

# **TESIS DE GRADO**

**Licenciatura en Ecología y Conservación del Ambiente**

**INFLUENCIA DE LA AGRICULTURA EN LAS  
PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO EN UN  
PAISAJE DEL CHACO SEMIÁRIDO: II. SUELOS EN  
AMBIENTES SUMIDEROS DE ESCORRENTÍA.**

*Autor: Oscar René Coria*

*Director: Dr. Guido Lorenz*

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**República Argentina**

**2.006**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	7
2.1 Área de Estudio.....	7
2.2 Unidades de Estudio.....	12
2.3 Parámetros de Evaluación.....	11
2.3.1 Parámetros de evaluación del sistema poroso.....	11
2.3.2 Parámetros de evaluación del proceso de infiltración.....	15
2.3.3 Parámetros complementarios.....	15
2.4 Infiltrómetro de Disco a Tensión.....	16
2.5 Metodología.....	18
2.5.1 Elección del modelo de infiltración y método para la estimación de K y S.....	19
2.5.2 Elección del sitio para cada unidad de estudio.....	29
2.5.3 Mediciones de infiltración in situ y toma de muestras de suelo.....	29
2.5.4 Análisis de las muestras de suelo en laboratorio.....	29
2.5.5 Análisis estadístico.....	30
<b>3. RESULTADOS</b> .....	31
3.1 Test a Normalidad.....	31
3.2 Parámetros de Evaluación del Sistema Poroso.....	32
3.2.1 Porosidad total y densidad aparente.....	32
3.2.2 Distribución de tamaños de poros.....	33
3.3 Parámetros Complementarios.....	36
3.3.1 Materia orgánica del suelo.....	36
3.3.2 Humedad del suelo.....	37
3.4 Infiltración.....	38
<b>4. DISCUSIÓN</b> .....	44
4.1 Influencia del Uso Agrícola Sobre la Estructura del Suelo.....	44
4.2 Influencia del Uso Agrícola en la Distribución de Tamaños de Poros.....	45
4.3 Infiltración.....	46
4.4 Función e importancia del pastizal (ambiente sumidero de escorrentía) en la dinámica del agua y protección del suelo.....	48
<b>5. CONCLUSIÓN</b> .....	52
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SINÓNIMOS

### 1. ABREVIATURAS

#### 1.1 Parámetros del suelo

- ❖ **K** (Conductividad hidráulica)
- ❖ **S** (Sorptividad)
- ❖ **MOS** (Materia orgánica del suelo)
- ❖ **Dap** (Densidad aparente)
- ❖ **PT** (Porosidad total)
- ❖ **Hvi** (Humedad volumétrica inicial)

#### 1.2 Sitios de muestreo

- ❖ **SA** (Sitio Aibal)
- ❖ **SAG** (Sitio Agricultura)

### 2. SINÓNIMOS

- ❖ Bajo = depresión (hacen referencia a la sección baja de la subcuenca)
- ❖ Sabana = pastizal = aibal (hacen referencia al ambiente natural de la depresión de la subcuenca)
- ❖ Potencial = Succión = Tensión. Se destaca que el potencial puede ser positivo o negativo. Cuando es negativo, también es válido la utilización de la palabra succión o tensión, siendo común en esos casos, expresar al valor como positivo.

**Influencia de la agricultura en las propiedades hidráulicas del suelo en un paisaje del Chaco Semiárido: II. Suelos en ambientes sumideros de escorrentía.**

Oscar René Coria <sup>1</sup>

Guido Lorenz <sup>2</sup>

**RESUMEN**

Las propiedades hidráulicas del suelo establecen el comportamiento hidrodinámico del mismo, e influyen en la dinámica del agua. Debido a que las prácticas agrícolas convencionales implican la degradación física del suelo, puede afectar en forma negativa a dichas propiedades. En un relieve ondulado de una zona semiárida, este suceso puede afectar negativamente la función que presenta la zona baja, que es captar el agua proveniente de las zonas más altas. Esto puede derivar en un aumento en la pérdida de agua del ecosistema, debido al incremento de la escorrentía y de agua evaporada. Como consecuencia de ello, disminuye la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua para las plantas, hecho que se agrava si se consideran las condiciones semiáridas del lugar. Por estos motivos, este trabajo consiste en determinar la influencia que presenta la agricultura en las propiedades hidráulicas del suelo en un ambiente de pastizal, ubicado en la depresión de una subcuenca.

El área de estudio se ubica en el Chaco Semiárido Argentino, en el centro este de la provincia de Santiago del Estero. Los suelos originados de sedimentos loésicos se clasifican como *Siltic, Luvic y Pachic Phaeozems* (ISSS Working Group RB, 1.998).

Fueron estimadas con un potencial -2cm, la conductividad hidráulica (K) y la sorptividad (S) del suelo (propiedades hidráulicas), que están vinculadas al proceso de infiltración. También, se determinaron la densidad aparente (Dap) y la porosidad total (PT), como parámetros de evaluación de la estructura del suelo, y la materia orgánica (MO) y la humedad del suelo, como parámetros complementarios. Las mediciones de infiltración *in situ* y las estimaciones de K y S se han realizado de acuerdo a Vandervaere et al., (2.000a y 2.000b). El aparato utilizado para las mediciones es un infiltrómetro de disco a tensión (Model 2.800 Guelph Permeameter).

Los resultados exponen que las prácticas agrícolas convencionales han provocado una degradación de la estructura del suelo, tal como lo revela el incremento de Dap y la disminución de PT, suceso vinculado a la declinación de MO y al peso de la maquinaria. Esto ha derivado en que el sistema poroso del suelo cambie, manifestando una reducción de un 6% de volumen de macroporos anchos en el sitio agrícola (SAG). Sin embargo, con el potencial

---

<sup>1</sup> Tesista

<sup>2</sup> Director de Tesis

utilizado (-2cm), la distribución de tamaños de poros que ha participado en el proceso de infiltración ha sido similar entre sitios. Cabe destacar que con éste potencial, en las mediciones del sitio aibal (SA) no ha sido captado un 5% de volumen de macroporos anchos, mientras que en SAG ha participado el volumen total de poros.

La similitud entre sitios en la distribución de tamaños de poros, ha derivado en no encontrar diferencia significativa entre las medias de K. Sin embargo, se puede afirmar en forma contundente que el aibal presenta una mejor capacidad de infiltración que el sitio agrícola. Esto se fundamenta en que el valor de la conductividad hidráulica saturada  $K_s(\Psi=0)$  de SA, es considerablemente mayor al valor  $K(\Psi=-2)$ , debido al 5% de volumen de macroporos anchos que no ha participado en la infiltración. En cambio, para el caso de SAG,  $K_s(\Psi=0)$  coincide con el valor obtenido con el potencial -2cm, ya que con el mismo, ha participado el total del volumen de poros. También se destaca que con éste potencial, se observa una clara tendencia de valores mayores para el caso de SA, hecho vinculado a la mejor estructura del suelo del aibal que favorece la continuidad de los poros y, en un grado menor, a que en SA ha participado 1% más de volumen de macroporos.

Lo expuesto, demuestra que la capacidad de captación de agua de la depresión se ve disminuida, lo que deriva en una menor disponibilidad de agua para las plantas y para la recarga de acuíferos, situación que se agrava debido a las condiciones semiáridas del lugar.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Gran Chaco es una región fitogeográfica de gran extensión en Sudamérica, con una vegetación de bosque xerofítico (Morello y Adámoli, 1.974). Se ubica dentro de una región semiárida a subhúmeda, con precipitaciones que oscilan entre unos 1.200mm anuales en el este hasta un mínimo de 450mm en el suroeste. Su régimen es fuertemente estacional, con más del 80% de la lluvia concentrada en el verano (Bucher, 1.980).

En las últimas décadas, en el centro este de la provincia de Santiago del Estero, que integra la Subregión Chaco Semiárido perteneciente a la Región Chaqueña (Red Agroforestal, 1.999), se produjo una marcada expansión de la actividad agrícola. Esto se debió a la aplicación de políticas de subvención del cultivo del algodón y al salto climático registrado en los últimos 30 años (Minetti y Acuña, 1.994), que mejoró las condiciones climáticas para esta actividad. Como consecuencia de ello, la superficie de tierra con cobertura de vegetación natural integrada por bosque y sabana, disminuyó desde un 90% existente en 1.975 hasta el 54% en 1.997, principalmente por la transformación de unidades de sabana (Lorenz et al., 2.000).

Diversos estudios reflejan que la actividad agrícola impacta en forma negativa sobre algunas propiedades de los suelos. En este contexto, en pocos años las prácticas agrícolas tradicionales disminuyen los niveles de materia orgánica (Blank y Fosberg, 1.989), promoviendo la degradación continua de la estructura del suelo (Gavande, 1.991). Precisamente, estudios realizados en el área de estudio, demuestran que este cambio en el uso de la tierra redujo en forma significativa el contenido de la materia orgánica del suelo, su estabilidad estructural y el volumen de macroporos (Lorenz et al., 2.000).

