados para determinar en cuánto contribuyen distintos rangos de poros al flujo total de agua, comparando tasas de infiltración medidas a varios potenciales de aplicación de agua (Watson y Luxmoore, 1986; Jarvis *et al.*, 1987; Lin y McInnes, 1995). También son adecuados para estimar las

propiedades hidráulicas requeridas como entradas para modelos de transporte de agua y solutos.

El flujo de agua por los macroporos y su variabilidad espacial ha sido identificado como un importante proceso de transporte durante la lluvia (Beven y German, 1982). En cuanto a la variabilidad de las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo en condiciones próximas a saturación, Taboada Castro *et al.* (1998) afirman que la mayor parte de los autores admiten que ésta es muy amplia y puede ser atribuida, en buena parte, a la presencia de fenómenos de flujo preferencial. Las prácticas de manejo y factores ambientales pueden cambiar drásticamente la macroporosidad (Perroux y White, 1988).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización geográfica general 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 3.1, 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).

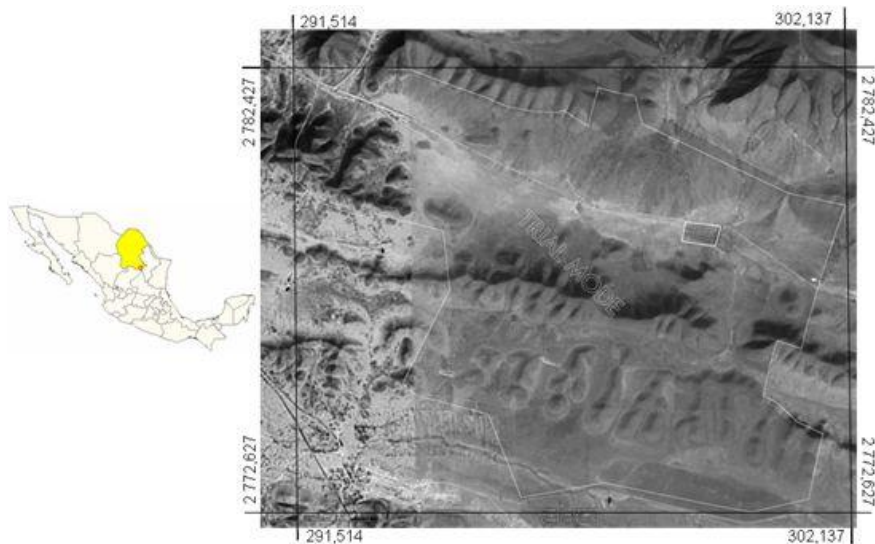


Figura 3.1. Ubicación geográfica del rancho los Ángeles, Mpio., de Saltillo, Coahuila México, en coordenadas UTM, con respecto al territorio nacional (sin escala).

3.2. Características generales del sitio de estudio

El trabajo de investigación se realizó en una fracción de 35 ha del potrero 4, localizado justamente en el centro del rancho. Se definieron 3 parcelas de 2.4 ha, por tener características edáficas y de vegetación similar, cada una con una longitud de 120 m en su dirección N-S y 200 m en dirección E-O, donde se estudiaron los horizontes de diagnóstico en la profundidades 0-30 y 30-60 cm.

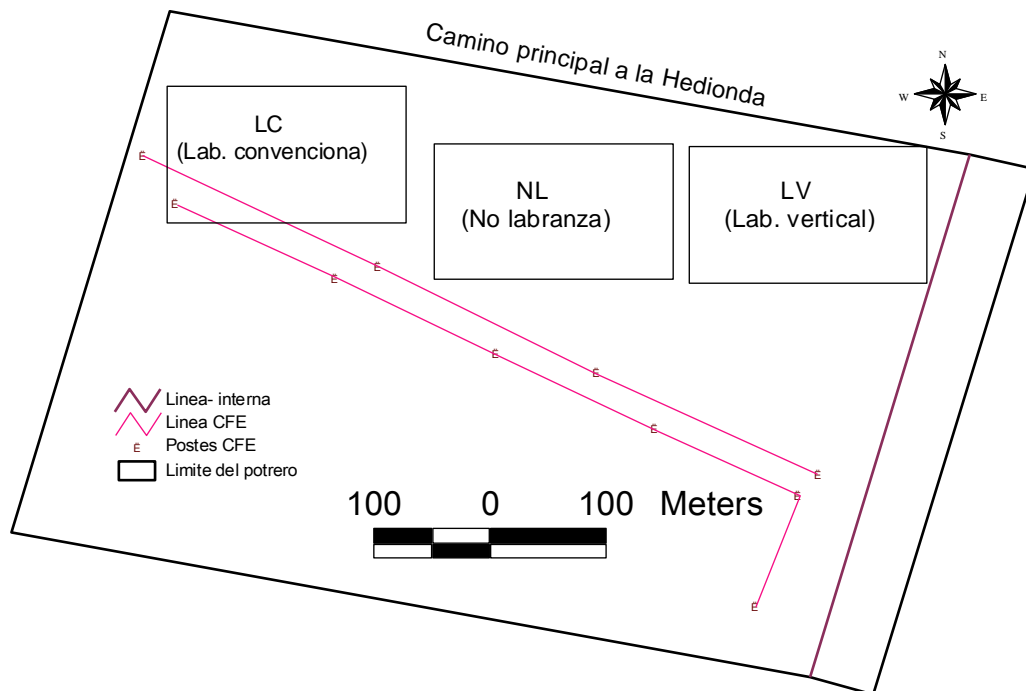


Figura 3.2. Ubicación del sitio de estudio en el rancho los Ángeles.

La selección de las parcelas de estudio para nuestro trabajo fueron seleccionadas de manera al azar en donde se realizaron los trabajos de labranza, los cuales presentaban distintas características de las cuales a continuación haremos referencia:

Encontrando terrenos con alto contenido de materia seca en la superficie para que de esta manera proceder a hacer una limpia del área en el cual se

estableció el sitio de trabajo como se muestra en la Figura 3.3 que ha continuación se muestra.



Figura 3.3. Sitio de estudio en la parcela donde estaba la NL.

Otra de las parcelas en las cuales se realizó el trabajo fue donde se realizó la LV, en esta se encontró características muy diferentes a la anterior NL ya que en esta encontramos un suelo mucho menos comprimido y de esta manera nos facilitó nuestro trabajo en campo (Figura 3.4).



Figura 3.4. Sitio de estudio donde se realizó la NL.

La otra parcela en estudio presentó otras distintas características en comparación con las anteriores tomando en cuenta que en esta última se realizó la LC, la cual es mucho más agresiva que la anterior y de esta manera se procedió a trabajar en este tipo de terreno como se muestra en la Figura que continuación se muestra (figura 3.5).



Figura 3.5. Sitio de estudio donde se realizó LC

3.3. Clima

El clima del lugar de acuerdo con García, (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 [BW_{hw}(x')(e)].

3.4. Vegetación

Vásquez (1973) clasifica la vegetación del rancho Los Ángeles en función de la forma de vida, cobertura, tamaño, forma y textura de las hojas, encontrando siete tipos de vegetación los cuales son los siguientes:

Pastizal mediano abierto, localizado en los valles con suelos profundos de origen aluvial. Pastizal amacollado, ubicado en las faldas de las sierras con suelos pocos profundos y pedregosos.

Matorral rosetófilo, encontrándose en laderas con Exposición Sur y cimas de cerros.

Izotal, localizado en laderas con pendientes moderadas, suelos arenosos y pedregosos.

Matorral esclerófilo, se encuentra en sierras altas con pendiente considerable y exposición norte.

Bosque aciculifolio, se ubica en laderas y cimas de cerranías altas.

Matorral dasylirion con pastos amacollados, localizados en la parte sur del rancho cubriendo la mayoría de los lomeríos y cerros de escasa altura.

