

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

**“Trabajo final para optar al Grado de Ingeniero
Agrónomo”**

**PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE UN HAPLUDOL
TÍPICO BAJO DOS SISTEMAS DE MANEJO**

**Alumno: Alejandro Diez
DNI 27674170**

**Director: Ing. Agr. MSc Estela Bricchi
Co-Director: Ing. Agr. MSc Eugenio Hampp**

**Río Cuarto – Córdoba
Septiembre/2006**

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación, importancia del trabajo y antecedentes	1
1.2. Hipótesis y objetivos	3
1.2.1. Hipótesis	3
1.2.2. Objetivos	4

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS	5
2.1. Caracterización del área de estudio	5
2.2. Determinaciones realizadas	5
2.3. Desarrollo de los métodos de cálculo	7
2.3.1 Parámetros comunes a ambos tipos de flujo	7
2.3.1.1 Infiltración parcial (I_p)	7
2.3.1.2. Infiltración acumulada (I_a)	7
2.3.1.3. Velocidad de infiltración (V_i)	7
2.3.2. Parámetros exclusivos de flujo saturado	7
2.3.2.1. Conductividad hidráulica saturada (K_s)	7
2.3.3. Parámetros exclusivos de flujo no saturado	7
2.3.3.1. Conductividad hidráulica no saturada (K_h)	7
2.3.4. Otros parámetros	9
2.3.4.1. Radio de poros	9
2.3.4.2. Distribución de la porosidad	9
2.3.4.2. Porcentaje de flujo total según tamaño de poro	10
2.4. Análisis estadístico	10

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
3.1. Conductividad hidráulica	11
3.2. Distribución de poros por tamaño y contribución al flujo de agua	15

CAPÍTULO 4	
CONCLUSIONES	17
BIBLIOGRAFÍA	18
ANEXO	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema del permeámetro de disco	6
Figura 2.2. Relación entre carga hidráulica y conductividad hidráulica	8
Figura 3.1. Conductividad hidráulica según tensión de aplicación en el permeámetro de disco	11
Figura 3.2. Conductividad hidráulica saturada en función de la densidad aparente del suelo	14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Conductividad hidráulica a 0, 2 y 5 cm de columna de agua (K_s , K_2 y K_5)	12
Tabla 3.2. Densidad aparente (DAP, g cm^{-3}) y porosidad total (PT, %) en las diferentes situaciones de uso	14
Tabla 3.3. Número de poros por m^2 (N) y porcentaje del flujo total de agua (Flujo) para cada rango de radio de poros (r).	15

RESUMEN

Los diferentes sistemas de manejo de la tierra afectan y alteran las propiedades físicas del suelo y frente a ello se planteó analizar las propiedades hidráulicas, mediante permeámetro de disco, como indicadores de calidad en un Hapludol típico del centro sur de Córdoba. Se plantearon tres situaciones de manejo: mínima alteración (MA), ganadero agrícola (GA) y agrícola (A); y en las mismas se analizaron la conductividad hidráulica saturada (K_s) e insaturada (K_h) a las tensiones de aplicación de 2 y 5 cm, distribución de poros mayores a 750 micras y entre 300 y 750 micras de radio y porcentaje del flujo total de agua en que contribuyen los diferentes tamaños de poros. Los máximos valores de K_s y K_h a la tensión de 2 cm se observaron en MA, no presentándose diferencias entre A y GA. Este hecho puede explicarse debido a un mayor número de poros mayores a 750 micras en MA que en A y GA, ya que en todas las situaciones estos poros son los que conducen el mayor porcentaje de flujo en relación a poros más pequeños. No se observaron diferencias entre sistemas de manejo para K_h a la tensión de 5 cm ya que a esta tensión los poros que conducen agua dependen más de la textura que de la estructura y la misma es igual en todos los sistemas de uso. Los parámetros elegidos en este estudio demostraron ser buenos indicadores de la condición física del suelo, y el permeámetro de disco se presenta como una herramienta confiable y precisa para estas mediciones en este tipo de suelos.

Palabras clave: Permeámetro de disco, conductividad hidráulica, tamaño de poros, propiedades hidráulicas, flujo de agua.

SUMMARY

Different land managements alter soil physical properties and that's why were chosen hydraulic properties, characterized by disc permeameter, as quality indicators in an Hapludol típico in center south of Córdoba province. The study was carried out in three management situations: non alter (MA), crop and cattle (GA) and crop uses (A); and were analyzed hydraulic conductivity (saturated (K_s) and unsaturated (K_h)) using 2 cm and 5cm of water head pressure, pores distribution and percent of flow for any pore diameter. The higher values of K_s and K_h were observed in MA, not existing differences between A and GA. These differences could be explained because of the bigger number of macropores in MA, because this pores are more important in total water flow than many micropores. Parameters chosen in this study looked to be good soil physical condition indicators, and disc permeameter is a good tool for these measurements in this type of soil.

Key words: disc permeameter, hydraulic conductivity, pore size, hydraulic properties, water flow.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación, importancia del trabajo y antecedentes

Uno de los problemas que enfrenta la agricultura actual es la degradación paulatina del recurso suelo (Crovetto, 1992).

Se estima que más del 40 % del territorio argentino está afectado por procesos de degradación de sus tierras, entre los que se destacan la afectación de las propiedades físicas y químicas naturales de los suelos (SAGyP y CFA, 1995; Zuccardi *et al.*, 1988). En varios sectores de la Llanura Pampeana y de la Chacopampeana se ha observado la degradación de los suelos y la consecuente disminución de productividad (Casas, 1997; García *et al.* 1996), relacionada a las actividades agropecuarias y en gran parte a las agrícolas que reemplazaron un ecosistema con cierto grado de complejidad por otro generalmente más simplificado y de mayor productividad. Las acciones llevadas a cabo en el reemplazo no se adaptaron a las condiciones de equilibrio de los recursos naturales y los cambios producidos generaron un nuevo sistema muchas veces con impacto negativo o de deterioro sobre el ambiente (FAO, 1993; SAGyP y CFA, 1995; García *et al.*, 1996).

En el ambiente natural al que pertenece la Llanura bien drenada del centro sur de la provincia de Córdoba los suelos poseen predominancia de partículas esqueléticas (arenas muy finas y limos) bajo contenido de arcilla y de materia orgánica (Hapludoles/ustoles típicos) (Cantero *et al.*, 1986; Bricchi, 1996).

En la región de referencia, aproximadamente en el año 1890 se iniciaron las actividades agropecuarias. Con las mismas comenzó también la mineralización acelerada de los compuestos orgánicos del suelo, sin la adecuada reposición, produciéndose pérdidas que oscilan entre 66 y 80 % (Bricchi, 1996; Moreno *et al.*, 1996; Bricchi *et al.*, 2004). A su vez, esta pérdida se asocia a una modificación de las fracciones que componen dichos compuestos orgánicos, observándose que los más afectados son los más gruesos (Verri, 2004) que se encuentran ligados a los granos esqueléticos del suelo (Moreno *et al.*, 1996).

Los cambios de relación esqueleto/plasma orgánico llevaron a la desagregación de las partículas con las consecuentes modificaciones de las propiedades morfológicas y físicas del perfil cultural de los suelos hacia un nuevo estado de equilibrio.