Esta degradación de la estructura del suelo que disminuye la macroporosidad, hace suponer (hipótesis) una alteración negativa en sus propiedades hidráulicas. De esta forma, se perturbarían algunas de las funciones físicas más críticas que cumple el suelo en un ecosistema (Nearing et al., 1.990; Karlen y Stott 1.994), como la de permitir la entrada de agua a través de la superficie y la de facilitar su transporte interno. En un relieve ondulado, esto implicaría un incremento de la escorrentía hacia el bajo por parte de la ladera y la planicie alta, exigiendo una mayor capacidad de captación de agua a la depresión. Además, como los suelos en la depresión también disminuyen su capacidad funcional de sumidero, el riesgo que se presentaría es el incremento en la pérdida de agua de la subcuenca, debido a un aumento en la escorrentía y en la evaporación, resultando perjudicial para el ecosistema por las condiciones semiáridas del lugar.

Por lo expuesto, el **objetivo** de este estudio es “comparar las propiedades hidráulicas superficiales del suelo en ambientes sumideros de escorrentía, con vegetación natural de pastizal y uso agrícola”, para establecer el efecto de la agricultura en dichas propiedades.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudio

En la figura 1 se muestra el área de estudio, que se ubica en el centro este de la provincia de Santiago del Estero (entre 62°06'W y 61°52'W y 27°24'S y 28°00'S). Forma parte de la Subregión Chaco Semiárido perteneciente a la Región Chaqueña (Red Agroforestal, 1.999). Esta Región es una enorme planicie de aproximadamente un millón de kilómetros cuadrados que se extiende desde latitudes definitivamente tropicales (18°S), hasta ambientes claramente subtropicales (31°S), abarcando desde los 57° Oeste hasta los 66° Oeste, sobre partes de Bolivia, Paraguay, Brasil y Argentina. Su vegetación, un mosaico de bosques, montes, sabanas y pastizales, aunque heterogénea en fisionomía y ecología, alberga muchos elementos florísticos y faunísticos que la caracterizan como una gran unidad biogeográfica (Morello y Adámoli, 1.968).

El clima de la zona es semiárido, mesotermal, según la clasificación de Thornthwaite (Boletta et al., 1.992), con registros de temperatura media anual de 19,6 °C, temperatura media mensual del mes más caliente (Enero) de 28 °C y del mes más frío (Julio) de 16,3 °C. Los extremos térmicos van desde temperaturas superiores a los 47 °C y un registro de mínima absoluta de -10 °C. Las precipitaciones oscilan entre 600 y 750mm anuales, concentradas en un 60% en el período primavera-verano. El balance hídrico presenta déficit en la mayoría de los meses del año. Los vientos que predominan son del cuadrante sur y norte, siendo calientes y desecantes los del cuadrante norte a fines de invierno y a principio de la primavera (Ledesma y Boletta, 1.972; Boletta, 1.988).

La geomorfología de la zona corresponde a una planicie levemente ondulada (Planicie de Santa Fé), con laderas que convergen en una depresión con orientación norte-sur (Ministerio de Defensa, 1.978). Este relieve responde a un sistema de bloques cuya estructura se organiza a lo largo de una gran falla regional de rumbo norte-sur, que corre paralela al límite Chaco-Santiago del Estero, coincidiendo aproximadamente con el meridiano 62° 10' O. El agua que el bajo recibe de las laderas, drena hacia una gran depresión (bajos submeridionales), contribuyendo a la formación de lagunas saladas (Red Agroforestal, 1.999).

Los suelos son del tipo isohúmicos, en cuya génesis son característicos los contrastes estacionales. Ello permite la maduración bioclimática de la materia orgánica del suelo, que se caracteriza por una incorporación profunda (Ah espeso), muy humificada y polimerizada, de tonalidad oscura y con un grado de saturación de bases (Ca y Mg) generalmente elevado (Duchaufour, 1.975). Los suelos originados a partir de sedimentos loésicos, se sitúan espacialmente en función del relieve, según la siguiente catena (Lorenz et al., 2.000): (a) Siltic



Kastanozems (ISSS Working Group RB, 1.998; Torriorthentic Haplustolls, Soil Survey Staff, 1.998) en la planicie alta y ladera y (b) en la depresión, Siltic, Luvic y Pachic Phaeozems (ISSS Working Group RB, 1.998; Typic Haplustolls, Soil Survey Staff, 1.998). Cabe destacar que la textura de los mismos corresponde a la clase franco limoso.

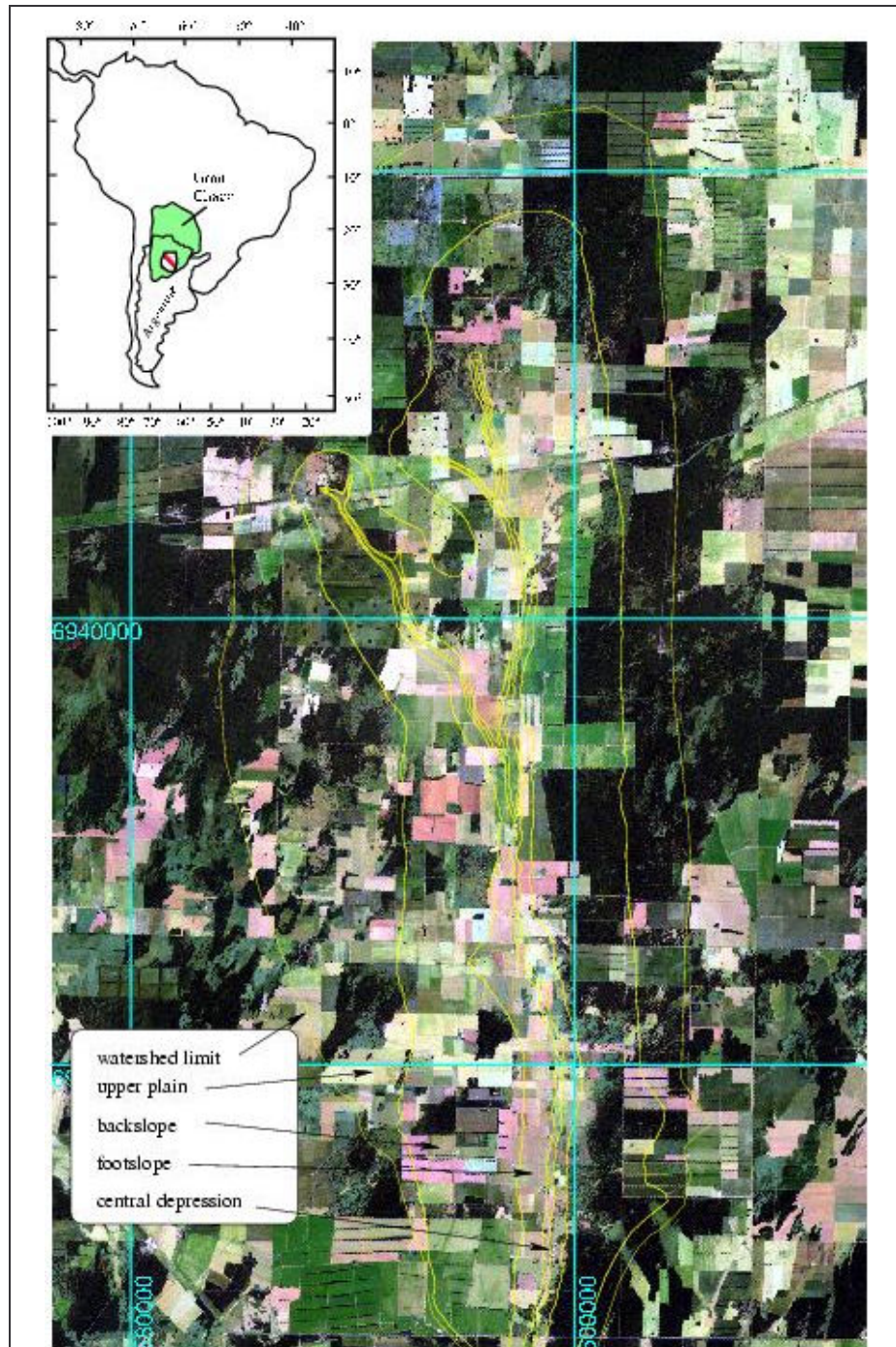


Figura 1. Área de estudio: watershed limit (limite de la subcuenca); upper plain (planicie alta); backslope (ladera); footslope (pie de ladera); central depression (depresión central).

La vegetación natural se distribuye espacialmente en función del relieve, con bosque xerofítico en la planicie alta y ladera, y sabana en la depresión. La descripción de Cabrera (1.971) sostiene que el bosque presenta dos especies principales en su estrato superior que dominan la comunidad clímax, el *Schinopsis Lorentzii* (quebracho colorado santiagueño) y el *Aspidosperma quebracho - blanco* (quebracho blanco). También se encuentran en este estrato especies arbóreas de menor porte, tales como el *Prosopis kuntzei* (itín), *Prosopis nigra* (algarrobo negro), *Ziziphus mistol* (mistol); con menor frecuencia están presentes el *Prosopis alba* (algarrobo blanco), *Cercidium praecox* (brea), *Jodina rhombifolia* (sombra de toro) y *Acacia aroma* (tusca). Las especies arbustivas que se destacan son *Celtis pallida* (tala pispita), *Acacia furcatispina* (teatín), *Mimosa detinens* (garabato blanco), *Acacia praecox* (garabato blanco) y *Capparis atamisquea* (atamisqui). Las cactáceas presentes con más frecuencia son *Opuntia quimilo* (quimil), *Stetsonia coryne* (cardón), *Cereus validus* (ucle) y *Opuntia salmiana* (llora tigre). En el estrato arbóreo se pueden encontrar especies de gramíneas que pertenecen a los géneros *Setaria*, *Trichloris*, *Digitaria*, *Gouinia*, *Chloris*, entre otras. Por último, las bromeliáceas están representadas por especies epífitas del género *Tillandsia*, y por especies terrestres los chaguares (*Bromelia serra* y *B. hieronymi*).