3.5. Suelo

Previamente a la implementación de la presente investigación, López-Santos (2008) realizó un estudio del medio físico por medio de un proceso de digitalización en el rancho los Ángeles para identificar los suelos dominantes del área, y encontró que de los grupos definidos por la FAO (1994) los Luvisoles se localizan en las planicies y corresponden al 40% de la superficie total y 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; además, de la parte alta de la sierra, son suelos forestales de formación *in situ* ricos en materia orgánica y humus.

En uno de los potreros con características edafológicas homogéneas, se definieron las parcelas (Figura 3.2), donde se determinaron las características físicas y químicas del suelo de los estratos 0-30 y 30-60 cm, los resultados se muestran en el Cuadro 4.1, con los datos de este cuadro, el suelo se clasificó como Feozem lúvico (HI) (INEGI, 2001).

3.5.1. Propiedades físicas y químicas del suelo

Cuadro 3.1. Propiedades físicas y químicas del suelo del sitio experimental obtenidas del laboratorio

Variable	Estrato		Método de evaluación
	0-30	30-60	
PH	8.28	8.31	Potenciómetro
CE (ds/m)	2.1	0.509	Puente de Wheatstone
Arcilla (%)	44	58	Hidrómetro de Bouyoucos
Limo (%)	24	28	“ “
Arena (%)	32	14	“ “
Clase textural	Arcilloso	Arcilloso	Triangulo de texturas
N (%)	0.21	0.14	
MO (%)	4.24	2.8	Walkley y Black
Color (en seco)	10YR 5/2	10YR 3/2	Uso de tabla de colores Munsell
Da (Kg m ⁻³)	930		Barrena de Núcleos
Carbonatos totales (%)	37.28	37.77	Volumetría de neutralización
Reacción al HCl (10% en H ₂ O)			Prueba cualitativa rápida (INIFAP-ORSTOM, 1997)
	Media	Media	

Fuente: López-Santos, 2008

3.5.2. Especies identificadas en el área de estudio

Cuadro 3.2. Especies identificadas en el área definida como testigo donde se realizo el trabajo de investigación

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) <i>Shinners</i>	Escobilla
Asteraceae	<i>Aphanostephus ramosissimus</i> DC.	Perezosa

Acanthaceae	<i>Dischoryste linearis (T.&G.)O. Ktze</i>	Acanto
Onagraceae	<i>Calylophus belandieri (Spach) Towner</i>	Amapola
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia furcillata H.B.K.</i>	Hierba del coyote
Boraginaceae	<i>Tiquila canescens (DC.) Richardson</i>	Oreja de ratón
Chenopodiaceae	<i>Eurotia lanata (Pursh) Moq.</i>	Gordura de invierno
Poaceae	<i>Stipa clandestina Hack</i>	Zacate picoso

3.5.3. Uso del suelo

Dentro de la propiedad del rancho los Ángeles existen potreros que tienen uso ganadero y otros uso agrícola, se pueden mencionar que en los potreros destinados para uso agrícola los cultivos que predominaron fueron, alfalfa, trigo y cebada de los que se obtuvieron muy buenos rendimientos gracias a las grandes cantidades de precipitaciones en las épocas de lluvia en las zonas antes mencionadas.

3.6. Mediciones con el infiltrómetro de discos en los sitios de estudio

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos. A continuación se muestra el procedimiento empleado para evaluar el comportamiento hidrodinámico del suelo.

3.6.1. Primera etapa:

Seleccionar el área en el cual se iba a atrabajar tomando en cuenta las distintas labranzas en las cuales se tenían que evaluar, y después se procedió a preparar el área donde se iba a atrabajar, realizando una limpieza como lo es el retiro de las malas hierbas, y posteriormente añadir un poco de arena

finamente tamizada para evitar los factores que influyen y afectan en la capacidad de infiltración como lo son la entrada superficial, transmisión a través del suelo, capacidad de almacenamiento del suelo, características del medio permeable, y características del fluido y algunos otros problemas con la tierra al no dejar pasar el agua y quedarse en el infiltrómetro de discos, y posteriormente tener una área de trabajo que tuviera un diámetro de no menos de 30 cm para de esta manera poder proceder con las medición de la infiltración del agua la cual se llevó a diferentes tensiones las cuales fueron las siguientes, 10, 50, 100 y 150 con el siguiente procedimiento en los sitios de trabajo (Figura 3.6).



Figura 3.6. Áreas de estudio antes durante y después de la utilización de los cilindros infiltrómetros de discos.

3.6.2. Segunda etapa

Se llenaron con agua libre de residuos como lo son basura y arena a los infiltrómetros de discos de tal manera que estuviesen totalmente llenos y libres de burbujas de aire. Posteriormente se realizó una extracción de algunas muestras de las cuales se llevaron algunas a 5cm antes de empezar con el trabajo para poder determinar el peso del suelo seco en campo y la densidad aparente posteriormente (Figura 3.7).



Figura 3.7. Cilindro infiltrómetro de discos en campo

3.6.3. Tercera etapa

Una vez que el flujo de agua del infiltrómetro al suelo era constante las mediciones se dejaban de realizar, por el hecho de que el flujo era el mismo en diferentes tiempos y se procedió a excavar hasta donde la humedad del agua estaba en el suelo, para después tomar otra muestra a una profundidad de 10 cm en el perfil del suelo del sitio de trabajo (Figura 3.8).



Figura 3.8. Fotografías de los tratamientos después de llegar a infiltraciones constantes.

3.6.4. Cuarta etapa

La cuarta etapa comprende el registro de datos en campo, de tal modo que durante el proceso de infiltración se llevó un registro de datos en el cual consistía en recolectar durante el tiempo necesario en el cual la infiltración fuera constantes los diferentes tiempos y profundidades en las cuales estaba la infiltración en el suelo, para que de esta manera poder realizar una hoja de cálculo para poder obtener los promedios de velocidad de infiltración que más adelante se mencionaran de manera más específica tomando como base un trabajo estadístico en una hoja de cálculo (ver formato anexo).

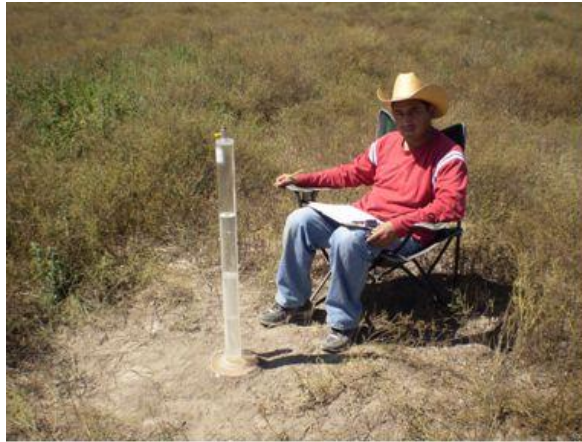


Figura 3.9. Recolección de los datos en campo.

De esta manera se estuvieron haciendo diferentes mediciones en distintos sitios de las instalaciones del rancho los Ángeles para poder determinar la velocidad de infiltración bajo diferentes condiciones de suelo y así poder tener una mejor discusión y conclusión de este trabajo(Figura 3.9).

3.7. Diseño experimental

El trabajo de investigación fue diseñado bajo un sistema completamente al azar, con tres repeticiones, considerando como fuentes de variación al sistema de labranza empleado y cuatro niveles de tensión (150, 100, 50 y 10), cuyo esquema matricial se presenta en la cuadro 3.3. De la manera siguiente:

Cuadro 3.3. Estructura matricial del diseño estadístico

Fuentes de variación		Repeticiones		
Sistema de labranza	Tensión	1	2	3
NL	150	NL1501	NL1502	
	100			
	50			
	10			
LV	150			
	100			
	50			
	10			
LC	150			
	100			
	50			
	10			LC103

3.8. Variables medidas

Para el estudio del fenómeno del movimiento de agua en el suelo se empleó un formato especialmente diseñado para hacer los registros puntuales de lámina infiltrada ($K\theta$) en cm por unidad de tiempo en segundos para cada nivel de tensión.