En esta nueva situación y en cuanto a la estructura, se observa, en superficie, desagregación de partículas esqueléticas y reacomodamiento en formas platiforme o bloques aplanados rodeados de tierra fina (Bricchi, 1996) con un elevado dinamismo a través del año

o el ciclo del cultivo. Esto se manifiesta en un incremento de la densidad aparente del orden del 18% entre la siembra y pos cosecha (Bricchi *et al.*, 1996) como así también en superficies selladas con valores de conductividad hidráulica (obtenidos con lluvia simulada) de 0,62 cm/h en labranza convencional, 0,87 cm/h en labranzas conservacionistas y de 1,84 cm/h en una situación muy poco alterada, con lo que quedó demostrado la susceptibilidad natural de este tipo de suelos a sellarse (Bricchi *et al.*, 2000; Bricchi, 2004)

Por otro lado la estructura subsuperficial se constituye en grandes bloques angulares que conforman los “pisos de labranzas”, con elevados valores de densidad aparente. En ambas capas del perfil cultural se produce una disminución marcada de la porosidad total a través de los macroporos de origen biológico, que en algunos casos alcanzan valores críticos con el agravante de que a veces se generan poros tipo fisuras horizontales. Frente a estos cambios de formas y cantidad de poros se han detectado disminuciones de conductividad hidráulica del 90% (Bricchi, 1996; Bricchi y Cisneros 1998).

Las propiedades hidráulicas en general, y la infiltración en particular tienen un elevado peso relativo como indicadores físicos de calidad según la mayoría de las aproximaciones y modelos mencionados en la literatura (Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994; Cisneros *et al.*, 1997).

Entre los factores del suelo que afectan las propiedades hidráulicas se destacan la textura, estructura (densidad aparente, porosidad, distribución de poros por su tamaño, continuidad de los mismos) estabilidad estructural y presencia de sellos o costras. Entre los relacionados a la producción se indican tipos de uso de la tierra particularmente en el agrícola, rotaciones, labranzas, manejo de residuos, y los tipos de pastoreo utilizados en los sistemas ganaderos (Rawls *et al.*, 1993).

Considerables investigaciones se han realizado a nivel mundial en relación a los efectos de la labranza sobre las propiedades físicas del suelo y su incidencia en el comportamiento de varios cultivos (Larson, 1964; Lal, 1979; Brown *et al.*, 1985; Baker, 1987; Derpsch *et al.*, 1991; Bravo, 1993; Marcano *et al.*, 1994; Bravo, 1995; Díaz Zorita, 1999). Aunque algunas veces los resultados son contradictorios, muchos investigadores coinciden que en aquellos sistemas donde se perturba el suelo se consiguen generalmente mejores propiedades físicas como mayor macroporosidad y conductividad hidráulica, y menor densidad aparente en la capa sometida a laboreo que en la mayoría de los sistemas conservacionistas.

Sin embargo, el efecto de la labranza sobre dichos parámetros puede ser transitorio ya que, por impacto de las gotas de lluvia, el suelo puede recompactarse y disminuir la macroporosidad, lo cual tiene influencia muy fuerte sobre el comportamiento del agua del suelo (Adeoye, 1982; Lindstrom y Onstad, 1984). En este sentido, Edwards *et al.* (1988)

encontraron que la siembra directa mejoró la agregación y aumentó la cantidad de macroporos continuos lo que implica una mejora en las propiedades hidráulicas del suelo.

En definitiva, los cambios producidos por labranzas en la cantidad, tamaño y continuidad de los poros tienen una gran influencia sobre las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo, pero en diversos estudios se ha demostrado que el efecto de las labranzas sobre la velocidad de infiltración puede ser contradictorio (Jones *et al.*, 1994)

En relación con lo hasta aquí expuesto, los permeámetros de disco están siendo utilizados en forma creciente para mediciones in situ de las propiedades hidráulicas del suelo insaturado (Perroux y White, 1988; Ankeny *et al.*, 1991; Reynolds y Elrick, 1991; Logsdon y Jaynes, 1993) y cercano a saturación natural (Clothier y White, 1981; Perroux y White, 1988; Thony *et al.*, 1991; Mohanty *et al.*, 1994).

Inicialmente, el campo de trabajo con estos instrumentos se centró en la determinación de las propiedades de suelo como difusividad del agua, conductividad hidráulica, tamaño de capilares macroscópicos, y tamaño representativo de poro, en las primeras etapas de infiltración (White y Perroux, 1987, 1989). Watson y Luxmore (1986) también mostraron como el permeámetro de disco puede ser usado para cuantificar la contribución de los caminos preferenciales de flujo a la infiltración. Además Lin *et al.* (1996) concluyeron que este instrumento permite determinar la contribución de cada rango de poros al flujo total de agua, comparando tasas de infiltración medidas a varios potenciales.

Más conveniente de ejecutar que los experimentos de drenaje interno, esta metodología es una herramienta ideal para estudios de variabilidad espacial y, además, provee estimaciones de variables físicas como sortividad capilar, y escalas de tiempo y longitud de diferentes características (Vandervaere *et al.*, 1997).

White y Sully (1987) propusieron que los resultados de infiltración obtenidos mediante esta técnica podrían ser usados para estimar las consecuencias de la degradación estructural del suelo desde el punto de vista hidrológico.

van Genuchten *et al.* (1999) indicaron la necesidad de evaluar en forma directa las propiedades hidráulicas de los suelos en condición cercana a saturación por estar fuertemente afectada por la estructura y la macroporosidad.

1.2. Hipótesis y objetivos

1.2.1. Hipótesis

En suelos agrícolas, la conductividad hidráulica y la porosidad, caracterizadas mediante permeámetro de disco son parámetros sensibles a los factores de manejo, por lo que su conocimiento es una herramienta válida como indicadores de la calidad de un suelo.

1.2.2. Objetivos

Caracterizar las modificaciones de la conductividad hidráulica y la porosidad por efecto de diferentes sistemas de manejo, mediante la técnica del permeámetro de disco, en la superficie de un suelo Hapludol típico de la Región Central de la provincia de Córdoba, Argentina; teniendo en cuenta los **objetivos específicos** que se enumeran a continuación:

- Calibrar el método de campo “permeámetro de disco” en un Hapludol típico franco arenoso muy fino.
- Evaluar en cada situación los parámetros de infiltración, velocidad de infiltración, conductividad hidráulica
- Evaluar en cada situación la contribución de poros de radio mayor a 750 y entre 300 y 750 micrómetros de radio en el movimiento del agua.
- Comparar los valores de los parámetros hidráulicos entre las situaciones estudiadas

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del área de estudio

El trabajo se realizó en los meses de junio, julio y agosto de 2005, en el campo de docencia y experimentación de la UNRC, ubicado sobre la Ruta Nac. 36 Km. 601.

Desde el punto de vista climático, en esta región predomina el subhúmedo con estación seca, mesotermal. Las precipitaciones medias anuales oscilan entre 700 – 800 mm, con régimen monzónico que concentra el 80 % de las lluvias entre octubre y abril (Degioanni, 1998).

El suelo es un Hapludol típico de textura franca arenosa muy fina, cuya granulometría en los primeros cm es: 16% de arcilla, 41% de limo, 33% de arena muy fina, 10% de otras fracciones de arenas. El contenido de materia orgánica es del orden del 4,03% en condición cuasi natural y 1,75% en las cultivadas (Bricchi, 1996). En este suelo se tomaron dos situaciones ubicadas en la posición de loma en la toposecuencia, con diferentes historias de uso y manejo, y una situación testigo.