Con respecto a la sabana (aibal de pampas), dominan especies del género *Elionurus* (Morello y Adámoli 1.974), alcanzando valores de entre 30 y 90% de cobertura (Cabrera y Willink 1.973, Kunst et al., 1.985). El aibal está formada por dos elementos estructurales: la mata de *Elionurus* y los pastos que ocupan el espacio entre matas, que pueden ser especies de valor forrajero tales como *Pappophorum saccharoides*, *Pappophorum alopecuroideum*, *Chloris polydactyla*, entre otras (Morello y Adámoli 1.974). Las matas de aibe son cespitosas, con rizoma muy breve y de forma semicircular, de 40-50cm de altura. Poseen una gran densidad de hojas finas y alargadas que contienen terpeno citral, característica que le otorga gran inflamabilidad (Burkart 1.969), y que junto al clima de la región, transforma a las sabanas en un ambiente propenso al fuego. Cabe destacar que el aibal de pampas ha evolucionado con fuegos recurrentes, pero que se producían en períodos largos (no hay datos, pero en otros lugares el lapso de repetición de incendios en un mismo lugar, oscila entre 8 y 25 años). El fuego como factor de selección permitió que predomine la especie más resistente (aibe), que solo es palatable durante un corto período después del incendio, por lo que es considerada como el elemento menos productivo de pastizal (la mata de aibe). Con la llegada del hombre blanco el ritmo de los incendios se hizo anual, y eso debe haber influido enormemente sobre la estructura del pastizal, posiblemente eliminando las especies sensibles al fuego y alterando las relaciones entre especies. Por otro lado, la incorporación del ganado

debe haber acelerado el proceso iniciado por el fuego anual, que básicamente habrá consistido en una disminución de la importancia relativa de las especies más palatables y de las más sensibles al fuego (a veces la sensibilidad al fuego va unida a la alta palatabilidad). La suspensión del fuego y del pastoreo aumenta la biomasa de ese elemento “entre matas”, rico en forrajeras pero sensible a los incendios. Aún cuando se suspenda el fuego y se saquen los animales, la relación entre las superficies que ocupan ambos elementos se mantiene constante. El aibe no deja que el elemento pasto entre matas se extienda (Morello y Adámoli 1.974).

## 2.2 Unidades de Estudio

Las unidades de estudio corresponden a una sección representativa de la subcuenca en cuanto a su funcionalidad y al tipo de uso de la tierra. En tal sentido, la posición fisiográfica que presentan en la catena es la depresión, cuya función es la captación del agua proveniente de las laderas y la planicie alta. Debido a que la agricultura es el factor considerado que influye en forma significativa en las propiedades hidráulicas del suelo, se establecen como unidades de estudio: (i) área con cultivos agrícolas prolongados (más de 10 años), antes ocupada por pastizal y (ii) área con vegetación natural de pastizal, eventualmente afectado por el uso ganadero. Posiblemente, en el pasado el ganado también transitó ésta área. En La figura 2 se expone una vista panorámica de las unidades de estudio, apreciándose en primera instancia el ambiente de aibal y en su parte posterior el área agrícola. También se visualiza, contiguo al área con cultivo, el bosque xerofítico de una de las laderas de la subcuenca.



Figura 2. Vista panorámica de las unidades de estudio.



En el área agrícola al principio se cultivaban granos, tales como sorgo y maíz, pasando a una segunda etapa con cultivos de algodón y en los últimos años a soja. Esta secuencia de cultivos está vinculada a los cambios sucedidos en el mercado. El tipo de labranza utilizado es el convencional, que consiste en operaciones de labranza primaria y secundaria para la preparación de la cama de siembra. Para ello, se usa el arado de reja y vertedera en la labranza primaria, seguida por la labranza secundaria con el uso de rastra de discos o dientes, y también por alguna limpieza mecánica en control de malezas, dejando al suelo prácticamente desnudo. En ésta área agrícola nunca se utilizó fertilizantes.

### 2.3 Parámetros de Evaluación

En la tabla 1 se puede apreciar los parámetros del suelo que se utilizan en este trabajo, debido a que están vinculados al proceso de infiltración.

**Tabla 1. Parámetros del suelo vinculados al proceso de infiltración.**

Parámetros de evaluación del sistema poroso	Parámetros de evaluación del proceso de infiltración	Parámetros complementarios
- Porosidad total y densidad aparente <sup>1</sup> - Distribución de tamaños de poros	- Conductividad hidráulica - Sorptividad	- Materia orgánica del suelo - Humedad del suelo

1. Ambos parámetros evalúan en un mismo sentido la estructura del suelo, presentando una relación inversamente proporcional entre ellos.

Es importante destacar que el sistema poroso juega un rol de suma importancia en el proceso de infiltración. Es afectado en forma negativa por la degradación de la estructura del suelo, suceso vinculado a la disminución del contenido de la materia orgánica y al peso de la maquinaria utilizada en la actividad agrícola.

Los parámetros que reflejan el proceso de infiltración son la conductividad hidráulica (K) y la sorptividad (S). Precisamente, la comparación de estos parámetros entre el ambiente natural aibal y el agrícola, va a reflejar el efecto que presenta la actividad agrícola sobre la capacidad de infiltración en la sección baja de la subcuenca, cuya funcionalidad es la captación de agua proveniente de las zonas más altas.

#### 2.3.1 Parámetros de evaluación del sistema poroso

El suelo representa un sistema poroso que se caracteriza por: tamaño, forma, continuidad y proporción de los poros. Está vinculado al balance de agua (entradas y salidas del sistema), en

el funcionamiento hídrico (relaciones agua planta), en la entrada y difusión de gases y de calor, y en el desarrollo y crecimiento de las raíces (Gil, 2.001).

### ***Porosidad total y densidad aparente***

La porosidad total PT ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) es el volumen total de espacios vacíos del suelo (poros), (Duchaufour, 1.975). Disminuye con el debilitamiento de la estructura del suelo (Thompson, 1.965).

La densidad aparente Dap ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) es la masa por unidad de volumen aparente del suelo, incluido los vacíos (Bonneau, 1.987). Tiene una relación inversamente proporcional con la porosidad total.

La densidad aparente puede ser incluida dentro del grupo mínimo de parámetros para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura, la resistencia mecánica y la cohesión del mismo (Doran y Parkin, 1.994). Cambios en la densidad aparente reflejan cambios en la estructura del suelo, debido a la relación existente entre ésta y la porosidad total. Los suelos que presentan compactación por diversos motivos, incrementan su densidad aparente, reduciendo significativamente tanto la conductividad hidráulica como la sorptividad del suelo (Angulo- Jaramillo et al., 1.997).

### ***Distribución de tamaños de poros***

La distribución de tamaños de poros hace referencia a la proporción de cada clase de tamaños de poros de acuerdo con su funcionalidad (Tab. 2). Es una característica importante del sistema poroso que contribuye en el comportamiento hídrico del suelo (Gil, 2.001).

**Tabla 2. Rangos de tamaños de poros del suelo y su importancia para la biota.**

<b>Tipo de poros</b>	<b>Diámetro de poros (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tensión de agua (pF)</b>	<b>Importancia para la biota</b>
Macroporos anchos	> 50	0 - 1,8	Aireación, drenaje rápido
Macroporos estrechos	10 - 50	1,8 - 2,5	Aireación, agua disponible, espacio para las raíces de plantas superiores
Mesoporos	0,2 - 10	2,5 - 4,2	Agua disponible, espacio para microorganismos y plantas inferiores
Microporos	< 0,2	> 4,2	Agua no disponible, espacio no accesible para la biota

Esta distribución puede ser descripta mediante métodos indirectos basados en la retención de agua por los poros. Ellos, retienen agua debido a fuerzas capilares según:

$$h = 2\sigma * \cos \alpha / r * \rho_a * g \quad \text{donde:}$$

h: altura del ascenso capilar;

$\sigma$ : tensión superficial del agua;

$\alpha$ : ángulo de contacto entre agua y pared capilar;

r: radio del capilar;

$\rho_a$ : densidad del agua;

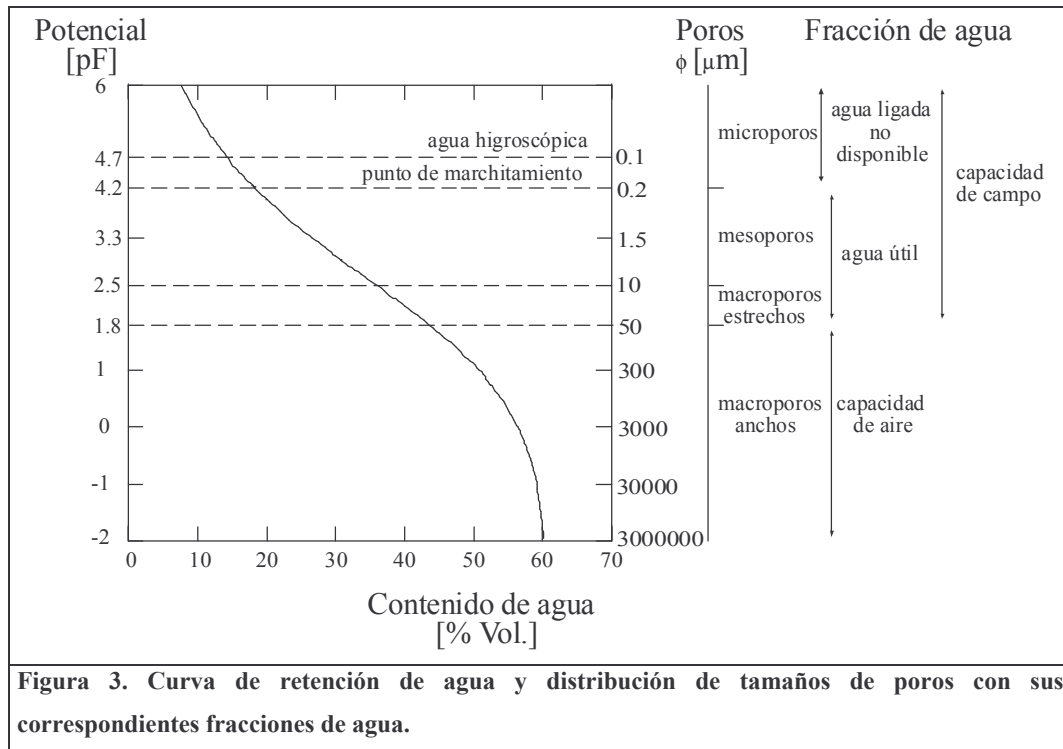
g: aceleración de gravedad.

y, poniendo los valores constantes, como  $h = 0,15 / r$ .