3.9. Análisis estadístico

Los datos obtenidos en campo fueron sistematizados en una plantilla de Excel, lo cual permitió calcular los valores, así como su representación gráfica para lámina acumulada, velocidad de infiltración y sortividad. Para este caso, se obtuvieron los valores de velocidad de infiltración en mm s^{-1} y estos mismos fueron convertidos a cm h^{-1} . Los valores así obtenidos fueron agrupados en una

plantillas, como las que se mostró anteriormente (Cuadro 3.3) para su análisis estadístico en SAS.

En virtud de que los datos puntuales (velocidad de infiltración) no presentaban una distribución normal, estos fueron transformados a la forma $x^{1/2}$, lo cual, permitió proceder al empleo del PROC ANOVA y aplicar la Prueba del Rango Estudentizado de Tukey (HSD) en SAS (SAS, 2006) para cada una de las variables de respuesta estudiadas con un nivel de significancia de 0.05.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El almacenaje de agua dentro del perfil del suelo, a partir del fenómeno de infiltración, es un requerimiento básico para la producción agrícola, dependiendo su magnitud de las condiciones físicas en que se encuentra el terreno en esos momentos. Los sistemas de labranza juegan un rol fundamental sobre el proceso de infiltración al modificar las características estructurales del sustrato, afectando consecuentemente el equilibrio hidrológico natural.

El presente trabajo de investigación esta para explicar y evaluar los cambios en el comportamiento hidrodinámico del suelo debido al manejo del suelo mediante dos métodos de labranza, tendiendo como referencia un terreno sin disturbio, el cual se consideró como tratamiento control o testigo (NL). El primer método de labranza consistió en el empleo de un sistema de labranza convencional (LC) mediante el uso de un arado de discos; y segundo, mediante el empleo de un arado vertical (LV), provisto de rejas en forma de aleta. La profundidad de trabajo para ambos sistemas de labranza fue establecida entre 25 y 30 cm.

Para tal efecto, a continuación se muestran los resultados de las mediciones hechas en campo en relación a las velocidades mínimas y máximas de infiltración registradas para las condiciones de suelo antes descritas, considerando el movimiento desde la superficie del suelo y a 8 cm de profundidad.

4.1. Velocidades de infiltración a distintas tensiones

4.1.1 Velocidad de infiltración mínima en la superficie

En la **Figura 4.1.** Se representa la diferencia que existe entre la infiltración para las cuatro tensiones en la superficie, donde observan diferencias entre cada una de ellas. Por ejemplo, la tensión de 10, los valores de $K\theta$ son semejantes entre si por tener valores entre 3.36 y 3.48; seguido para la tensión de 50 cm donde destaca LC (achurado vertical) con un valor cercano a 2.5 cm h^{-1} ; mientras que NL (achurado horizontal) y LV (diagonal) las velocidades registradas son inferiores a 1 cm h^{-1} ; por último, también es importante observar que para las tensiones de 100 y 150 mm las velocidades en tienden a ser menores a 0.5 mm h^{-1} .

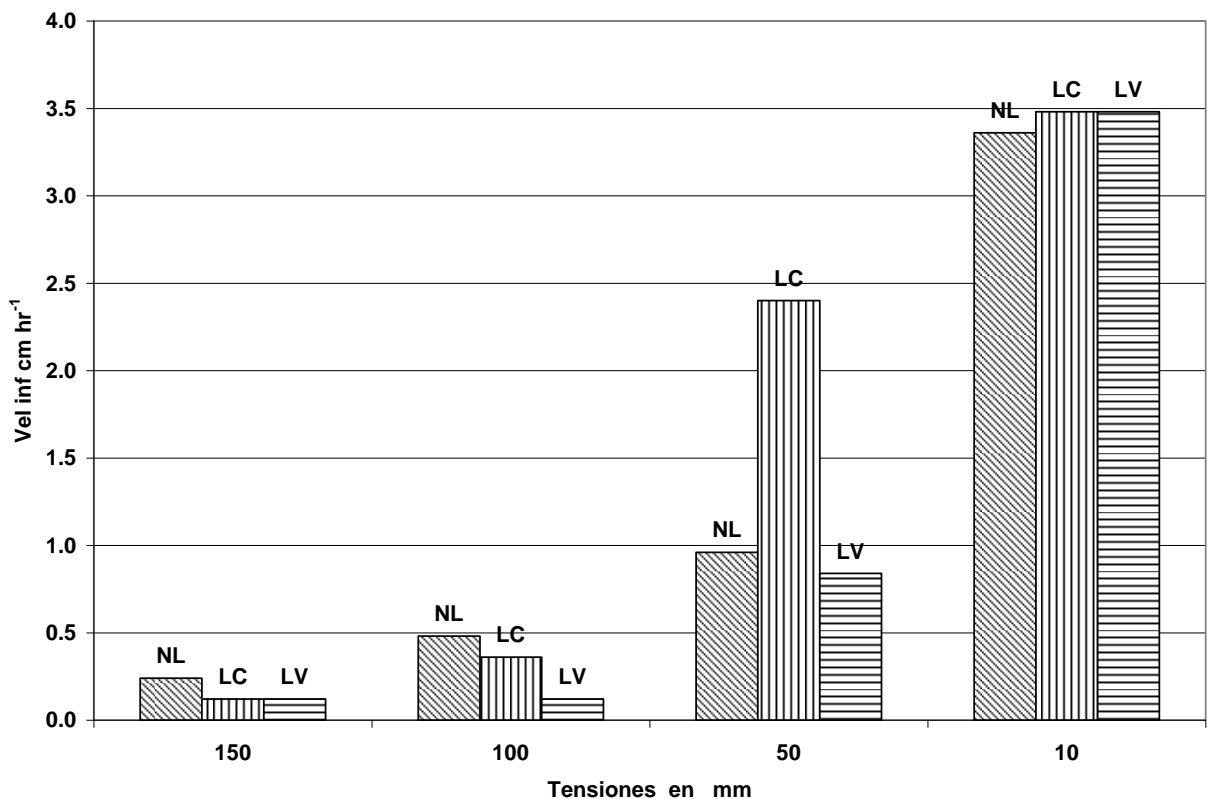


Figura 4.1. Velocidad de infiltración mínima promedio en cm hr^{-1} en la superficie a 4 tensiones.

4.1.2. Velocidad de infiltración mínima a 8 cm de profundidad

En la Figura 4.2. Se presenta la velocidad de infiltración mínima a 8 cm de profundidad, comparado con lo anterior se ve mayor la diferencia tomando en cuenta nuevamente la tensión de 10, de esta manera nos podemos dar cuenta en este caso en particular, que la tensión 10 sigue marcando la diferencia con respecto a las otras tensiones, ya que en esta se manejan cantidades mas elevadas como lo son 6.72 cm hr⁻¹ en comparación con las de LC con 3.36 hr⁻¹ al igual que las de LV de 4.08 hr⁻¹ cm/hr, que en realidad si tienen muy marcado las diferencias con las tensiones de 50, 100, y 150 en esta ultima es más evidente la diferencia ya que tiene valores que van des de 0.24 hr⁻¹ como es el caso de NL, y LC y LV muestran un comportamiento semejante como se muestra en la siguiente grafica.