1. *Mínima alteración* (MA), ubicada en una clausura de dicho campo que en los últimos 40 años no se destinó a uso agrícola o ganadero. Esta es la situación testigo.

2. *Agrícola* (A), cuya secuencia de cultivos de los últimos cuatro años fue triticales - soja – soja - triticales (triticales para semilla), todos realizados en siembra directa. Las determinaciones se realizaron sobre el último triticales.

3. *Ganadero-Agrícola* (GA): Pastura base alfalfa de tres años de implantación, usada exclusivamente para corte, con antecesor agrícola durante cuatro ciclos.

2.2. Determinaciones realizadas

En las tres situaciones mencionadas se realizaron mediciones en la superficie del suelo con cuatro repeticiones, con permeámetro de disco (Perroux y White, 1988) a tres tensiones: 0, 2 y 5 cm. En todas las situaciones se determinaron parámetros de flujo saturado e insaturado: infiltración parcial (I_p), infiltración acumulada (I_a), velocidad de infiltración (V_i); parámetros exclusivos de flujo saturado: conductividad hidráulica (K_s); y parámetros exclusivos de flujo no saturado: conductividad hidráulica no saturada (K_h). A su vez se

calcularon los diámetros de poros involucrados en la conducción de agua a las diferentes tensiones de aplicación, el número de estos poros y la contribución de los mismos en el flujo de agua como porcentaje del total.

El permeámetro de referencia es del tipo que aplica agua con presiones menores o iguales a la presión atmosférica, lo que permite estimar diámetros de poros equivalentes que corresponden a los capilares que succionan agua a presiones iguales o mayores a las fijadas en el permeámetro de disco. Este aparato (Figura 2.1) (Fotografía 1 del Anexo) consiste de un disco de 12.5 cm de diámetro cubierto en su base por una fina membrana de nylon (M) con poros de 20 μm de diámetro. El tubo (RD) sirve de Mariotte y posee una entrada móvil de aire (C1) que se usa para ajustar el potencial agua en la base de la malla de nylon. El tubo (RA) sirve de depósito de agua para la infiltración y lleva una escala graduada que permite leer los volúmenes de agua infiltrada en función del tiempo.

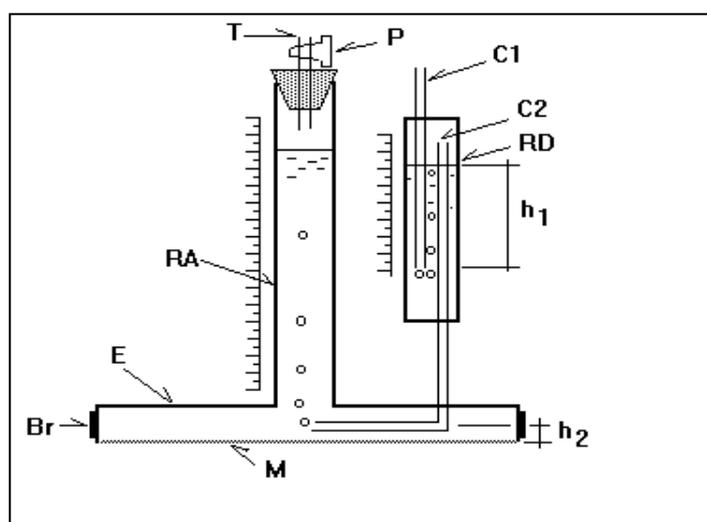


Figura 2.1. Esquema del permeámetro de disco. RA: depósito de alimentación; RD: Mariotte; M: membrana de nylon; C1: capilar móvil para ajustar potencial; C2: capilar de aireación; T: tubo de llenado; P: robinete o pinza de Mohr; Br: base de goma para sujetar malla; E: base no saturada, $h_0 = h_2 - h_1$, h_0 es negativa para $h_1 > h_2$

Antes de cada ensayo o lecturas de la cantidad de agua infiltrada, se sacaron muestras superficiales de suelo para medir el contenido hídrico inicial (g/g), con el fin de realizar las mediciones en condiciones iniciales similares de contenido hídrico y así darle validez a las comparaciones realizadas. Una vez finalizada cada determinación se sacó una muestra en cilindro con el propósito de medir la densidad aparente según lo describen Blake y Hartage (1986).

2.3. Desarrollo de los métodos de cálculo

2.3.1 Parámetros comunes a ambos tipos de flujo

Si bien los mismos no se analizan de manera directa, se utilizan para la determinación y análisis de los parámetros exclusivos de flujo saturado e insaturados que se describen más adelante.

2.3.1.1 Infiltración parcial (I_p)

Se calcula a partir de cada una de las lecturas registradas usando la siguiente relación:

$$I_p \text{ (cm)} = (L_n - L_{n-1}) s / S \quad (1)$$

Donde L_n y L_{n-1} (cm) representan una lectura y su inmediata anterior en los tiempos t_n y t_{n-1} respectivamente; s es la superficie interna del reservorio de agua (22.6 cm^2); S es la superficie del disco (123 cm^2).

2.3.1.2. Infiltración acumulada (I_a)

Es la suma de cada uno de los valores de infiltración parcial hasta un tiempo t_n .

$$I_a \text{ (cm)} = I_{p_n} + I_{p_{n+1}} \quad (2)$$

2.3.1.3. Velocidad de infiltración (V_i)

Es la relación entre la infiltración parcial y el tiempo transcurrido entre lecturas:

$$V_i \text{ (cm h}^{-1}\text{)} = I_p / (t_n - t_{n-1}) = (L_n - L_{n-1}) s / (t_n - t_{n-1}) S \quad (3)$$

2.3.2. Parámetros exclusivos de flujo saturado

2.3.2.1. Conductividad hidráulica saturada (K_s)

Se estima a partir de las mediciones de $I_a(t)$ en la etapa final de infiltración. Es la pendiente de la sección lineal de la infiltración acumulada graficada en función del tiempo y presenta unidades de (cm h^{-1}).

2.3.3. Parámetros exclusivos de flujo no saturado

2.3.3.1. Conductividad hidráulica no saturada (K_h)

De acuerdo a Wooding (1968) el flujo estacionario desde un permeámetro de disco de radio r está dada por:

$$V_{fi} = Kh + (4 \phi n / \pi r) \quad (4)$$

Donde V_{fi} (cm h^{-1}) es la infiltración a tasa constante o flujo estacionario; Kh (cm h^{-1}) es la conductividad hidráulica a una carga hidrostática h (cm) impuesta y representa el flujo vertical que se produce directamente debajo de la base del permeámetro; ϕn (cm h^{-1}) es el potencial de flujo mátrico (Ratas y Gardner, 1971) y está dado por:

$$\phi n = \int_{\psi_0}^{\psi_n} K(\psi) d\psi \quad (5)$$

Donde ψ_n y ψ_0 (cm) son los potenciales para los contenidos de agua inicial y final.