Según la FAO 1.984, citado por Lorenz 1.997, el ascenso capilar h, inversamente proporcional al radio r del capilar, refleja la succión con la cual el capilar o poro retiene el agua. Corresponde a la presión hidrostática negativa de una columna de agua de la misma altura h. Para extraer agua del suelo, una planta tiene que superar la fuerza con la que el suelo la retiene y que es función del tamaño de los poros. Esta succión representa un nivel energético y se denomina potencial, y como el sistema de poros está formado por la fase sólida, la matriz del suelo, también se denomina potencial matricial. Otros términos que se usan como sinónimos son retención, tensión o succión de agua. Se lo puede expresar en energía por volumen, que resulta en unidades de presión, como bar o cm de columna de agua; en la edafología es muy común la unidad [pF], que es el logaritmo decimal de la succión en cm de columna de agua. El potencial matricial está en función de los diámetros de poros y es responsable (i) de la disponibilidad de agua para las plantas (junto con el potencial osmótico) y (ii) del almacenamiento y (iii) del movimiento del agua en el suelo junto con el potencial de gravedad.

La relación entre el potencial matricial y el contenido de agua, se conoce como curva de retención de agua (Fig. 3). Es una curva acumulativa del contenido de agua en función del aumento del potencial matricial. Como la retención de agua por la matriz se debe a fuerzas capilares en el sistema poroso, la curva proporciona al mismo tiempo la distribución de los tamaños de poros (Fig. 3).

Según la intensidad con que el agua está fijada por la matriz del suelo, se distinguen fracciones de agua que se caracterizan por su movilidad y su disponibilidad para las plantas. Las fracciones se pueden determinar mediante la curva de retención de agua, aunque las definiciones para ellas tienen su origen en la descripción de ciertas situaciones *in situ*.



Las fracciones de agua que se distinguen son (Duchaufour, 1.975) (ver Fig. 3):

- ❖ *agua higroscópica* ( $> pF 4,7$ ): es el agua absorbida por el suelo a expensas de la humedad atmosférica; forma una delgada película alrededor de las partículas del suelo y es retenida energéticamente por éstas; no es susceptible al movimiento y no es absorbible por las raíces;
- ❖ *agua capilar o ligada, no absorbible* ( $> pF 4,2$ ): llena los espacios capilares más finos del suelo; difícilmente circula en el suelo y todavía es retenida demasiado energéticamente como para poder ser absorbida por las plantas;
- ❖ *agua capilar absorbible*: llena los poros de tamaño intermedio; es absorbible por las raíces, constituyendo la fuente esencial de la alimentación en agua de las plantas durante la estación seca. Es susceptible de moverse por difusión capilar;
- ❖ *capacidad máxima de agua* ( $> pF 0,6$ ): designa la máxima cantidad de agua que puede absorber el suelo; el valor coincide casi con la porosidad del suelo;
- ❖ *capacidad de campo* ( $> pF 1,8, 2 \text{ ó } 2,5$ ): se define por aquella fracción de agua que retiene el suelo contra la gravedad después de haber estado saturado totalmente con agua. Es un estado de equilibrio regulado por el drenaje de los poros mayores. Se considera el valor límite entre  $pF 2,5$  y  $pF 2$  como límite en los suelos de buen drenaje con alta distancia a la napa freática ( $> 3m$ ), con una textura gruesa ( $\geq$  franco limosos) y ausencia de discontinuidades grandes en el sistema poroso en la vertical. A diferencia, se toma el valor

de pF 1,8 cuando el suelo tiene un drenaje desacelerado por poca distancia a la napa freática, una textura fina ( $\leq$  franco limoso) y/o discontinuidades en el sistema poroso.

### **2.3.2 Parámetros de evaluación del proceso de infiltración**

La infiltración (I) es la cantidad de agua que ingresa al perfil del suelo a través de su superficie, y se moviliza en él (Gavande, 1.991). Posee un rol fundamental en los procesos de escorrentía, en la recarga de humedad del suelo y de acuíferos. Su velocidad determina la cantidad de agua de escurrimiento superficial y con ello el peligro de erosión hídrica. Por ello, la infiltración del agua en el suelo ha sido intensamente estudiado debido a su importancia en el manejo del agua en la agricultura, la conservación del recurso suelo y otras actividades silvoagropecuarias (Kramer 1.989).

El proceso de infiltración puede ser descrito por modelos unidimensionales (1D) o tridimensionales (3D). Analíticamente, los modelos 1D son más simples que los 3D, debido a que contemplan el flujo de infiltración en una sola dirección (vertical). En cambio los 3D, contemplan el flujo en todas las direcciones. En este estudio, se ha utilizado el modelo tridimensional de Vandervaere et al., (2.000a y 2.000b) descrito en la página 19. Los parámetros conductividad hidráulica K (mm/h) y sorptividad S ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1/2}$ ), que integran el modelo utilizado, reflejan el proceso de infiltración, quienes a su vez están vinculados con el sistema poroso del suelo. La conductividad es la capacidad del suelo para transmitir agua (Klute y Dirksen, 1.986). Por su parte, la sorptividad, que se desprende del modelo unidimensional de Philip ( $I = S\sqrt{t}$ ), es la capacidad que tiene un suelo para absorber agua por capilaridad (Philip, 1.957). La misma, está definida analíticamente como una función del contenido de agua del suelo (Philip y Knight, 1.974).

Cuando una fuente de agua se pone en contacto con la superficie del suelo, las etapas iniciales del movimiento del agua hacia el interior del perfil, son dominadas por las propiedades capilares del suelo. En estado estacionario, el flujo de agua es gobernado por un factor hidráulico, un factor gravitacional y un factor de capilaridad. Cuando el suelo está seco, la tasa de infiltración inicial es alta debido a la sorptividad (por ejemplo: alto gradiente de potencial mátrico entre el suelo y la lámina de agua aplicada), pero a medida que transcurre el tiempo la velocidad de infiltración alcanza una tasa constante o "estacionaria".

### **2.3.3 Parámetros complementarios**

Los parámetros complementarios son la materia orgánica y la humedad del suelo, que influyen respectivamente en el sistema poroso y en el ingreso del agua al suelo, y se necesitan para la interpretación de los resultados.



La materia orgánica del suelo (MOS) está conformada por materiales orgánicos frescos, las sustancias en proceso de descomposición (hidratos de carbono, lípidos, etc.) y productos resultantes del proceso de humificación. Durante su descomposición, sustancias como los compuestos urónicos, las gomas y resinas, unen las partículas del suelo para formar agregados (Gavande, 1.991). Por ello, ejerce una gran influencia en la estructura de suelo: disposición de las partículas elementales (arena, limo y arcilla) que forman unidades compuestas, separadas de las contiguas, y que tienen propiedades diferentes de las de una masa igual de partículas elementales sin agregación (Gavande, 1.991). Por lo tanto, su disminución debilita la ordenación estructural y la estabilidad de los agregados. También contribuyen a este fin, el uso de maquinaria pesada en las prácticas agrícolas, la exposición a la acción directa de las gotas de lluvias (Thompson, 1.965) y el uso ganadero.

Esta situación afecta al sistema poroso del suelo (Duchaufour, 1.975), cuyos parámetros de evaluación corresponden a la porosidad total (densidad aparente) y la distribución de los tamaños de poros. En este contexto, los mismos permiten evaluar el estado de la estructura en un momento dado.

La humedad volumétrica ( $H_v$ ) es la relación entre el volumen de la fracción líquida y el volumen aparente del suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) (Gil, 2.001). El contenido de humedad es un factor que influye en la velocidad de infiltración (Gavande, 1.991). Precisamente, el modelo de infiltración de Vandervaere que se utiliza en este estudio (ver punto 2.5.1; Pág. 19), requiere de los valores de humedad volumétrica inicial ( $H_{vi}$ ) y final, o sea, el valor antes de la medición de infiltración y el posterior.

El total de agua que entra en un suelo, es mayor cuando el suelo está seco que cuando está mojado, sin embargo, la velocidad con que el agua avanza a través de su perfil, es menor cuando el suelo está seco (Gavande, 1.991).