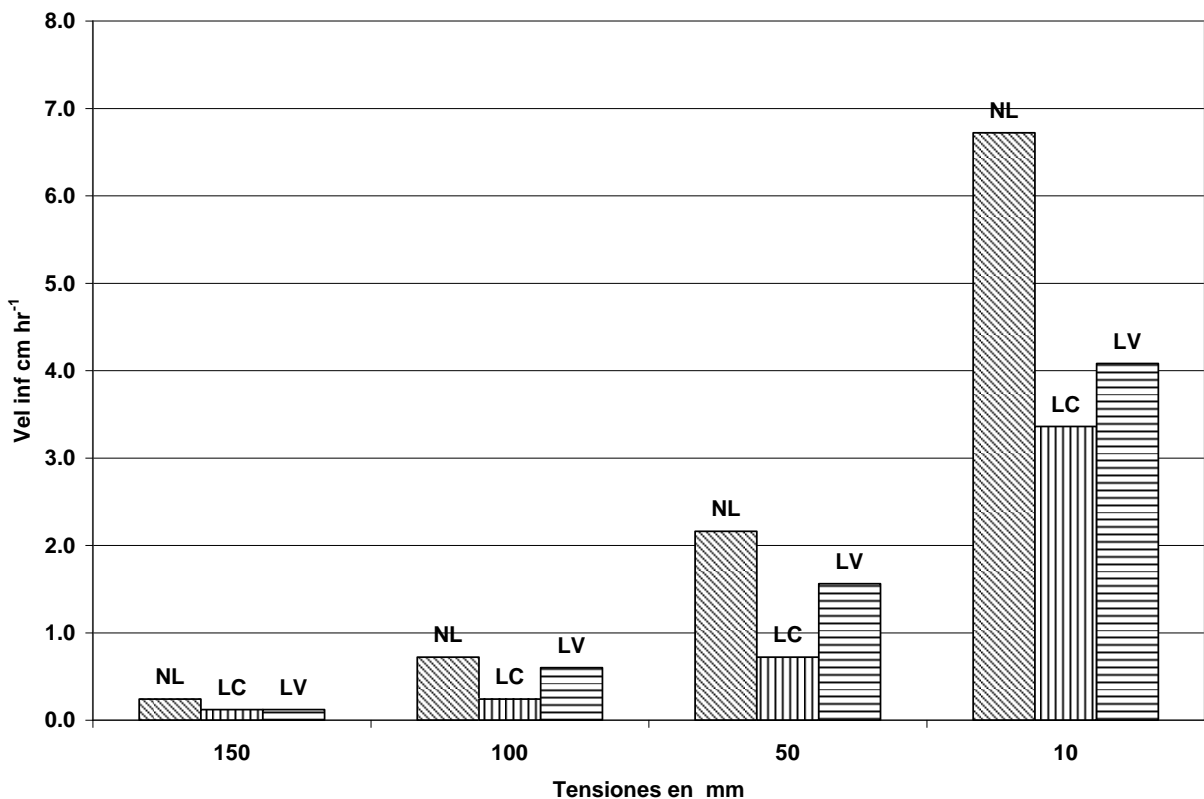


Figura 4.2. Velocidad de infiltración mínima promedio en cm hr⁻¹ a 4 tensiones a 8 cm de profundidad.

4.1.3. Velocidad de infiltración máxima en la superficie

Dadas las condiciones en la cuales se encontró el terreno y con las distintas formas de labranza que se utilizaron, las diferencias son muy marcadas en los suelos en las cuales se trabajo, una de las más significativas fueron las que se mencionan en este apartado, tomando en cuenta la velocidad de infiltración podemos observar que en las tensiones de 150 en la NL tiene cantidades que van desde 1.68 hr^{-1} hasta 1.20 hr^{-1} en LV, a diferencia con las LC que tiene 0.48 hr^{-1} , a diferencia de las tensiones de 100 que tiene rangos que van de 1.44 hr^{-1} NL, pasando en LC con 0.72 hr^{-1} y en LV con 0.60 hr^{-1} son las que tienen mas semejanza entre ellas como se muestra en la Figura 4.3 que se muestra continuación.

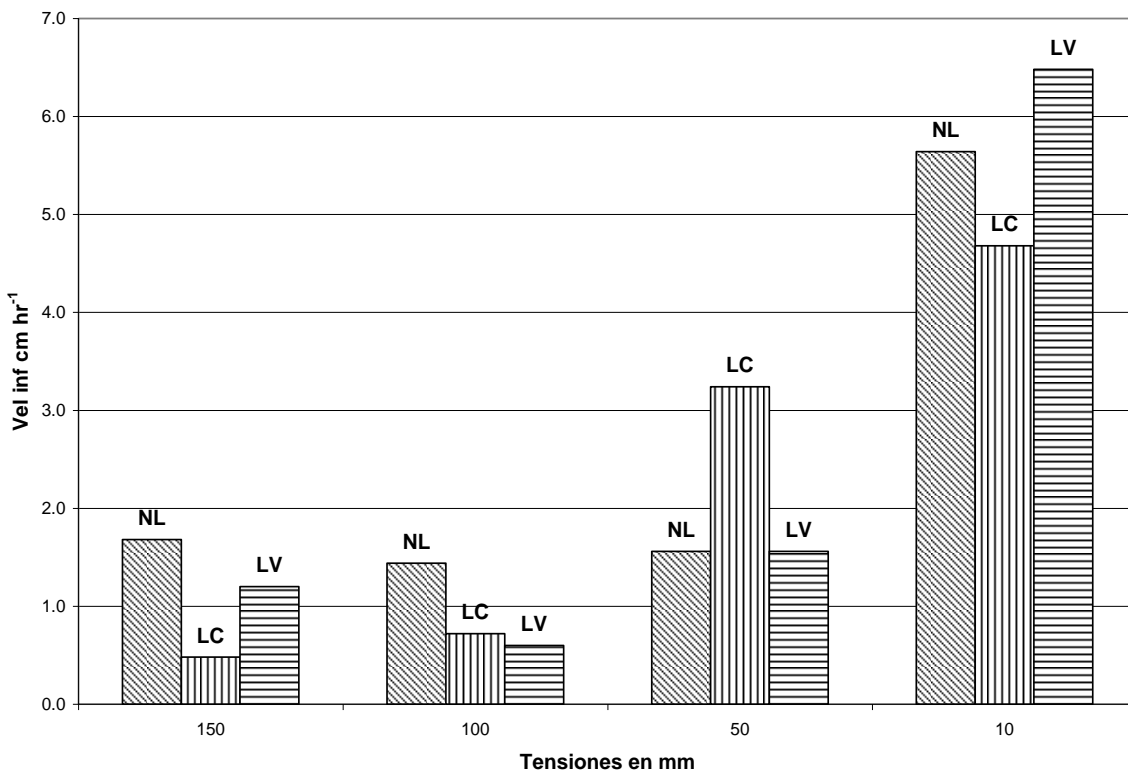


Figura 4.3 Velocidad de infiltración máxima promedio en cm hr^{-1} en la superficie a 4 tensiones.

4.1.4. Velocidad de infiltración máxima a 8 cm de profundidad

Por otra parte sin dejar de mencionar que en todas las anteriores la tensión de 10 siempre ha sido la que mayor velocidad a tenido, en este caso se muestran una gran diferencia en comparación con las Figuras anteriores, considerando que en todas las tensiones la que sale a relucir en todos los casos es la NL por las condiciones que el suelo presentó, en este caso en particular va desde 10.32 hr^{-1} en la tensión de 10 pasando por la tensión de 50 que presenta 3.36 hr^{-1} y la de 100 tiene 1.80 hr^{-1} hasta llegar a la de 150 que presenta 0.84 hr^{-1} como se muestra en la figura 4.4 continuación.