Ankeny et al. (1991) uniendo las ecuaciones 4 y 5 y sosteniendo que la ecuación de Wooding se puede generalizar cuando la condición de contorno no es potencial agua del suelo igual a cero, obtuvieron:

$$V_{fi}(\psi) = \pi r^2 K(\psi) + 4 r \phi(\psi) \quad (6)$$

Así se tiene para dos potenciales de contorno diferentes, dos V_{fi} determinados por las conductividades hidráulicas a los potenciales considerados y a los potenciales agua del suelo considerados, es decir:

$$V_{fi}(\psi_1) = \pi r^2 K(\psi_1) + 4 r \phi(\psi_1) \quad (7)$$

$$V_{fi}(\psi_2) = \pi r^2 K(\psi_2) + 4 r \phi(\psi_2) \quad (8)$$

De esta manera se obtienen dos ecuaciones con cuatro incógnitas: $K(\psi_1)$, $K(\psi_2)$, $\phi(\psi_1)$, $\phi(\psi_2)$; y suponiendo que la relación $K(\psi) / \phi(\psi)$ es igual a una constante A (cm^{-1}) (Philip, 1985), se llega a:

$$V_{fi}(\psi_1) = (\pi r^2 + 4 (r / A)) K(\psi_1) \quad (9)$$

$$V_{fi}(\psi_2) = (\pi r^2 + 4 (r / A)) K(\psi_2) \quad (10)$$

Así se tienen dos ecuaciones y tres incógnita: A , $K(\psi_1)$, $K(\psi_2)$. La ecuación necesaria para resolver el sistema la extraemos al analizar la variación de K en relación con ψ y del significado del potencial de flujo mátrico sobre dicha relación (Figura 2.2):

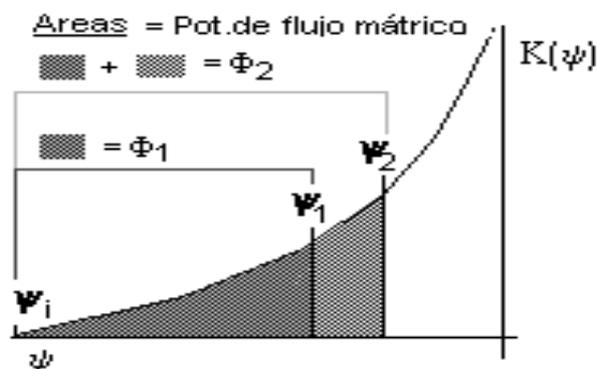


Figura 2.2. Relación entre carga hidráulica y conductividad hidráulica.

De la misma surge:

$$\text{Área} = \phi_1 - \phi_2 = (\psi_1 - \psi_2) ((K(\psi_1) + K(\psi_2)) / 2) \quad (11)$$

y como $A = \text{cte}$.

$$\begin{aligned} \phi_1 - \phi_2 &= (K(\psi_1) / A) - (K(\psi_2) / A) = \Delta\psi ((K(\psi_1) + K(\psi_2)) / 2) = \\ &= ((K(\psi_1) - K(\psi_2)) / A) \quad (12) \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que la diferencia de potencial corresponde a la diferencia de cargas hidráulicas en el permeámetro, se obtiene un sistema de tres ecuaciones (9, 10, 12) con tres incógnitas (A , $K(\psi_1)$, $K(\psi_2)$) que permite calcular la conductividad hidráulica insaturada para las diferentes tensiones. Cabe aclarar que la infiltración a tasa constante (V_{fi}) necesaria para resolver las ecuaciones, se obtiene de graficar la velocidad de infiltración (obtenida con el permeámetro) en función del tiempo. La pendiente de este gráfico en el momento en que los valores se estabilizan en los últimos períodos del proceso de infiltración, representa la V_{fi} .

Para la determinación de K_h se utilizó el método de Ankeny *et al.* (1991) por ser uno de los que minimiza los errores experimentales (Aoki y Sereno, 2003).

2.3.4. Otros parámetros

2.3.4.1. Radio de poros

Las diferentes tensiones de aplicación de agua en la superficie del suelo permitieron excluir del proceso de infiltración de agua poros de distintos diámetros. A partir de la ecuación de capilaridad se calculó el radio de poro (r) correspondiente a una determinada tensión de aplicación de agua:

$$r = -\frac{2 \sigma \cos \alpha}{\rho g h} \cong -\frac{0,15}{h} \quad (13)$$

Donde σ es la tensión de agua en la superficie [MT^{-2}]; α es el ángulo de contacto entre el agua y la pared del poro; ρ es la densidad del agua [ML^{-3}]; g es la aceleración debido a la gravedad [LT^{-2}], y h es la tensión (cm de agua) en el permeámetro de disco.

2.3.4.2. Distribución de la porosidad

Si se considera la ecuación 13 conjuntamente con la ecuación de Poiseuille (Hillel, 1998), los cambios en la conductividad hidráulica debido a cambios en la tensión de aplicación de agua desde el permeámetro pueden ser trasladados a una determinada densidad

o cantidad de clases de tamaño de poros en el suelo. De esta manera, la ecuación del número de poros (N) de radio R por m² de suelo superficial, asumiendo valores estándar de gravedad y viscosidad del agua a 20°C, quedaría de la siguiente manera:

$$N = \frac{7,22 \cdot 10^{-2} \Delta K \psi}{R^4} \quad (14)$$

Donde $\Delta K \psi$ = diferencial de cambio en la conductividad hidráulica del suelo, debido a cambios en la tensión de aplicación de agua desde el permeámetro. Los supuestos asumidos en la aplicación de la ecuación de Poiseuille para el cálculo del número de poros son: a) flujo de agua laminar, b) poros cilíndricos, c) radios de poros dados por la ecuación de capilaridad.

Para analizar la distribución de la porosidad se consideraron tensiones de aplicación de agua desde el permeámetro de 0, 2 y 5 cm, de manera de excluir del proceso de transporte de agua poros >0.075 y 0.03 cm de radio, para las tensiones de 2 y 5 cm respectivamente. En cambio, cuando no se ejerce succión todos los poros conducen agua. Se asumió que los poros son del mínimo diámetro dentro de cada rango y por lo tanto representan el valor total dentro de ese rango.

2.3.4.3. Porcentaje de flujo total según tamaño de poro

Para analizar en cuánto contribuyen al flujo total los diferentes rangos de tamaño de poros se calculó la diferencia de conductividad hidráulica entre dos tensiones (dos límites de poros) dividido por la conductividad hidráulica a saturación (tensión cero).

2.4. Análisis estadístico

Todos los datos fueron analizados según paquete estadístico INFOSTAT (INFOSTAT, 2002) siguiendo un diseño experimental simple al azar con cuatro repeticiones. Todas las variables fueron transformadas con raíz cuadrada, luego analizada la distribución Normal según el test de Shapiro-Wilks (modificado). Finalmente se realizó análisis de la varianza y separación del medias mediante el test LSD al 5 % de probabilidad.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Conductividad hidráulica

Como se muestra en la Figura 3.1, se produce una clara disminución de la conductividad hidráulica a medida que aumenta la tensión de aplicación de agua desde el permeámetro para todos los sitios de medición. Esto indica un comportamiento diferencial del rango de poros a diferentes succiones, que permite evaluar relaciones de flujo de agua en el suelo en función del tamaño y número de poros activos a distintas succiones de aplicación de agua.