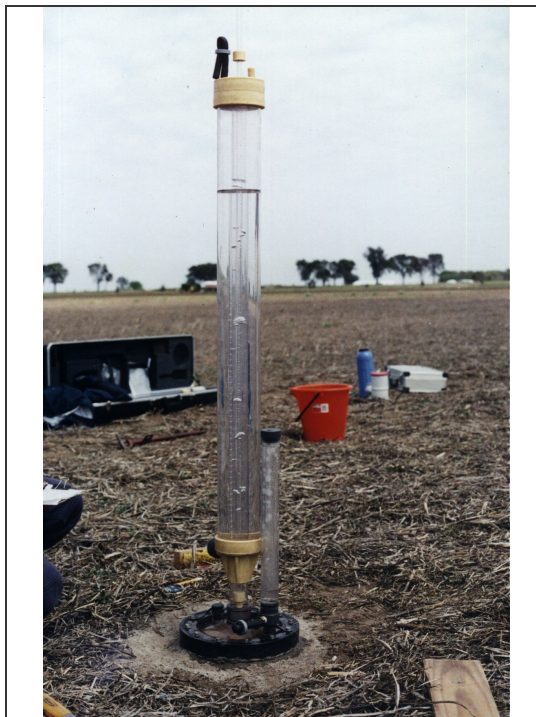
#### **2.4 Infiltrómetro de Disco a Tensión**

El desarrollo y mejoramiento de métodos y equipos para la medición e interpretación de las propiedades físicas de los suelos, ha permitido últimamente avanzar en los conocimientos del funcionamiento hídrico en particular.

La tasa de infiltración, ocasionalmente medida con cilindros, muchas veces resulta imprecisa e insume mucho tiempo. En nuestro país, los métodos de laboratorio sobre muestras de suelo no disturbado, siguen siendo hasta el presente muy utilizados, constituyendo el patrón de referencia de otras técnicas. Sin embargo, para que cumplan dicha función, debe presentar una serie de requisitos tanto en el diseño de los equipos como en el tratamiento de

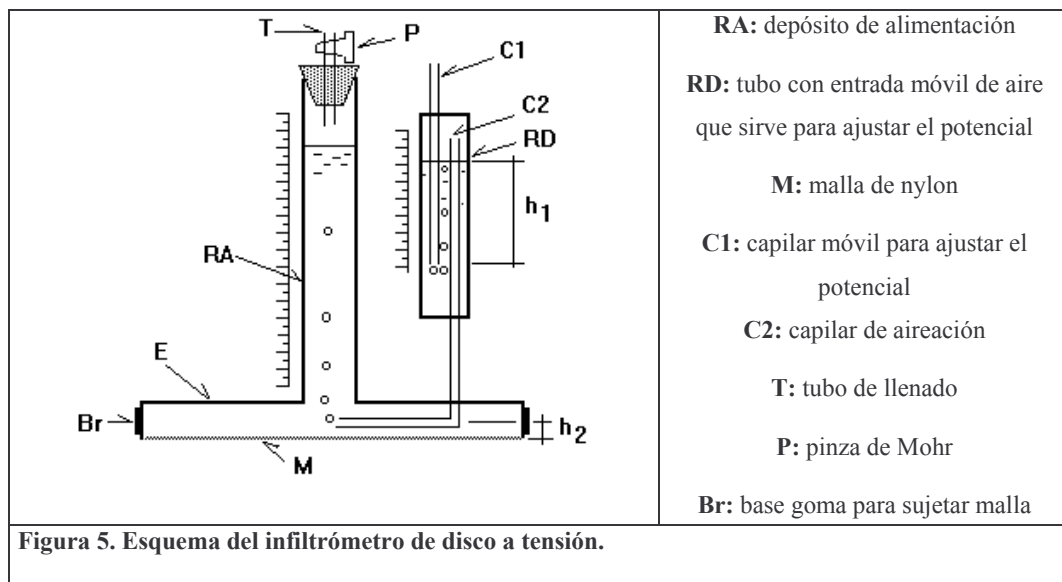
las muestras, preparación de la solución, etc. No obstante, uno de los principales inconvenientes está dado por el volumen relativamente pequeño de la muestra, que no resulta así representativo de los macroporos, grietas y otros detalles de la estructura que se presentan en el campo. Otro inconveniente reside en la forma en que son extraídas las muestras, mediante golpes o aplicando presión, afectando la continuidad de los macroporos, subestimando o sobrestimando el verdadero valor de la conductividad hidráulica. Estos inconvenientes pueden ser salvados en gran medida, efectuando las mediciones directamente en el sitio de estudio. Recientemente, el desarrollo del permeámetro Guelph ha permitido, con una confiabilidad y rapidez aceptable, medir *in situ* la infiltración en condiciones de saturación y no saturación (Gil, 2.001).

Precisamente, el aparato utilizado (Fig. 4) en este estudio para realizar las mediciones de infiltración *in situ*, corresponde al infiltrómetro de disco a tensión (Model 2.800 Guelph Permeameter). El mismo, descrito por Perroux y White (1.988) está siendo ampliamente usado para determinar, sin disturbar el suelo, propiedades hidráulicas "*in situ*" de suelos saturados o cercanos a la saturación (Clothier y White, 1.981; Wilson y Luxmoore, 1.988; Smettem et al., 1.995).



**Figura 4. Infiltrómetro de disco a tensión (Model 2.800 Guelph Permeameter). Foto tomada en la realización de las mediciones preliminares de este estudio.**

La figura 5 muestra un esquema del infiltrómetro utilizado. Posee un disco de 20,5cm de diámetro, cubierto en su base por una membrana fina de nylon (M) con poros de 20 $\mu$ m de diámetro, por los cuales pasa el agua desde el aparato hacia el suelo. El tubo RA (diámetro 35,24cm) sirve de depósito de agua para la infiltración y lleva una escala graduada que permite leer los volúmenes de agua infiltrados en función del tiempo. En el interior de este tubo, se encuentra un tubo de menor diámetro (2,13cm) que presenta la misma función. Las mediciones pueden realizarse tanto con el tubo grande como con el pequeño. El tubo (RD) posee una entrada móvil de aire (C1), que se usa para ajustar el potencial de agua ( $\Psi$ ) en la base de la malla de nylon. El  $\Psi$  es la diferencia entre  $h_2$  y  $h_1$  ( $h_2 - h_1$ ).



Este sistema permite discriminar, en función del potencial establecido, la intervención de determinados tamaños de poros en el proceso de infiltración. Es decir, aquellos poros que presentan un grado de succión mayor al potencial fijado en el aparato, participan en la infiltración.

## 2.5 Metodología

Las fases desarrolladas en la elaboración del trabajo son:

- ❖ elección del modelo de infiltración y el método para la estimación de K y S;
- ❖ elección del sitio de medición para cada unidad de estudio;
- ❖ mediciones de infiltración *in situ* y toma de muestras de suelo;
- ❖ análisis de las muestras de suelo en laboratorio;
- ❖ análisis estadístico.

### 2.5.1 Elección del modelo de infiltración y método para la estimación de K y S

#### *Modelo de infiltración de Vandervaere et al., (2.000a y 2.000b)*

Este modelo describe en forma adecuada el flujo transitorio tridimensional de la infiltración, mediante la siguiente ecuación:

$I = C_1\sqrt{t} + C_2t \quad [1] \quad \text{donde:}$	<p><b>I</b> = Infiltración acumulativa  <b>S</b> = Sorptividad  <b>K</b> = Conductividad hidráulica  <b>R</b> = Radio del disco (mm)  <math>\beta</math> = Constante = 0,6  <math>\gamma</math> = Constante = 0,75  <math>\theta_n</math> = Humedad volumétrica inicial del suelo  <math>\theta_0</math> = Humedad volumétrica final del suelo</p>
$C_1 = S \quad [2] \quad \text{y}$	
$C_2 = \frac{2-\beta}{3}K + \frac{\gamma S^2}{R(\theta_0 - \theta_n)} \quad [3]$	

El coeficiente  $C_1$  está relacionado a la fuerza de la capilaridad vertical y es lineal a la raíz cuadrada del tiempo. En cambio el coeficiente  $C_2$ , es lineal al tiempo y está relacionado mediante el componente  $((2-\beta)/3)K$  a la fuerza de la gravedad y, mediante el componente  $\gamma S^2 / R(\theta_0 - \theta_n)$  a la fuerza de la capilaridad lateral. Ambos son los parámetros de la ecuación y están vinculados a la sorptividad y a la conductividad hidráulica. En consecuencia, determinarlos en forma adecuada es de suma importancia para lograr una estimación aceptable de K y S.

La importancia de  $C_1$  es máxima en el comienzo del proceso de infiltración. A medida que el tiempo incrementa, éste comienza a ser progresivamente dominado por la combinación de los otros dos términos ( $C_2$ ), lineales a t.

Las constantes  $\beta$  y  $\gamma$  son parámetros de ajuste de la ecuación, con un valor fijado en 0,6 para la primera. Con respecto a la segunda, Smettem et al., (1.994) ha demostrado mediante la comparación de resultados experimentales que el valor apropiado es de 0,75.

#### **Determinación de los coeficientes $C_1$ y $C_2$**

La técnica “Linearización Diferenciada” (LD) es la más adecuada para determinar fehacientemente los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$  (Vandervaere et al., 2.000a). La misma consiste en la linearización de los datos mediante la diferenciación de la infiltración acumulativa con respecto a la raíz cuadrada del tiempo.