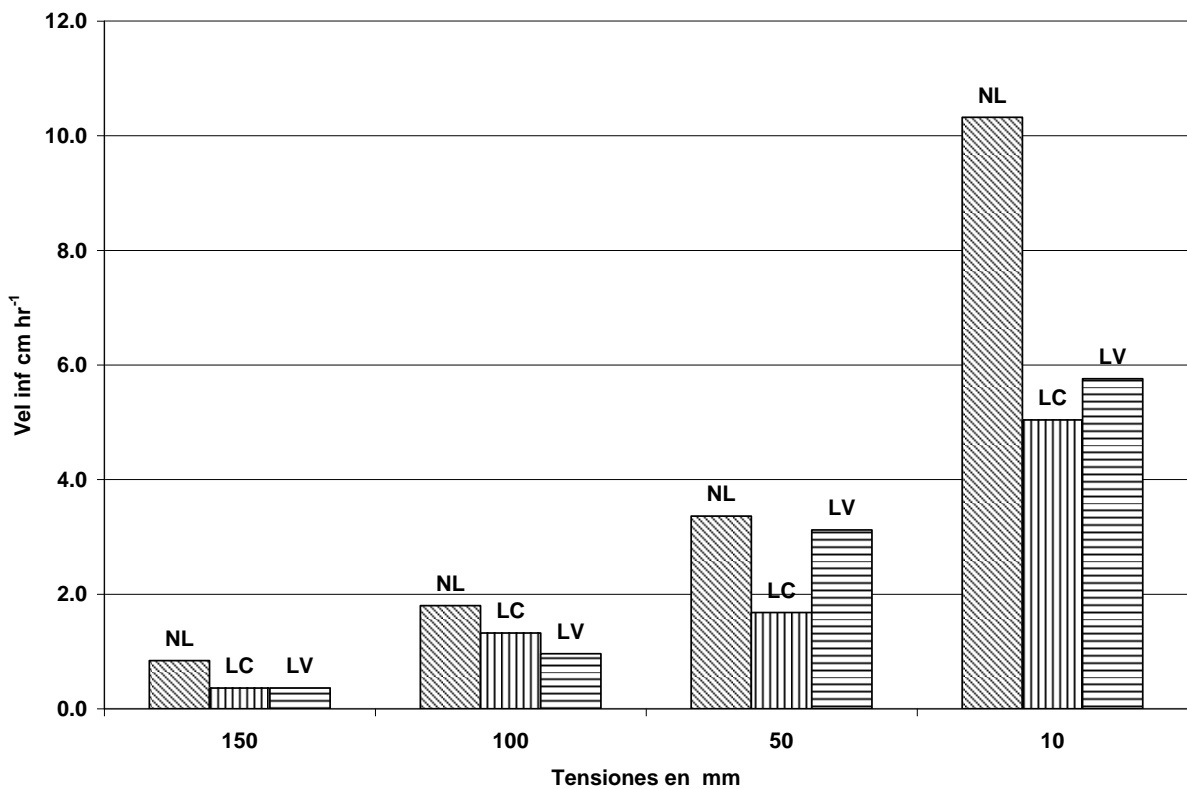


Figura 4.4. Velocidad de infiltración máxima promedio en cm hr^{-1} a 4 tensiones a 8 cm de profundidad

4.2. Análisis estadístico

4.2.1. Velocidad mínima y máxima en la superficie ($K\theta_{min0}$ y $K\theta_{max0}$)

De la plantilla de Excel donde se generaron las variables que describen el comportamiento hidrodinámico bajo las tres condiciones de manejo de suelo, se extrajeron 18 valores tanto para $K\theta_{min0}$ como para $K\theta_{max0}$. Los 36 valores así obtenidos, por no cumplir el requisito de normalidad para ambas variables, fueron convertidos a la forma $x^{1/2}$, y una vez cubierto este requisito, fueron sometidos a un procedimiento de análisis de varianza (ANOVA) y a una Prueba de Rango Estudentizado de Tukey (HDS), con un nivel de significancia del 90 % (Alfa=0.1), para lo cual se establecieron como fuentes de variación al sistema de labranza empleado (NL, LC y LV) y cuatro niveles de tensión (150, 100, 50 y 10), y como variables de respuesta $K\theta_{min0}$, $K\theta_{max0}$, $K\theta_{min8}$ y K_{max8} .

Como puede verse en los Cuadros 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 los resultados del ANOVA en SAS indican diferencias altamente significativas (**) para $K\theta_{min0}$, $K\theta_{max0}$, $K\theta_{min8}$ y K_{max8} con valores de R^2 de 0.68, 0.71, 0.88 y 0.86 respectivamente.

Cuadro 4.1. ANOVA para la variable $K\theta_{min0}$

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	13	67.72883611	5.20991047	3.70	0.0034
Error	22	30.99086111	1.40867551		
Total correcto	35	98.71969722			

Cuadro 4.2. ANOVA para la variable $K\theta_{max0}$

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	13	150.0012000	11.5385538	4.19	0.0016
Error	22	60.5664000	2.7530182		
Total correcto	35	210.5676000			

Cuadro 4.3. ANOVA para la variable $K\theta_{min8}$

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	13	139.9176000	10.7628923	13.57	<.0001
Error	22	17.4456000	0.7929818		
Total correcto	35	157.3632000			

Cuadro 4.4. ANOVA para la variable $K\theta_{max8}$

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	13	283.5756000	21.8135077	10.56	<.0001
Error	22	45.4464000	2.0657455		
Total correcto	35	329.0220000			

Sin embargo, los resultados anteriores, si bien indican que al menos una de las fuentes de variación tiene efectos altamente significativos sobre las variables de respuesta, no define si fue para el sistema de labranza o para el nivel de tensión.

Para aclarar esto, se agregan los Cuadros 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 con los resultados del ANOVA para las variables independientes del modelo definido ($K\theta_{min0}$ ó $K\theta_{max0}$ ó $K\theta_{min8}$ ó $K\theta_{max8}$ = Sistema de Labranza Repetición Tensión Sist lab*Tensión). Este procedimiento permite identificar la intensidad con la que las variables de respuesta son afectadas por fuente de variación y la interacción ahí indicada.

Cuadro 4.5. ANOVA para $K_{\theta\min 0}$ en función de las fuentes de variación

Fuente	DF	ANOVA SS	Cuadrado de la media	F-valor	Pr > F
Sist. Lab.	2	1.43620556	0.71810278	0.51	0.6076
Tensión	3	62.91720833	20.97240278	14.89	<.0001**
Sist. Lab.•Tensión	6	2.82541667	0.47090278	0.33	0.9114

Cuadro 4.6. ANOVA para $K_{\theta\max 0}$ en función de las fuentes de variación

Fuente	DF	ANOVA SS	Cuadrado de la media	F-valor	Pr > F
Sist. Lab.	2	0.4104000	0.2052000	0.07	0.9284
Tensión	3	136.4076000	45.4692000	16.52	<.0001
Sist. Lab.•Tensión	6	11.5416000	1.9236000	0.70	0.6535

Cuadro 4.7. ANOVA para $K_{\theta\min 8}$ en función de las fuentes de variación

Fuente	DF	ANOVA SS	Cuadrado de la media	F-valor	Pr > F
Sist. Lab.	2	11.2392000	5.6196000	7.09	0.0042
Tensión	3	116.3808000	38.7936000	48.92	<.0001
Sist. Lab.•Tensión	6	11.0808000	1.8468000	2.33	0.0682

Cuadro 4.8. ANOVA para $K_{\theta\max 8}$ en función de las fuentes de variación

Fuente	DF	ANOVA SS	Cuadrado de la media	F-valor	Pr > F
Sist. Lab.	2	25.8552000	12.9276000	6.26	0.0071
Tensión	3	226.8684000	75.6228000	36.61	<.0001
Sist. Lab.•Tensión	6	29.8152000	4.9692000	2.41	0.0612

Los resultados anteriores permiten establecer que la tensión tiene un efecto altamente significativo para las cuatro variables de respuesta. También que la velocidad de infiltración máxima y mínima en la superficie, para los sistemas labranza, estadísticamente son iguales. Pero, a 8 cm de profundidad el comportamiento estadísticamente es diferente, según se puede ver en los Cuadros 4.7 y 4.8 en virtud de que el sistema de labranza tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta, incluso para la interacción (Sist lab x Tensión) significativa (*) debido a que el valor de la probabilidad (0.0682 y 0.0612) es mayor al valor de F estimado (2.33 y 2.41).