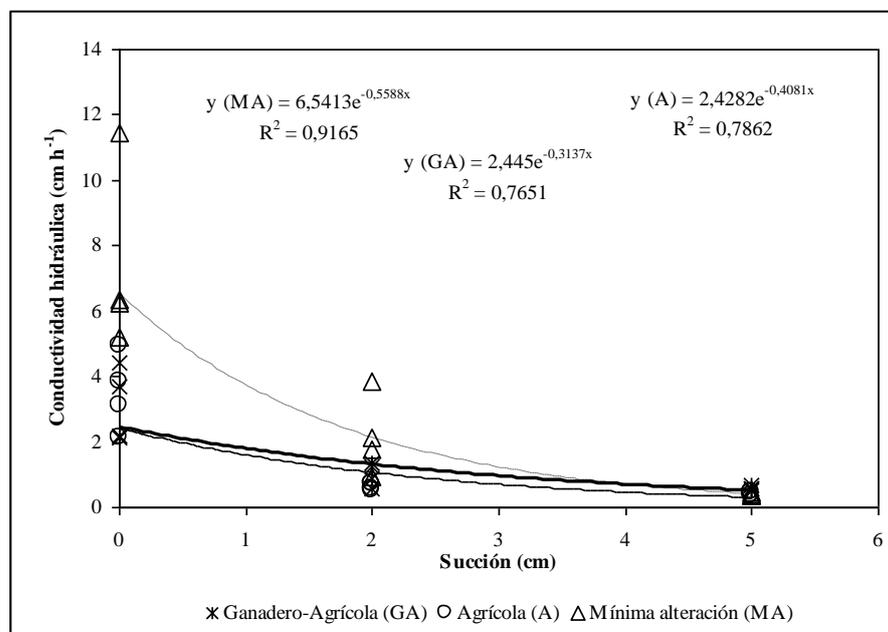


Figura 3.1. Conductividad hidráulica según tensión de aplicación en el permeámetro de disco

En la Tabla 3.1 se detallan los valores de conductividad hidráulica para las diferentes situaciones y con las distintas tensiones de aplicación de agua desde el permeámetro.

Como puede apreciarse, la conductividad hidráulica saturada (K_s) presentó diferencias significativas entre las situaciones evaluadas. En este sentido, se observó una mayor conductividad en la situación de mínima alteración (MA) respecto a las restantes, siendo estas diferencias del orden del 135% y del 108% con relación a las situaciones ganadero agrícola (GA) y agrícola (A) respectivamente.

Diferencias de magnitudes similares fueron encontradas por Aoki y Sereno (2003) cuando analizaron el comportamiento de la K_s en situación de bosque natural y sobre monocultivo de soja en un suelo Haplustol típico franco limoso y por Cisneros *et al.* (1997) también en un Haplustol típico pero con textura franco arenosa muy fina, aunque estos autores utilizaron otra metodología.

Tabla 3.1. Conductividad hidráulica a 0, 2 y 5 cm de columna de agua (K_s , K_2 y K_5).

	K_s (h: 0 cm) (cm h ⁻¹)	K_2 (h: 2 cm) (cm h ⁻¹)	K_5 (h: 5 cm) (cm h ⁻¹)
Mínima alteración (MA)	7.31 a	2.18 a	0.42 a
Ganadero agrícola (GA)	3.11 b	0.96 b	0.50 a
Agrícola (A)	3.51 b	0.65 b	0.40 a
DMS (0.05)	2.99	1.17	0.12
C.V. (%)	18.37	24.30	7.13

C.V. (%) Coeficiente de variación en porcentaje. En vertical, letras distintas indican diferencias significativas al 5 % de probabilidad según ANAVA. La comparación de medias se realizó mediante el test LSD. Los valores originales debieron ser transformados por $x^{0.5}$ para su análisis, dado que los mismos no se correspondieron a la distribución Normal según test de Shapiro-Wilks. En tabla se presentan los valores originales

Leduc *et al.* (2001) indicaron que generalmente los cambios de uso de bosque natural a cultivos agrícolas producen modificaciones muy marcadas de las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo particularmente disminución de la infiltración e incremento de la escorrentía. En ése sentido en un Hapludol típico de similar granulometría al utilizado en el presente estudio, Bricchi (1996) encontró una disminución del 93% en la conductividad hidráulica -medida en laboratorio-, luego de 80 años de cultivos. Por otro lado en un suelo de similares características Bricchi (2004) encontró que luego de realizar durante 7 ciclos labranzas conservacionistas disminuía un 54% mientras que con labranza convencional la reducción fue del 87%, siempre comparado con una situación cuasi natural. En Haplustoles típicos franco limosos de la región subhúmeda seca de Tucumán, Sanzano *et al.* (2004) encontraron disminuciones de conductividad hidráulica del 73% en pastura, 75% en siembra directa y 83% en labranza convencional con respecto a un monte natural de vegetación xerófila, mientras que en la misma región luego de 10 años de agricultura se registró una disminución promedio del 94% (García *et al.* 1993)

Espósito (2002) observó en los primeros cm del suelo, un incremento de la porosidad de drenaje rápido del orden del 20% en labranzas conservacionistas comparado con labranza convencional, que se vio reflejado en una conductividad hidráulica 72% superior.

A nivel de la conductividad insaturada (K_2 , h: 2 cm), se registró un comportamiento similar al de K_s . Los valores hallados muestran diferencias del 127% y 235%, a favor de la situación de MA con respecto de GA y A respectivamente, coincidiendo con lo encontrado por Sanzano *et al* (2004). Se destaca que a estas tensiones los poros que aún permanecen conduciendo agua son los menores a 750 micras y por ello mantendrían un nivel de flujo elevado y de características similares a la condición de saturación.

Generalmente suelos con pasturas bien manejadas tienen una conductividad hidráulica tanto saturada como cercana a saturación mas elevada que suelos cultivados convencionalmente (Chan y Mead, 1989). Como las propiedades hidráulicas están altamente correlacionadas con la estabilidad estructural y la macroporosidad, la mayor actividad biológica y estabilidad estructural de tierras forestadas, con pasturas permanentes, con mínima o no labranza puede ser la razón de una mejora en las propiedades hidráulicas de los suelos (Leduc *et al.*, 2001). Así Edwards *et al.* (1988) mostraron que los macroporos especialmente los más grandes hechos por lombrices, fueron canales para la infiltración rápida del agua en suelos sometidos a un largo período de siembra directa de maíz. En un suelo Haplustol típico franco arenoso muy fino del oeste de Río Cuarto Bricchi *et al.* (2004) encontraron diferencias entre situaciones de MA con GA del orden del 80% a nivel del contenido de carbono orgánico y del 100% en relación a macroagregados estables al agua. Ambas características del suelo mantienen una estrecha relación con la conductividad hídrica en condiciones de saturación o cercana a la misma.

Se han realizado muchos estudios sobre las propiedades hidráulicas en relación a labranzas y los resultados son contradictorios. Dependiendo de la historia de los cultivos, zona climática y las prácticas de manejo, la conductividad hidráulica saturada y no saturada bajo siembra directa o mínima labranza puede ser más elevada (Benjamin, 1993) o más baja (Miller *et al.*, 1998) que bajo labranza continua, o no diferir significativamente de esta ultima (Obi y Nnabude, 1988). Estos resultados contradictorios pueden ser explicados a través de las diferentes condiciones ambientales (suelo, uso y manejo del mismo y clima) y de los distintos grados de calibración de los múltiples métodos de medición (Miller *et al.*, 1998)

La conductividad hidráulica obtenida con una tensión de 5 cm de altura presentó un comportamiento diferente que el hasta aquí señalado, dado que la misma no evidenció diferencias significativas entre situaciones, debido posiblemente a que a tensiones más elevadas de aplicación de agua, el tamaño y número de poros está más condicionada por la textura que por la estructura del suelo (Lin *et al.*, 1996). Un comportamiento similar fue observado por Sanzano *et al* (2004). Lo antes mencionado explicaría las diferencias no significativas, ya que la textura es similar en las tres situaciones de uso.