De la aplicación de esta técnica en la ecuación [1] resulta:

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = C_1 + 2C_2\sqrt{t} \quad [4]$$

donde  $dI / d\sqrt{t}$  está aproximado por:

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} \approx \frac{\Delta I}{\Delta\sqrt{t}} = \frac{I_{i+1} - I_i}{\sqrt{t_{i+1}} - \sqrt{t_i}} \quad (i = 1. .n - 1) \quad [5]$$

donde  $n$  es el número de puntos del set de datos y  $\sqrt{t}$  es calculada como la media geométrica:

$$\sqrt{t} = \left[ \sqrt{t_i t_{i+1}} \right]^{1/2} \quad (i = 1. .n - 1) \quad [6]$$

La ecuación [4] manifiesta que el gráfico  $\Delta I / \Delta\sqrt{t}$  vs.  $\sqrt{t}$  debe ser lineal, con  $C_1$  igual a la ordenada al origen y  $C_2$  igual a la mitad de la pendiente. En el caso de no ser lineal (caso de la curva Medición 2, técnica LD; Fig. 6), la ecuación [1] debe ser considerada inapropiada, debido a que sería probable que los valores de los coeficientes no sean físicamente significativos.

La técnica LD presenta ciertas ventajas comparada con otras tales como el Flujo de Infiltración (FI), la Infiltración Acumulativa (IA) y la Linearización Acumulativa (LA) (Vandervaere et al., 2.000a). En tal sentido, la técnica LD:

- ❖ verifica si es apropiado utilizar la ecuación [1], mediante la linealidad del gráfico  $\Delta I / \Delta\sqrt{t}$  vs.  $\sqrt{t}$  ;
- ❖ detecta y permite eliminar la influencia de la capa de arena<sup>1</sup> en el comienzo del proceso de infiltración;
- ❖ detecta la discontinuidad que puede producirse durante la infiltración. Esta situación puede presentarse cuando se pierde el contacto hidráulico entre el disco del infiltrómetro y la capa de arena.

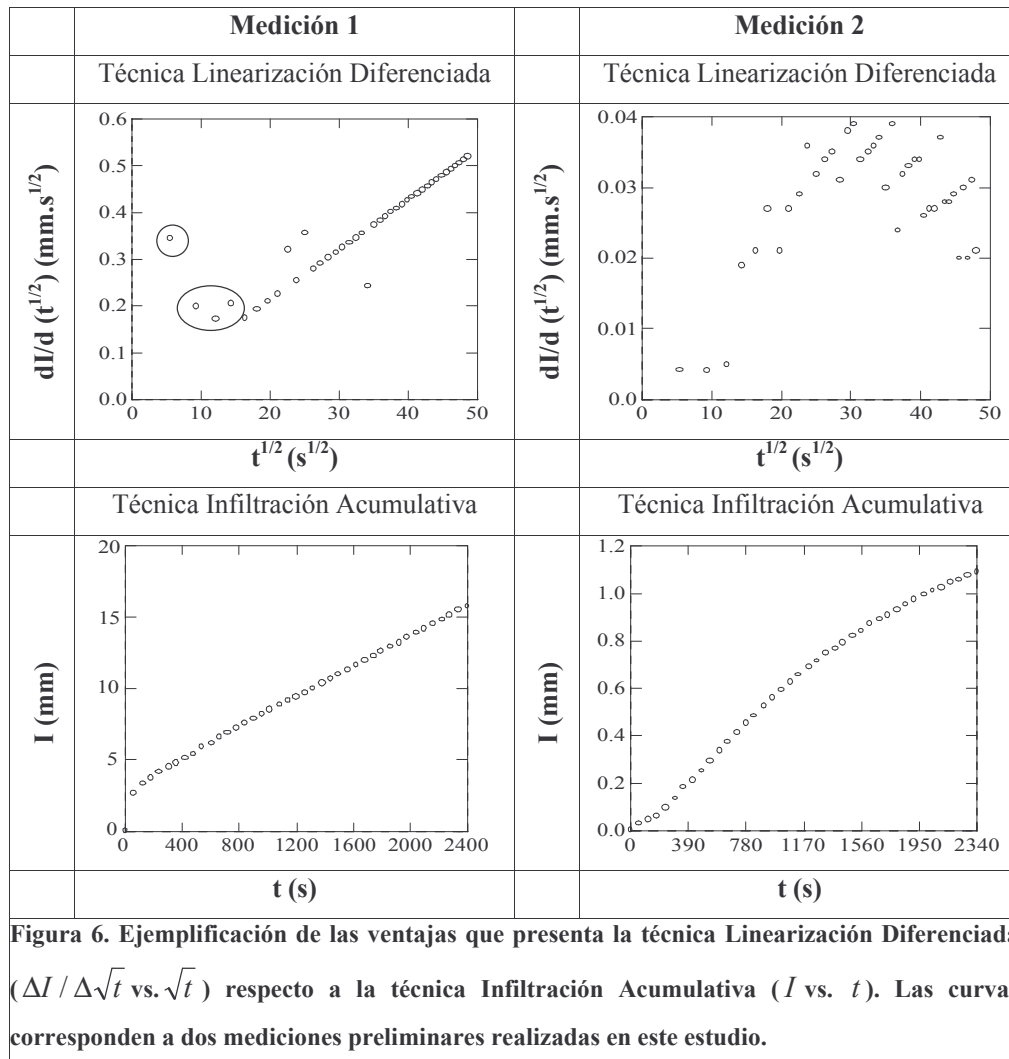
Las técnicas IA y FI se caracterizan por sobreestimar el valor del coeficiente  $C_1$  y por lo general producir un valor negativo del coeficiente  $C_2$ . Con respecto a la técnica LA, su aplicación directamente no es posible (Vandervaere et al., 2.000a).

A modo de ejemplificar las ventajas que presenta la técnica LD, se muestra en la figura 6 cuatro curvas que pertenecen a dos mediciones preliminares realizadas en este estudio. En la medición 1, se aprecia que la técnica LD sí detecta la influencia de la capa de arena en el

---

<sup>1</sup> La capa de arena se utiliza para lograr un adecuado contacto hidráulico entre el disco del infiltrómetro y el suelo.

comienzo del proceso de infiltración (puntos marcados con un círculo), realidad que no refleja la técnica IA. Con respecto a la medición 2, la técnica LD detecta en forma clara la discontinuidad producida en la infiltración a causa de la pérdida de contacto entre el disco del infiltrómetro y la capa de arena, situación que no refleja la técnica IA.



### ***Principios para la elección del método de medición***

El método de medición establece los parámetros vinculados al ajuste del infiltrómetro para realizar las mediciones, tales como la cantidad de potenciales y de radios de disco. Los cuatro métodos establecidos (Tab. 3) para la elección hacen uso de la ecuación [1] y cada uno tiene su propia fórmula para calcular K y S. La identificación del método más apropiado está en función de los valores que adquieren las variables que impulsan la infiltración, S y K, quienes determinan la importancia relativa de los tres componentes que conforman la ecuación [1].

**Tabla 3. Métodos establecidos para la elección con sus respectivas características.**

Método	Características
Simple Test (ST)	Utiliza un radio de disco y una presión
Multi-Radio (MR)	Utiliza dos o más radios de disco y una presión
Multi-Sorptividad (MS1)	Utiliza un radio de disco y dos o más presiones
Multi-Sorptividad (MS2)	Utiliza dos o más radios de disco y dos o más presiones.

La metodología de elección de Vandervaere establece que mediante la comparación entre el valor de  $S$  y  $S$  óptima ( $S_{opt}$ ), se determina cuál es el flujo que domina el proceso de infiltración y en función de ello, se establecen recomendaciones para elegir el método. El valor de  $S_{opt}$  se lo obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$S_{opt} = \sqrt{\frac{R\Delta\theta A}{\gamma}} \quad \text{donde:} \quad [7]$$

R: radio de disco;

A =  $((2 - \beta) / 3)K$ ; componente de la ecuación [1] relacionado a fuerza de la gravedad;

$\Delta\theta = (\theta_0 - \theta_n)$ ;

$\gamma = 0,75$ ; constante de la ecuación [1].

Dependiendo de la variación de  $C_1/C_2$  con respecto a  $S$ , pueden distinguirse tres situaciones (Vandervaere et al., 2.000b):

1. cuando  $S \ll S_{opt}$  (domina la gravedad), la estimación adecuada del coeficiente  $C_1$  se complica debido a la importancia del término gravedad. Esto corresponde a suelos que tienen una conductividad hidráulica relativamente alta comparada con su sorptividad. Las condiciones son buenas para la estimación de  $K$ ;
2. cuando  $S \gg S_{opt}$ . (domina la capilaridad lateral), la estimación adecuada del coeficiente  $C_2$  se complica debido a la importancia del término de la capilaridad lateral. Esto corresponde a suelos que tienen una conductividad hidráulica relativamente baja comparado con su sorptividad. Una estimación precisa de  $K$  es poco probable;
3. cuando  $S \approx S_{opt}$ , la estimación del coeficiente  $C_1$  se optimiza. Por lo tanto, en el comienzo del proceso de la infiltración el flujo de la capilaridad vertical es máximo. Los términos de la capilaridad lateral y de la gravedad tienen influencias equivalentes en el proceso del flujo. Una estimación precisa de  $K$  es posible.