En la HDS (rango estudentizado de Tukey) se confirma lo anterior para ambas variables de respuesta, según se puede ver en los Cuadros 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12, mediante el agrupamiento donde establece que medias con la misma letra no son significativamente diferentes, y sus parámetros de entrada son los siguientes:

Para $K_{\theta min 0}$:

Alfa	0.05
Error de grados de libertad	6
Error de cuadrado medio	0.068298
Número de medias	2 3
Rango crítico	0.2611 0.2706

Cuadro 4.9. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labranza para $K_{\theta min 0}$

Tukey Agrupamiento	Media	Número de observaciones	Sist. lab.
A	0.9946	12	LC
A	0.9875	12	NL
A	0.7789	12	LV

Para $K_{\theta \max 0}$:

Alfa	0.05	
Error de grados de libertad	6	
Error de cuadrado medio	0.171279	
Número de medias	2	3
Rango crítico	0.4134	0.4285

Cuadro 4.10. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labraza para $K_{\theta \max 0}$

Tukey Agrupamiento	Media	Número de observaciones	Sist. lab.
A	1.4122	12	LV
A	1.3533	12	NL
A	1.3124	12	LC

Para $K_{\theta \min 8}$

Alfa	0.05	
Error de grados de libertad	6	
Error de cuadrado medio	0.088315	
Número de medias	2	3
Rango crítico	.2969	.3077

Cuadro 4.11. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labraza para $K_{\theta \min 8}$

Tukey Agrupamiento	Media	Número de observaciones	Sist. lab.
A	1.2764	12	NL
B A	1.0562	12	LV
B	0.8076	12	LC

Para $K\theta_{max8}$:

Alfa	0.05		
		Error de grados de libertad	6
		Error de cuadrado medio	0.168051
		Número de medias	2 3
		Rango crítico	.4095 .4244

Cuadro 4.12. Agrupamiento de Tukey en función del sistema de labraza para $K\theta_{max8}$

Tukey Agrupamiento	Media	Número de observaciones	Sist. lab.
A	1.7075	12	NL
B A	1.3683	12	LV
B	1.2754	12	LC

Los resultados observados en los Cuadros 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 permiten establecer que la labranza, efectivamente modifica el comportamiento hidrodinámico del suelo a la profundidad de 8 cm, la cual, que se expresa por la disminución en la velocidad desde NL a LV y LC.

Las diferencias aritméticas indican que para $K\theta_{min8}$ hay un cambio negativo en la velocidad de infiltración de 17 y 37 % para LV y LC, respectivamente; mientras que para $K\theta_{max8}$ la magnitud de los cambios son de 20 y 25 %, también para LV y LC, respectivamente. Aunque, también hay que decir que estadísticamente no es significativa para la primera, pero para la segunda es altamente significativa.

4.2.3. Clasificación de la conductividad hidráulica

Tomando como base las 5 clases propuestas por Aguilera (1996) para las velocidades de infiltración mostradas anteriormente (cuadro 4.13); para este caso, las magnitudes estimadas, tanto para las velocidades máximas y mínimas, se encuentran en el rango de moderadas, aunque dichas magnitudes solo muestran diferencias altamente significativas para LC a 8 cm de profundidad como puede verse en el Cuadro 4.13.

Cuadro 4.13. Velocidad de infiltración promedio para los tres sistemas de labranza.

Sist. Lab.	-----Velocidad media cm hr ⁻¹ -----			
	Max	Min	Max	Min
NL	1.83a	0.98a	2.92a	1.63a
LV	1.99a	0.99a	1.37ab	1.12ab
LC	1.72a	0.61a	1.63b	0.65b

V. CONCLUSIÓN

Si bien la búsqueda de la relación que hay entre el flujo hidrodinámico del agua en el suelo mediante la utilización de infiltrómetros de discos en campo es una técnica muy utilizada, nos podemos dar cuenta que en este trabajo fue de una gran importancia por que gracias a este método nos pudimos dar cuenta que el flujo del agua a través de los espacios porosos en distintas condiciones de la labranza es diferente gracias al estado del suelo después de las distintas labranzas utilizadas. De esta manera nos podemos dar cuenta con facilidad que es un método muy confiable. Tomando en cuenta que estos resultados obtenidos en los suelos del rancho los Ángeles permitió describir el movimiento del agua bajo condiciones de no saturación a nivel de superficie y a profundidad de 8 cm. Como se pudo observar en el tratamiento al cual denominamos NL fue el que más diferencia en cuanto a velocidad de infiltración presentó por lo tanto en los tratamientos LC, LV presentaron comportamientos un poco mas similares en comparación del de NL. Los resultados anteriores permiten establecer que la tensión tiene un efecto altamente significativo para las cuatro variables de respuesta. También que la velocidad de infiltración máxima y mínima en la superficie, para los sistemas labranza, estadísticamente son iguales. Pero, a 8 cm de profundidad el comportamiento estadísticamente es diferente.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Aguilera, C.M., Martínez, E.R. 1996. Relación agua suelo planta atmósfera. Ed. 1431.
- Angulo-Jaramillo, R., F. Morenco, B.E. Clothier, J.L. Thony, G. Vachaud, E. Fernandez-Boy, and J.A. Cayuela. 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measures using a tension disk infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:27-32.
- Ankeny, M.D., T.C. Kaspar, and R. Horton. 1988. Design for an automated tension infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:893-896.
- Ankeny, M.D., T.C. Kaspar, and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:467-470.
- Aoki, A.M., y O. Sereno. 1999. Modificaciones de un microsimulador de lluvia.
- Arctic Climate Impact Assessment. 2004. Impacts of a Warming Arctic. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Also quoted in Time Magazine, Vicious Cycles, Missy Adams, March 26, 2006.
- Aspectos ambientales para el ordenamiento territorial del occidente del departamento del Caquetá. Bogotá : INPA-IGAC, 1993.
- Baird, A.J. 1997. Field estimation of macropore functioning and surface hydraulic conductivity in a fen peat. Hydrological Processes 11:287-295.
- Barshad, I. 1955. Soil development, págs. 1-52. En F. E. Bear (dir.), Chemistry of the soil, 1ª. ed. Reinhold, Nueva York.

BAVER, L., GARDNER, W.R.1973. Física de suelos. 1ª. Ed. en español, Ediciones UTEHA. México. 525 p.

Bellón, M.R., O.R. Maser y G. Segura 1993. Response options for sequestering carbon in Mexican forests. Reporte al F-7 International Network on tropical Forestry and Global Climatic Change, Energy and Environment Division, Lawrence-Berkeley Laboratory, Environmental Protection Agency, Berkeley.

Beven, K., and P. German. 1982. Macropores and water flow in soils. Water Resour. Res. 18:1311-1325.

Bjerklie, D. 2006. Feeling the Heat. Time Magazine.

Bouma, J., Jongerius, A. y Schoonderbeek, D. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay using micromorphometric data. Soil Sci. Soc. Am J. Vol. 43, 1979, pp 261 – 264.

Bruand, A. Contribution a l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de retention d'eau. Sci. Sol. Vol. 24, 1986, pp. 351 – 362.