En la Tabla 3.2, se indica la densidad aparente del suelo para los diferentes sistemas de uso. En MA, fue significativamente menor que en GA y A. Del modo inverso la porosidad total disminuyó desde la situación MA a las dos restantes.

En este estudio se observan incrementos de DAP del 14% en GA y del 16 % en A con respecto a MA. Valores muy semejantes fueron observados por Sanzano *et al.* (2004) ya que en siembra directa, labranza convencional y pastura los valores resultaron 17, 10 y 14% superiores al suelo en condición natural respectivamente, mientras que Álvarez *et al.* (2004) indicaron incrementos del 12 % en siembra directa y labranza convencional con disco. En este sentido Álvarez *et al.* (2004) manifestaron que el contenido de carbono orgánico permitió explicar poco más del 50% de la variación de la densidad aparente en suelos de la Pampa ondulada de francos, franco limosos y franco arcillo limosos.

Tabla 3.2. Densidad aparente (DAP, g cm^{-3}) y porosidad total (PT, %) en las diferentes situaciones de uso

	DAP	PT
Mínima alteración (MA)	1.07 b	59.62 a
Ganadero agrícola (GA)	1.24 a	53.20 b
Agrícola (A)	1.27 a	52.08 b
DMS (0.05)	0.05	1.76
C.V. (%)	4.68	3.85

C.V. (%) Coeficiente de variación en porcentaje. En vertical, letras distintas indican diferencias significativas al 5 % de probabilidad según ANAVA. La comparación de medias se realizó mediante el test LSD.

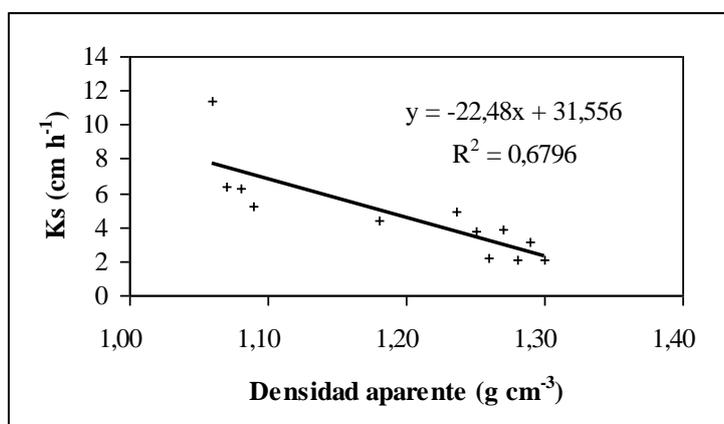


Figura 3.2. Conductividad hidráulica saturada en función de la densidad aparente del suelo.

En la Figura 3.2 puede observarse el elevado grado de relación encontrado entre la K_s y la densidad aparente, donde por cada 0.1 g cm^{-3} de aumento en la misma la K_s disminuye en 2.248 cm h^{-1} , esta relación se produce por las diferentes estructuras del suelo producto de los diferentes manejos.

3.2. Distribución de poros por tamaño y contribución al flujo de agua

En la Tabla 3.3 se indica la cantidad de poros por m^2 (N) y la contribución de los diferentes tamaños de poros al flujo de agua. Se observa que en ambos rangos de tamaños MA es mayor y significativamente diferente a GA y A y, en este sentido se destaca que con respecto a los poros mayores de 750μ de radio la pérdida es del 58% en GA y del 44% en A, mientras que en los poros entre $750\text{-}300 \mu$ de radio los valores ascienden al 74% y 86% respectivamente.

Otra consideración importante es la diferencia que se produce entre los manejos GA y A. Así se destaca que en los poros de mayor diámetro el uso agrícola supera en un 25% al ganadero agrícola, mientras que en los de menor calibre la tendencia es opuesta cuya diferencia es del 46%.

En referencia al porcentaje del flujo total conducido por los poros $>750\mu$ en A es mayor y diferente a GA explicando en el primer caso el 80% y en el segundo el 70% del flujo producido. En el caso de poros entre $750\text{-}300 \mu$ existen diferencias significativas entre MA y A, este rango de poros solo explica el 24% y el 7% del flujo total, respectivamente.

Tabla 3.3. Número de poros por m^2 (N) y porcentaje del flujo total de agua (Flujo) para cada rango de radio de poros (r).

	r > a 750μ (h: 0 – 2 cm)		r entre 300 a 750μ (h: 2 – 5 cm)	
	N	Flujo (%)	N	Flujo (%)
Mínima alteración (MA)	11.70 a	70.14 ab	157.00 a	24.10 a
Ganadero agrícola (GA)	4.91 b	69.13 b	41.00 b	14.79 ab
Agrícola (A)	6.52 b	81.54 a	21.94 b	7.02 b
DMS (0.05)	4.75	10.61	98.63	10.43
C.V. (%)	18.78	4.53	37.79	25.90

r: radio de los poros. h: tensión de aplicación de agua C.V. (%) Coeficiente de variación en porcentaje. En vertical, letras distintas indican diferencias significativas al 5 % de probabilidad según ANAVA. Diferenciación de medid mediante LSD. Los valores originales debieron ser transformados por $x^{0.5}$ para su análisis, dado que los mismos no se correspondieron a la distribución Normal según test de Shapiro-Wilks. En tabla se presentan los valores originales.

Es ampliamente reconocida la importancia que tienen los macro y mesoporos en la infiltración y movimiento de agua en el suelo (Buttle y McDonald, 2000; Luxmoore, 1981)

En términos generales se observa que a medida que aumenta la tensión de medición, los diámetros de poros que conducen agua disminuyen, aumenta el número de poros por metro cuadrado y la conductividad hidráulica decrece. Esto indica que, en el balance general, pocos poros grandes conducen mayor cantidad de agua que un mayor número de poros pequeños.

La ley de Hagen – Poiseuille predice que la velocidad del flujo incrementa con la cuarta potencia del radio del poro. Watson y Luxmoore (1986) indicaron para una condición forestal encharcada que el 73% del flujo fue conducido a través de poros con diámetro mayor de 1mm y destacaron que ese tipo de poros ocupaba solo el 0,32% del volumen total del suelo. Dunn and Phillips (1991a) observaron en labranza convencional que el 43% del flujo total fue conducido a través de macroporos, mientras que el 77% del flujo total a 0,6 cm de presión fue transmitido a través de poros mayores a 2 mm.

Es evidente que en este nivel de comparación el componente estructural juega un rol determinante en el arreglo espacial y distribución de los poros, lo que determinaría en forma directa la mayor conductividad hidráulica a bajas succiones. En el mismo sentido, Lin *et al.* (1996) afirmaron que el movimiento del agua en suelos estructurados naturalmente, debido a que poseen macroporos y poros biológicos, es diferente al de aquellos suelos homogeneizados artificialmente. Bricchi (1996) observó en un Hapludol típico compactado que disminuyó 7 veces la cantidad de poros tubulares ($>0,5$ mm), muchos de ellos representados por bioporos. Por otro lado la misma autora indicó disminución del 68 % de poros mayores a 60μ , y del 93% en la conductividad hidráulica.