Para conocer en cual de las tres situaciones se encuentra el suelo que se desea estudiar, es necesario realizar mediciones preliminares. Ello permite orientar al investigador en la elección. A continuación, se detalla como es el mecanismo a seguir.

Una vez que se dispone de las mediciones preliminares, se debe aplicar la técnica Linearización Diferenciada. Los resultados obtenidos pueden corresponder a dos situaciones:

- ❖ el gráfico  $\Delta I / \Delta \sqrt{t}$  vs.  $\sqrt{t}$  no presenta una linearidad significativa, lo que implica que la ecuación [1] no debe ser utilizada. Se recomienda utilizar los métodos de estado estable;
- ❖ el gráfico mencionado presenta una linearidad significativa, entonces se debe determinar los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$  por regresión lineal, sin considerar los primeros puntos que estén influenciados por la arena. Posteriormente, se calcula los valores de S y K con la ecuación [2] y [3] (método ST) y se calcula  $S_{opt}$  utilizando la ecuación [7] con  $\beta$  igual a 0,6.

En función de la comparación de los valores de S con los de  $S_{opt}$ , se presentan las siguientes situaciones y recomendaciones para la elección del método:

- ❖ cuando  $S \gg S_{opt}$ , la estimación de K es muy sensible a contener errores. Los métodos ST y MR deben ser obviados. Se recomienda utilizar el MS;
- ❖ cuando  $S \approx S_{opt}$ , la estimación de la sorptividad igual a  $C_1$  es fehaciente. La conductividad hidráulica puede ser razonablemente bien estimada con el método ST. Esta es la situación más apropiada para estimar S y K. El método MR también proveerá estimaciones aceptables tanto para K como para S;
- ❖ cuando  $S \ll S_{opt}$ , las condiciones son muy buenas para la estimación de K con los métodos MS y ST, pero una estimación precisa de la sorptividad es poco probable. El MR proveerá una buena estimación de K pero una estimación pobre de S. El MS1 y MS2 no son recomendados. Para mejorar la estimación de S, el radio de disco elegido debe ser bastante pequeño para acrecentar el término de la capilaridad lateral. La estimación de S también será mejorada cuando las condiciones iniciales son muy secas.

### ***Mediciones Preliminares***

El análisis de las mediciones preliminares ha permitido (i) definir los parámetros de medición y (ii) seleccionar el método de medición apropiado para estimar K y S.

#### (i) Definición de los parámetros de medición.

Los parámetros a definir son:

- ❖ potencial de medición;
- ❖ tubo de reserva de agua;
- ❖ tiempo total de medición.



Las mediciones han sido realizadas en dos etapas, con cinco mediciones en la primera y tres en la segunda. Como se analiza a continuación, en la primera instancia han surgido inconvenientes vinculados a las limitaciones del aparato (resolución de los reservorios y capacidad de almacenamiento de los mismos). Por ello, se ha probado una segunda etapa, en la cual se establece un cambio de potencial que ha permitido definir los parámetros más convenientes. La tabla 4 muestra las características de las mediciones.

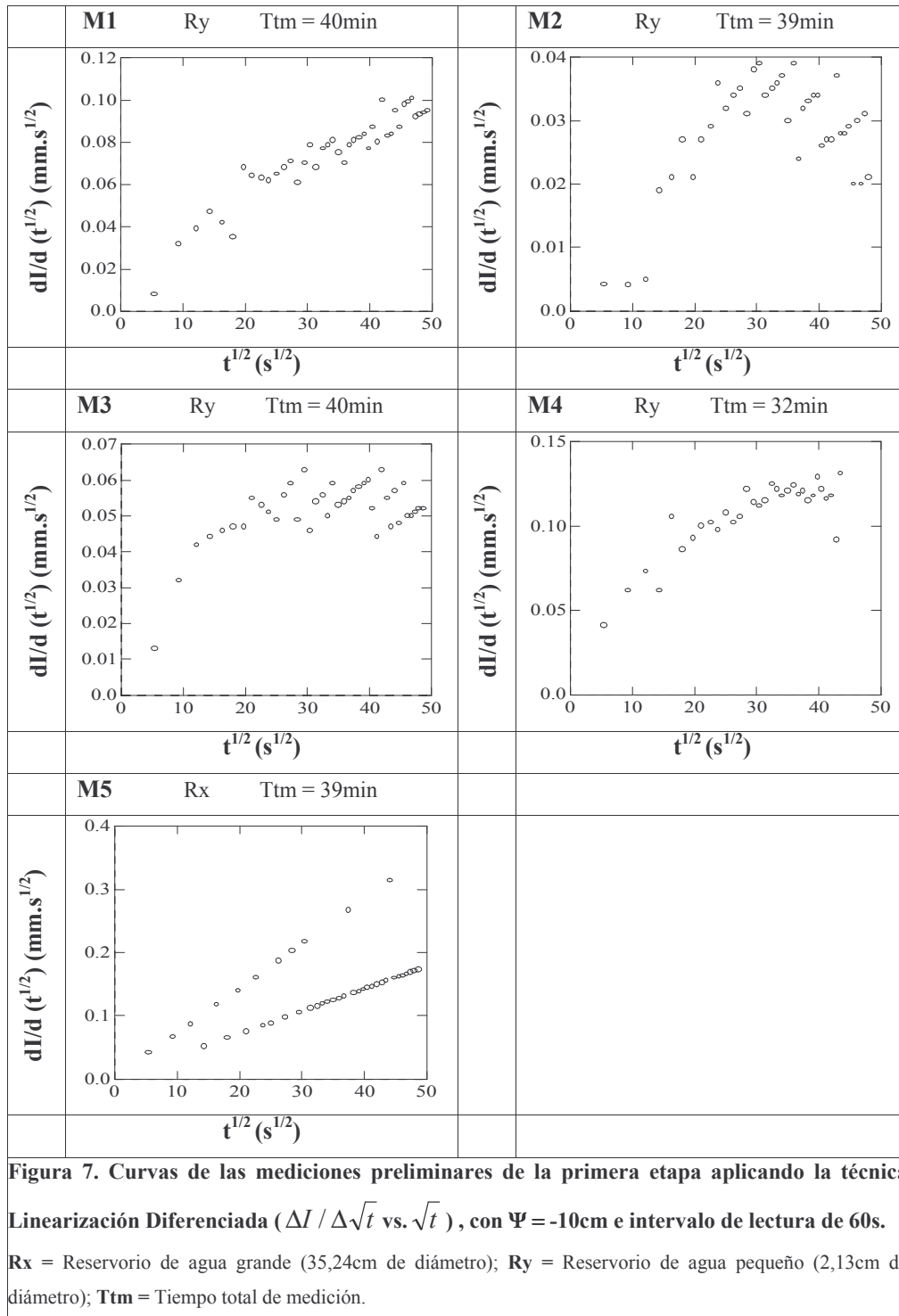
**Tabla 4. Características de las mediciones preliminares.**

Etapa	Medición	Humedad del suelo	Potencial (cm)	Reservorio	Tiempo total de medición (minutos)
<b>Primera</b>	M1	Seco	- 10	<sup>1</sup> Pequeño	40
	M2	Seco	-10	Pequeño	39
	M3	Seco	- 10	Pequeño	40
	M4	Seco	-10	Pequeño	32
	M5	Seco	-10	<sup>2</sup> Grande	40
<b>Segunda</b>	M6	Seco	- 2	Grande	44
	M7	Seco	- 1	Grande	40
	M8	Seco	0	Grande	54

1. 2,13cm de diámetro; 2. 35,24cm de diámetro.

*Primera Etapa.* En esta instancia se ha probado la utilización del potencial ( $\Psi$ ) -10cm con un intervalo de lectura (IL) de 60s y un tiempo de medición total de 40min. Se ha optado por éste potencial, para evitar obtener en las mediciones una variabilidad considerable que pueda dificultar el análisis estadístico. Cabe destacar que a medida que el potencial disminuye, la variabilidad de las mediciones tiende a incrementar, ya que participan más rangos de poros, inclusive las grietas si el potencial es igual o superior a 0cm. Con respecto al tiempo total de medición, se ha considerado 40 minutos suficiente para alcanzar una tasa estable de la infiltración.

La figura 7 expone las curvas de las mediciones de infiltración correspondientes a la primera etapa. Las cuatro primeras (M1, M2, M3 y M4) han sido realizadas con el reservorio de agua pequeño Ry (2,13cm de diámetro). En cambio para la medición M5 se ha utilizado el reservorio grande Rx (35,24cm de diámetro).