Bulck, P. y Mc Keague, J.A. Estimating air-water properties of a clay soil. Comptes rendus du colloque fonctionnement hydrique et comportement des sols. Dijon, del 22 al 25 de mayo, AFES, 1984, pp. 55 – 67.

Buol, S. W. 1964. Calculated actual and potential evapotranspiration in Arizona. Univ. Ariz. Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. 162.

Buol, S. W. 1965. Present soil-forming factors and processes in arid and semiarid regions. Soil Sci. 99:45-49.

Buol, S. W. y M. S. Yesilsoy. 1964. A genesis study of a Mohave sandy loam profile Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28:254-56.

Campbell, C.A., S.A. Brandt, V.O. Biederbeck, R.P. Zentner, and M. Schnitzer. 1992. Effect of crop rotations and rotation phase on characteristics of soil organic matter in a Dark Brown Chernozemic soil. Can. J. Soil Sci. 72:403-416.

Campbell, C.A., V.O. Biederbeck, R.P. Zentner, and G.P. Lafond. 1991. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. Can. J. Soil Sci. 71:363-376.

- Carabias L., J. y F. Tudela A. 2000. "El cambio climático: una amenaza global". En: Primer Foro de Divulgación sobre Cambio Climático. SEMARNAP, México. Comisión Nacional para el uso de la Biodiversidad (Conabio) 2000. "La diversidad biológica en México: Estudio de País."
- Carter, M.R., and D.A. Rennie. 1982. Changes in soil quality under zero tillage farming systems: distribution of microbial biomass and mineralizable C and N potentials. *Can. J. Soil Sci.* 62:587-597.
- Chávez, R, E. 2004. El flujo permanente y la evolución del diseño de riego en huertos de nogal pecanero (*Carya illinoensis*, Koch) bajo sistemas de manejo diferente. Tesis, México.
- Chow, V.T., Maidment, D. R. y Mays, L.W. *Applied Hydrology*. Estados Unidos, 1988.
- Clothier, B.E., and I. White. 1981. Measurement of sorptivity and soil diffusivity in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 117:311-314.
- Collins, H.P., P.E. Rasmussen, and C.L. Douglas. 1992. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:783-788.
- Coughland, K.J., D. McGarry, R.J. Loch, B. Bridge, and G.D. Smith. 1991. The measurement of soil structure-some practical initiatives. *Aust. J. Soil Res.* 29:869-889.
- Curmi, P. Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Analyse de quelques cas concrets. *Sci. Sol.* Vol .26, num. 3, 1988, pp. 203 – 214.
- De Jong, B. H. J., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto, J. Taylor y R. Tipper 1995. "Community Forest Management and Carbon Sequestration: a Feasibility Study from Chiapas, Mexico" *Interciencia* 20(6): 409-416.
- Ela, S.D., S.C. Gupta, and W.J. Rawls. 1992. Macropore and surface seal interactions affecting water infiltration into soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:714-721.
- Elliot, E.T., I.C Burke, C.A. Monz, and S.D. Frey. 1994. Terrestrial carbon pools: preliminary data from the Corn Belt and Great Plains regions. p.179-191. *In* J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicsek, and B.A. Stewart (eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. Special Publication Number 35, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

- Elsenbeer, H.; (2001): Pedotransfer functions in hydrology. *J. Hydrology*, nº 251. pp. 121-122
- Fitzpatrick, E, A. 1996. Introducción a la ciencia de los suelos. 1° edición. México. Pp. 52.
- FORSYTHE, W. 1975. Física de suelos. Manual de laboratorio. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica. 212 p.
- Fuller, W. H., R. E. Cameron y N. Raica, Jr. 1960. Fixation of nitrogen in desert soil by algae. *Trans. 7th Intern. Congr. Soil Sci. (Madison, Wis.)* 2:617-24.
- Fundación Eroski. 1999. Calentamiento Global de la Tierra Bajo El Efecto Invernadero.
- GAVANDE SA. 1 972. Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. Ed. Limusa Wiley. p 199–232.
- German, P y Beven, K. Water flow in soil macropores. I. An experimental infiltration. *J. Soil Sci.* Vol. 32, 1981, pp. 1 – 13.
- González, C, G y I, Saches, C. 2004. Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnica de imagen de análisis de imagen. *Ingeniería Hidráulica de México.* Vol. XIX, No, 3. Pp. 15.
- Gonzalez, C.G. Fonctionnement hydrodynamique des sols de versant en amont de petits barrages en région semi-aride du Nord Mexique (Ranch Atotonilco). Tesis doctoral. Université d'Angers, Francia, 2002.
- Gupta, V.V.S.R., P.R. Grace, and M.M. Roper. 1994. Carbon and nitrogen mineralization as influenced by long term soil and crop residue management systems in Australia. p. 193-200. *In* J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, and A. Stewart (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment.* Special Publication Number 35, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- GUROVICH, L. 1985. Fundamentos y diseño de sistema de riego. Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura (CIIA). Primera Edición, San José, Costa Rica. Capítulo 6. p. 143-168.
- Hallaire, V. Description of microcrack orientation in a clayey soil using image analysis. Ringrose-Voase, A.J. y Humphreys, V.G.S. (editores), Elsevier, Amsterdam, 1997.
- Henin, .S. 1955. Synthesis of clay minerals at low temperatures, págs. 54-60. En Ada Swineford (dir.), *Clay and clay minerals.* Proc. 4th Natl. Conf. Natl. Acad. Sci. Natl. Res. Council, Washington, 1956.

Hidráulica

- Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. 771 p. Academic Press, New York, USA.
- Hseung, Y. y M. L. Jackson. 1952. Mineral composition of the clay fraction. III. Some main soil groups of china. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 16:294-97.
<http://club.telepolis.com/geografo/clima/calentam.htm>
- I.G.A.C. Manual de métodos analíticos de laboratorio de suelos. Subdirección agrológica. Bogotá : IGAC, 1990.
- Investigación Agrícola (Chile), 19 (1-2): 47-51.
- IVERSEN, B., MOLDRUP, P., SCHJONNING, P., LOLL, P. 2001. Air and water permeability in differently textured soil at two measurement scales. Soil Science 166, (10): 643 - 659.
- Jackson, M. L., S. A. Tyler, A. L. Willis, G. A. Bourbeau y R. P. Pennington. 1948. Weathering sequence in clay-size minerals in soil and sediments. I. Fundamental generalizations. J. Phys. Colloid Chem. 52:1237-60.
- Jarvis, N.J., and I. Messing. 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. Soil Sci. Soc. Am. J. 59:27-34.
- Jarvis, N.J., P.B. Leeds-Harrison, and J.M. Dosser. 1987. The use of tension infiltrometers to assess routes and rates of infiltration in a clay soil. J. Soil Sci. 38:633-640.
- JENKINSON, D.S. La materia orgánica del suelo: evolución. En: WILD, A. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Madrid : Mundi-Prensa, 1992.
- Lin, H.S., K.J. McInnes, L.P. Wilding, and C.T. Hallmark. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil. Trans. ASAE 39:131-133.
- Loa L. E., M. Cervantes A., L. Durand S. y A. Peña J. 1996. "Uso de la biodiversidad". En: Conabio. La biodiversidad biológica de México. Estudio de país. Conabio, México. pp. 104-153.
- Lopez Santos. 2008. Impacto de la labranza en el flujo energético de un suelo arcilloso terra latinoamericana en prensa.