Bodhinayake (2003), destacó que a una presión de 0,6 cm el 40% y el 50% del flujo total de agua fue transmitido por los macroporos ($> 1000 \mu$ m de diámetro) en suelos cultivados y prístinos respectivamente, mientras que a una presión de 3 cm la conductividad hidráulica de una condición prístina fue dos a tres veces mas grande que en suelos cultivados.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

- El permeámetro de disco posee suficiente sensibilidad para determinar las diferencias de comportamiento de las propiedades hidráulicas en un suelo Hapludol típico franco arenoso muy fino.
- El permeámetro de disco permite cuantificar la variación estructural superficial del suelo a través de la medición de propiedades hidráulicas en un suelo Hapludol típico franco arenoso muy fino.
- Existen diferencias de valores de conductividad hidráulica y en la distribución de poros a bajas tensiones asociadas a manejos del suelo contrastantes. Se produce una clara disminución de la conductividad hidráulica a medida que aumenta el potencial de presión para todos los sitios de medición.
- Aún valores pequeños de macroporos contribuyen en forma sensible al movimiento rápido de agua dentro del suelo ya que tienen una elevada influencia sobre los valores de conductividad hidráulica saturada y cercana a saturación.
- El permeámetro de disco es una herramienta útil para determinar propiedades hidráulicas y por ende podría usarse con el fin de definir índices de calidad de suelo.
- La conductividad hidráulica saturada es un indicador sensible de la condición física (estructural) del suelo.
- Es necesario realizar un mayor número de repeticiones para detectar – si es que las hay – diferencias entre situaciones de manejo, cuando las mismas se encuentran bajo uso agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

ADEOYE, K. B. 1982. Effect of tillage depth on physical properties of a tropical soil on yield maize, sorghum and cotton. **Soil Tillage Res.** 2: 225-231.

ALVAREZ, C. R., F. H. GUTIERREZ BOEM, M. A. TABOADA y P. PRYSTUPA. 2004. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires. **XIX C.A.C.S.** Paraná, Entre Ríos, Argentina.

ANKENY, M. D., M. AHMED, T. C. KASPAR y R. HORTON. 1991. Design for an automated tension infiltrometer. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 55: 467-470.

AOKI, A. M. y R. SERENO. 2003. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo, estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. **Taller de Física de Suelos: Metodologías físicas para investigación de propiedades del suelo; unificación de procedimientos.** AACS y UNLP-FCAF. La Plata, Argentina.

BAKER, H. 1987. Effects of tillage practices on cotton double cropped with wheat. **Agron. J.** 79: 513-516.

BENJAMIN, J.G. 1993. Tillage effects on near surface soil hydraulic properties. **Soil Tillage Res.** 26:277-288.

BLAKE, G. R. y K. H. HARTAGE. Bulk Density. En: Methods of soil analysis. **Agronomy 9.** Part I. Am. Soc. Of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. Pp363-375.

BODHINAYAKE, W. L. **Characterization of surface soil hydraulic properties in Sloping landscapes.** Tesis de maestría. University of Saskatchewan. Saskatchewan, Canadá.

BRAVO, C. 1993. **Efectos de diferentes sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento del cultivo de algodón (Gossypium hirsutum L.) en un Alfisol del estado Guárico.** Tesis de Postgrado en Ciencias del Suelo. Facultad de Agronomía. UCV. Maracay. 117 pp.

BRAVO, C. 1995. La labranza conservacionista en Venezuela. **III Reunión de la Red Latinoamericana de labranza conservacionista (RELACO).** San José, Costa Rica. Memorias. Pp 235-247.

BRICCHI, E. 1996. **Relaciones entre la compactación, morfología y propiedades físicas de un Hapludol típico de Río IV.** Tesis de Magíster Scientiae. Fac. Agronomía. UBA.

BRICCHI, E. 2004. Hydrological behaviour of sealing under different soil management conditions in the center south Córdoba , Argentina. Invited presentations College on Soil Physics 2003. (Ed. DM Gabriels, GC Ghirardi, DR Nielsen, I Pla Sentis, EL Skidmore) **The Abdus Salam ICTP.** Trieste Italia

BRICCHI, E., F. FORMÍA y J. CISNEROS. 1996. Relación entre la condición superficial y el régimen hídrico en un Haplustol típico, bajo diferentes manejos. **XIII C.L.C.S.** Aguas de Lindoia, Brasil.

BRICCHI, E. y J. CISNEROS. 1998. Soil porosity modification induced by compaction. **International Soil Sci. Soc.** CD Sci. Reg. 2309. 7 pp.

BRICCHI, E., L. RIBERI, H. AQUINO, A. DEGIOANNI y F. FORMÍA. 2000. Dinámica de las condiciones superficiales de un Hapludol típico con tres sistemas de labranzas. **The International soil conservation organization conference.** Bs. As., Argentina.

BRICCHI E., F. FORMÍA, G. ESPÓSITO, L. RIBERI y H. AQUINO. 2004 The effect of topography, tillage, and stubble grazing on soil structure and organic matter. **Spanish Journal of Agriculture Res.** 2(3): 409-418

BROWN, S. M., T. WHITWELL, J. T. TOUCHTON y C. H. BURMESTER. 1985. Conservation tillage systems for cotton production. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 49: 1256-1260.

BUTTLE, J.M. y D.J. MCDONALD. 2000. Soil macroporosity and infiltration characteristics of a forest podzol. **Hydrological Processes.** 14: 831-848.

CANTERO, A., E. BRICCHI, V. BECERRA, J. CISNEROS y H. GIL. 1986. **Zonificación y descripción de las tierras del Depto. Río Cuarto.** Talleres gráficos de la UNRC, adhesión del Bicentenario de la Fundación de la ciudad de Río Cuarto, 80 pág. y una carta.

CASAS, R. 1997. Causas y evidencias de la degradación de los suelos en la Región Pampeana. Hacia una agricultura productible y sostenible en la pampa. De. **CPIA** . 5:99-164.

CHAN, K.Y. y J.A. MEAD. 1989. Water movement and macroporosity of an Australian Alfisol under different tillage and pasture conditions. **Soil Tillage Res.** 14:301-310.

CISNEROS, J. M., C. CHOLAKY, E. BRICCHI, O. GIAYETTO, J. J. CANTERO. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. **Rev. UNRC XVII** (1): 13-22.

CLOTHIER, B. y I. WHITE. 1981. Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45: 241-245.

CROVETTO, C. 1992. **Rastrojo sobre el suelo. Una introducción a la cero labranza.** Santiago, Chile, Editorial Universitaria San Francisco. 301 pp.

DEGIOANNI, A. 1998. **Organización territorial de la producción agraria en la región de Río Cuarto.** Tesis doctoral. Universidad de Alcalá de Henares . Dpto. de geografía. Alcalá de Henares. España

DERPSCH, R., C. H. ROHT, N. SIDIRAS y U. KOPKE. 1991. **Controle da erosao no Paraná. Sistemas de cobertura do solo, plantio directo e preparo conservacionista do solo.** IAPAR. Brasil. 272 pp.

DÍAZ ZORITA, M. 1999. Efecto de seis años de labranzas en un Hapludol del noroeste de Buenos Aires. Argentina. **Ciencia del Suelo XVII (1):** 31-36.

DORAN, J. W. y T. B. PARKIN. 1994. Defining and assessing soil quality. Pp. 3-21. En: Doran, J. W., D. C. Coleman y D. F. Bezdiek (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment.** Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisc. USA.

DUNN, G.H. y R.E. PILLIPS. 1991. Macroporosity of a well-drained soil under no-till and conventional tillage. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 55:817-823.

EDWARDS, W. M., L. D. NORTON y C. E. REMOND. 1988. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. **Sci. Soc. Am. J.** 52: 483-487.

ESPÓSITO, G. P. 2002. **Propiedades hidrofísicas de suelo asociadas a diferentes sistemas de labranzas en cultivo de maíz.** Tesis de Maestría. Universidad de Río Cuarto. Córdoba. Argentina. 133 pp.

FAO. 1993. Estudio sobre las razones del éxito o fracaso de los proyectos de conservación del suelo. **Boletín de suelos de la FAO.** Número 64.

GARCÍA, J. R., R. GIMÉNEZ, G. A. SANZANO y R. D. CORBELLA. 1996. Influencia en la infiltración de agua, de la capa superficial y subsuperficial de un Haplustol éntico de la Llanura Chacopampeana Semiárida. (Tucumán, Argentina). **XIII C.L.C.S.** Aguas de Lindoia, Brasil. Com. 1 N° 35.

HILLEL, D. 1998. **Environmental Soil Physics.** 771 p. Ed. Academic Press, NewYork, USA.

INFOSTAT VERSIÓN 1.1. 2002. **Grupo Infostat.** Facultad de Ciencias Agropecurias. Universidad Nacional de Córdoba. Primera Ed. Ed. Brujas. Argentina. Pp. 266

JONES, O.R., V.L. HAUSER y T.W. POPHAM. 1994. No-tillage effects on infiltration, runoff, and water conservation on dryland. Trans. **ASAE** 37:473-479.

LAL, R. 1979. Importance of tillage systems in soil and management in the tropics. En: **Soil Tillage and Crop Production.** IITA Proc., Serie. N° 2: 25-32.

LARSON, W. E. 1964. Soil parameters for evaluating tillage needs and operations. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** 28: 118-122.

LARSON, W. E. y F. J. PIERCE. 1994. The dynamic of soil quality as a measure of sustainable management. Pp. 37-51. En: Doran, J. W., D. C. Coleman, D. F. Bezedik y B. A. Stewart (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable enviroment.** Soil Sci. Soc. Am. Special Pub. No. 35, Am Soc. Agron., Madison, Wisc. U.S.A.

LEDUC, C., G. FAVREAU y P. SCHROETER. 2001. Long-term rise in a shahelian water-table: the continental terminal in south-west Niger. **J. Hydrol.** 243:43-54.

LIN, H. S., K. J. McINNES, L. P. WILDING y C. T. HALLMARK. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil. *Trans. ASAE XXXIX* (1): 131-133.

LINDSTROM, M. J. y C. A. ONSTAD. 1984. Influence of tillage systems on soil physical parameters and infiltration after planting. **Journal of Soil Water Conservation.** 32: 149-152.

LOGSDON, S. D. y D. B. JAYNES. 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 57: 1426-1431. Am Soc. Agron.

LUXMOORE, R.J. 1981. Micro-, meso- and macroporosity of soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45:671-672.

MARCANO, F., C. OHEP y F. DESIDERIO. 1994. Efecto de la labranza y del nitrógeno en algunos componentes del rendimiento, macroporosidad del suelo, densidad radical y producción del maíz (*Zea mays* L.). **Agronomía Tropica I XDIV** (1): 5-22.

MILLER, J. J., N. J. SWEETLAND, F. J. LARNEY, y K. M. VOLKMAR. 1998. Unsaturated hydraulic conductivity of conventional and conservation tillage soils in southern Alberta. **Can. J. Soil Sci.** 78:643-648.

MOHANTY, B. P., M. D. ANKENY, R. HORTON y R. S. KANWAR. 1994. Spatial analysis of hydraulic conductivity measured using disc infiltrometers. **Water Resour. Res.** 30: 2489-2498.

MORENO, I., C. CHOLAKI, M. LESSER y J. MARCOS 1996. Efecto de la labranza sobre el contenido de carbono orgánico y su implicancia en la estabilidad estructural. **XV Congreso argentino de la ciencia del suelo.** Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

OBI, M.E. y P.C. NNABUDE. 1988. The effect of different management practices on the physical properties of a sandy loam soil in southern Nigeria. **Soil Tillage Res.** 12:81-90.

PERROUX, K. M. y I. WHITE. 1988. Design for disc permeameters. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 52: 1205-1215.

PHILIPS, J. R. 1985. The theory of infiltration. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 49, 788-789.

RAATS, P. A. C. y W. R. GARDNER. 1971. Comparison of empirical relationships between pressure head and hydraulic conductivity and some observations on radial symmetric flow. **Water Res. Res.** 7, 921-928.

RAWLS, W. J., L.R. AHUJA, D.L. BRAKENSIEK, y A. SHIRMOHAMMADI. 1993. Infiltration and soil water movement. p. 5.1-5.51. En D. R. Maidment. (ed.) **Handbook of hydrology.** McGraw Hill, Inc. NY.

REYNOLDS, W. D. y D. E. ELRICK. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 55: 633-639.

SAGyP y CFA. 1995 **El deterioro de las tierras en la República Argentina. Alerta amarillo.** DUO/Comunicación visual y SVN 987-95327-3-2.

SANZANO, G. A., R. CORBELLA, J. GARCÍA y G. FADDA. 2004. La degradación física de Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. **XIX C.A.C.S.** Paraná, Entre Ríos, Argentina.

THONY, J. L., G. VACHAUD, B. E. CLOTHIER y R. ANGULO-JARAMILLO. 1991. Field measurement of the hydraulic properties of soil. **Soil Tech.** 4: 111-123.

VANDERVAERE, J.-P., C. PEUGEOT, M. ESTÉVES, J.-L. RAJOR y S. GALLE. 1997. Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Super Site of the HAPEX-Sahel experiment. **J. Hidrol.** 188: 203-223.

VERRI, L. 2004. **Efecto del uso y del manejo sobre la materia orgánica total y sus fracciones en un Hapludol típico.** Trabajo final. Carrera de Ingeniería Agronómica. Fac. de Agronomía y Veterinaria. UNRC.

van GENUCHTEN, M. T., F. J. LEIJ, y L. WU. 1999. (Eds.), **Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media.** Univ. of Calif., Riverside, Calif.

WATSON, K. W., y 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., y K. M. PERROUX. 1987. Use of sorptivity to determinate soil hydraulic properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 51: 1903-1101.

WHITE, I., y K. M. PERROUX. 1989. Estimation of unsaturated hydraulic conductivity from field sorptivity measurements. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53: 324-329.

WHITE, I., y M. J. SULLY. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. **Water Resour. Res.** XXIII (8): 1514-1522.

WOOGING, R. A. 1968. Steady infiltration from large shallow circular pond. **Water Resour. Res.** 4, 1259-1273.

ZUCCARDI, R. B., J. R. GARCÍA, C. MOLINA, M. CÁCERES, D. GIMÉNEZ y G. A. SANZANO. 1988. **La expansión de la frontera agropecuaria y los impactos sobre el ecosistema de la provincia de Tucumán.** (F.E.C.I.C editor). 225 – 232.

ANEXO



Fotografía 1: Permeámetro de disco utilizado en el presente trabajo.