- Logsdon, S. D., y D.B. Jaynes. 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil. Soil Sci. Soc. Am. J* 57: 1426-
- Martin, W. P. y J. E. Fletcher. 1943. Vertical zonation of great soil groups on Mt. Graham, Arizona, as correlated white climate, vegetation and profile characteristics. *Univ. Ariz. Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 99
- Masera, O. 1995. "México y el cambio climático global: El papel de la eficiencia energética y alternativas de manejo forestal en la reducción de emisiones de bióxido de carbono". En: Juan J. Jardón (ed.). *Energía y medio ambiente: Una perspectiva económico-social*. Plaza y Valdés Editores, México, pp 157-177.
- Masera, O., M.R. Bellón y G. Segura 1997. "Forestry Options for Secquestering Carbon in Mexico: Comparative Economic Analysis of Three Case Studies" *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.
- Merwe, C. R. van der. 1954. The soils of the desert and arid regions of South Africa. *Proc. 2nd Interafrican Soils Conf. (Leopoldville)* 2:827-34.
- Mohanty, B.P., Ankeny, M.D., Horton, R. y Kanwar, R.S.; (1994): Spatial variability of hydraulic conductivity measured by disc infiltrometer. *Water Resources Research*, n° 30. pp. 237-251
- Mora Delgado, J. R. 2007. La actividad microbiana: un indicador integral de calidad del suelo. LUNAZUL. Revisado (31/01/08) en http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=com_content&task=view&id=223&Itemid=223.
- Narro Farías, Eduardo. 1994. *Física de Suelos con enfoque agrícola*. Primera edición, enero 1994, México, editorial trillas: UAAAN.
- Nettleton, W. D., K. W. Flach y G. Borst. 1968. A toposequence of soils in tonalite grus in the southern California peninsular range. *Soil Surv. Invest. Rept.* 21. Soil Conserv. Serv., U. S. Dept. Agr.
- Nikiforoff, C. C. 1937. General trends of desert type of soil formation. *Soil Sci.* 43:105-31.
- Omay, A.B., C.W. Rice, L.D. Maddux, and W.B. Gordon. 1997. Changes in soil microbial and chemical properties under long-term crop rotation and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1672-1678. I.G.A.C.
- Perroux, K.M., and I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Am. J.* 52:1205-1215.

- PLA SENTIS I. 1 994. Curso sobre efectos de la labranza en las propiedades físicas de los suelos. Instituto de Suelos. C.I.R.N. INTA Castelar. Capítulo II, Labranzas y Propiedades Físicas de los Suelos. pp 20.
- Poy, S. L. (2006). México, principal emisor de dióxido de carbono en América Latina y el Caribe del periódico La Jornada de México. Revista Cultura Científica y Tecnológica. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, (3), 16-16.
- Quiñones, V. J. J. 2007. Calentamiento Global y Pastizales. Biodiversa 2007. Memorias de presentaciones. ITESM-Campus Laguna. 24 p.
- Rozanov, A. N. 1951. The Serozems of central Asia. (Traducido por A. Gourevich.) Israel Prog. for Sci. Trans., Jerusalem, 1961. Disponible en U. S. Dept. Commerce, Washington.
- Ruiz Estevez, F. Venialgo, Crispín A. Gutiérrez Noemí, C. Ingaramo, O. Briend, Maria C. 2004. Infiltración de agua en el suelo con diferentes usos en el Departamento 9 de Julio (Chaco). UNNE. Revisado (19/02/08) en <http://www.inta.gov.ar/lasbrenas/info/documentos/rn/A-070.pdf>
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) 1994. Inventario Nacional Forestal de Gran Visión. Subsecretaría Forestal y de la Fauna Silvestre. Documento Interno. 145 pp.
- Shantz, H. L. 1956. History and problems of arid lands development, pags. 3-5. En G. F. White (dir.), the future of arid lands. Am. Assoc. Adv. Sci. 43
- Smettem, K.R.J., and B.E. Clothier. 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. J. Soil Sci. 40:563-568.
- Smettem, K.R.J., J.Y. Parlange, P.J. Ross, and R. Haverkamp. 1995. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 3. Parameter estimation using a double-disk tension infiltrometer. Water Resour. Res. 31:2491-2495.
- Smith, B. R. y S. W. Buol. 1968. Génesis and relative weathering intensity studies in three semiarid soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 32:261-65
- Smith, G. D. 1965. Lectures on soil classifications. Pedologie Special Issue 4. Belgian Soil Sci. Soc. Rozier 6, Gante, Belgica.
- Springer, M. E. 1958. Desert pavement and vesicular layer of some soil of the desert of the Lahontan basin, Nevada. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 22:63-66.

- Taboada Castro, M.M., M. Lado Liñares, A. Diéguez Villar, y A. Paz González. 1998. Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela. p. 101-127. *In* A. Paz González y M.T. Taboada Castro (eds.) Jornadas Internacionales Sobre Erosión Hídrica, La Coruña, España. 11-13 de junio de 1998.
- Tedrow, J. C. F. 1966. Polar desert soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:381-87.
- Trexter, M.C. y C. Haugen 1995. Keeping it green: tropical Forestry opportunities for mitigating climate change. WRI, EPA. 52 pp.
UACH Chapingo, Méx.
- VÉLEZ, M., VÉLEZ., J. 2002. Capítulo 8: Infiltración. Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Hidráulica.
- Villa, S. A. 1981. Los desiertos de Mexico. In: General Technical Report WO-28 Arid Land Resource Inventories: Developing Cost-Efficient Methods. An International Workshop 30-November 6, 1980. La Paz, Mexico (pag 18-20)
- Watson, K.W., and R.J. Luxmoore. 1986. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:578-582.
- White, I., and M.J. Sully. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.* 23:1514-1522.
- WILLIAM, A., GARDNER, W.J., GARDNER, W.H. 1991. *Soil Physics*. John Wiley and Sons. 5th ed. New York. 250 p.
- Wilson, G.V., and R.J. Luxmoore. 1988. Infiltration, macroporosity and mesoporosity distributions on two forested watersheds. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:329-335.

Paginas Web Consultadas.

- Aversano, N. Temperine, T. 2006. El Calentamiento Global: Bonos de Carbono, una alternativa. Revisado (17/01/08), en http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/bonos_de_carbono
- Colombani, Érica N. 2004. Evaluación de propiedades físicas de suelos del sudeste bonaerense bajo distintos manejos. INTA. Revisado (19/02/08) en <http://www.inta.gov.ar/balcarce/actividad/capacita/agron2006/material%20propio/Colombani.pdf>
- Kellogg, C. E. 1953. Potentialities and problems of arid soils. Desert Research, Proc. Intern. Symp., 1952. Israel Research Council, Jerusalén, págs. 19-40. La energía y el cambio climático mundial. El ciclo del carbono. SEED. Revisado (22/01/08) en http://www.seed.slb.com/es/scictr/watch/climate_change/carbon.htm
- Nissen M, J. Quiroz S, C. Seguel S, O. Mac Donald H, R. y Ellies Sch, A. (In Memoriam). 2005. Variación del potencial matricio durante el movimiento de agua en andisoles. UACH. Revisado (04/02/08) en http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-88022005000100005&lng=es&nrm=is.&lng=esNo. 27 noviembre1999. http://revista.consumer.es/web/es/19991101/medioambiente/.Accessed 15 agosto 2007.
- Protocolo de Kioto Sobre el Cambio Climatico. 2002. Europa.eu. Revisado (18/01/08) en <http://europa.eu/scadplus/leg/es/lvb/l28060.htm>
- Ruiz, M, F. A. 2005. El movimiento del agua en condiciones de flujo transitorio en huertos del nogal pecanero. Tesis, México.
- Torres Rojo, J. M. Guevara Sangines, A. 2005. El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. INE-SEMARNAT. Revisado (18/01/08) en http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetitas/63/cap3.html?id_pub=361&id
- Zagal, E. Rodríguez, N. Vidal, I. Quezada, L. 2002. Actividad microbiana en un suelo de origen volcánico bajo distinto manejo agronómico. INIA, Revisado (28/01/08) en <http://www.bioline.org.br/request?at02029>