Se observa que el gráfico M5 no presenta una curva definida, debido a la combinación utilizada ( $\Psi = -10\text{cm}$ ; Rx). En tal sentido, se evidencia que éste potencial implica un flujo relativamente lento de agua, registrándose en Rx lecturas alrededor de 1mm (mínima unidad de graduación del aparato). En ésta circunstancia, el reservorio Rx presenta una resolución muy baja. En cambio en las mediciones restantes, debido a la combinación utilizada ( $\Psi = -$

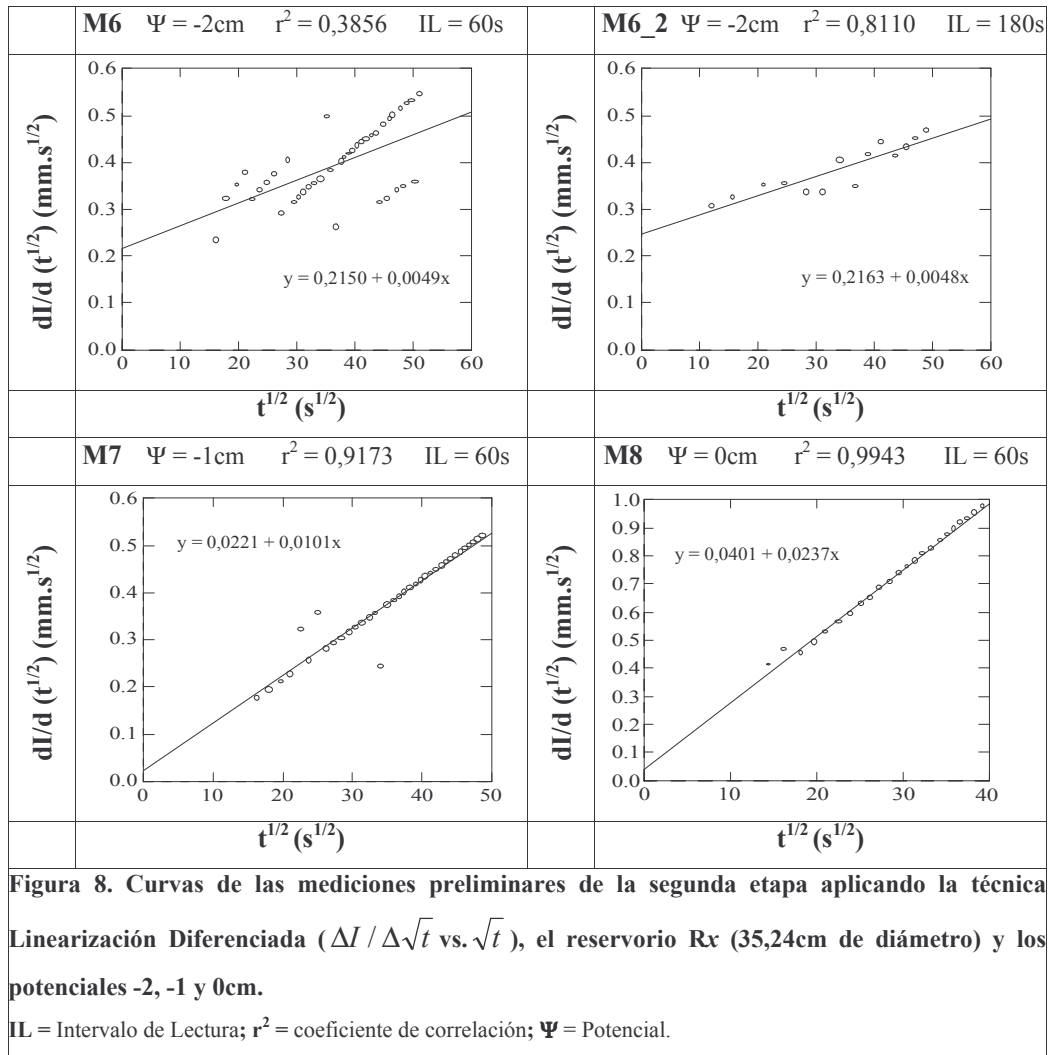
10cm; Ry) se obtienen curvas más definidas, como ser el caso de M1 y M4. Ello se debe a que el reservorio Ry tiene una mayor resolución que Rx ante un potencial de -10cm. Sin embargo, la utilización de Ry presenta el inconveniente vinculado a la capacidad de almacenamiento de agua. Por ello, las mediciones M2 y M4 no han alcanzado los 40 minutos, llegando en el primer caso a 39 minutos y en el segundo a 32 minutos (80,5% de la capacidad del reservorio). En estas condiciones se presenta el riesgo de no asegurar mediciones de 40min para todos los casos. Las curvas M2 y M3 decaen debido a la pérdida de contacto entre el disco del infiltrómetro y la capa de arena.

*Segunda etapa.* Por lo acontecido en la etapa anterior, se ha realizado en esta instancia mediciones combinando potenciales de menor tensión (0cm, -1cm y -2cm) con el reservorio Rx. Con ello se ha conseguido aumentar el flujo de agua, obteniendo así lecturas no cercanas a la mínima unidad de graduación. De esta manera, se ha incrementado la resolución del reservorio Rx. Si bien el flujo incrementa, no se han evidenciado inconvenientes con la capacidad del reservorio.

La figura 8 expone las curvas correspondientes a las mediciones de la segunda etapa. La curva M6 presenta cuatro puntos excluidos en el comienzo, un tiempo total de medición de 44min y un intervalo de lectura de 60s. La curva M6\_2 es la interpolación a 180s de la curva M6, con dos puntos excluidos en el comienzo. El gráfico M7 presenta cuatro puntos excluidos en el comienzo, un tiempo total de medición de 40min y un intervalo de lectura de 60s. Por último, M8 posee un tiempo total de medición de 54min, un intervalo de lectura de 60s y presenta tres puntos excluidos en el comienzo y 14 a partir del minuto 27, debido a que reflejan una discontinuidad en el proceso de infiltración.

De los tres últimos potenciales, se elige al  $\Psi = -2\text{cm}$  para realizar las mediciones, pues con él, se excluye una cierta proporción de macroporos que posiblemente únicamente existan en la superficie y que no tengan continuidad. Con ello se evita, por un lado, sobreestimar la infiltración y, por el otro, obtener una alta variabilidad de las mediciones, tomando en consideración que a medida que el potencial se aproxima a 0cm, la variabilidad incrementa, suceso que puede perturbar el análisis estadístico.

A modo de mejorar la linealidad de las curvas que se obtengan con  $\Psi = -2\text{cm}$ , se procede a interpolar los puntos a intervalos de 120s o de 180s, dependiendo de la curva original. En la figura 8 se muestra en el caso M6\_2 la interpolación a 180s de la curva M6, notándose una mejoría considerable en el coeficiente de correlación ( $r^2$ ), pasando de 0,3856 a 0,8110.



Por todo lo analizado, los parámetros de medición definitivos corresponden a:

- ❖  $\Psi = -2\text{cm}$ ;
- ❖ reservorio de agua grande: 35,24cm de diámetro;
- ❖ tiempo total de medición: 40min.

#### (ii) elección del método

De acuerdo con Vandervaere et al., 2.000b, corresponde elegir el método en función de la comparación entre los valores de  $S$  y  $S_{opt}$ , los cuales figuran en la tabla 5. Se observa que para  $\Psi = -2\text{cm}$   $S \ll S_{opt}$ , siendo el método de medición “*Simple Test*” el más adecuado para utilizar en la estimación de  $K$  y  $S$ . Cabe destacar que en todos los casos  $S \ll S_{opt}$ .

Debido a que en el caso del potencial -2cm el valor de  $S$  está considerablemente más próximo a  $S_{opt}$ , con él se obtendrán mejores estimaciones que si se usara el potencial -1cm o 0cm.

**Tabla 5. Valores de S, S<sub>opt</sub> y r<sup>2</sup> correspondientes a las mediciones preliminares para diferentes potenciales.**

Gráfico	Potencial (cm)	IL (s)	S (mm.h <sup>-1/2</sup> )	S <sub>opt</sub> (mm.h <sup>-1/2</sup> )	r <sup>2</sup>
M6	-2	60	12,9	21,73	0,3856
M6_2	-2	180	14,89	19,48	0,8110
M7	-1	60	1,33	31,43	0,9173
M8	0	60	2,41	48,31	0,9943

### *Método Simple Test*

El método ST utiliza un solo valor de presión y un solo radio de disco, en él S es simplemente igual al coeficiente C<sub>1</sub>. El valor de K se calcula fácilmente una vez que se dispone de los coeficientes y de la humedad volumétrica, utilizando la ecuación [8]:

$$K = \frac{3}{2 - \beta} \left[ C_2 - \frac{\gamma C_1^2}{R(\theta_0 - \theta_n)} \right] \quad [8]$$

Como la estimación de K requiere los valores C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>, su precisión se ve afectada por los errores en ambos coeficientes. También se destaca que debido a que en el cálculo de K se substraen el término de la capilaridad lateral (Ec. [8]), la precisión de la estimación depende en gran medida del dominio en el que el suelo está situado.

❖ Cuando:  $\frac{\gamma C_1^2}{R(\theta_0 - \theta_n)} < \frac{C_2}{2}$  [9] domina la gravedad.

En esta situación predomina la fuerza de la gravedad en el impulso del flujo, siendo K el término dominante en C<sub>2</sub>. La substracción en la ecuación [8] es una operación aceptable y la estimación de K es fehaciente.

❖ Cuando:  $\frac{\gamma C_1^2}{R(\theta_0 - \theta_n)} > \frac{C_2}{2}$  [10] domina la capilaridad lateral.

En esta situación predomina la fuerza de la capilaridad lateral en el impulso del flujo, siendo K el término no dominante en C<sub>2</sub>. La substracción que se realiza en la ecuación [8] es una operación condicionada y la estimación de K es discutible.

### **2.5.2 Elección del sitio para cada unidad de estudio**

La elección de los sitios se efectuó en dos etapas. En primera instancia, se realizó la identificación de diversos sitios sobre la base del análisis de imágenes satelitales Landsat Multiespectral, y en segunda instancia, reconocimientos *in situ*.

Las imágenes tienen una resolución espacial de 30 x 30m. Se consideró a cada unidad como un área homogénea, si como mínimo ésta abarcaba cuatro píxeles contiguos.

Los reconocimientos *in situ* han permitido adquirir una decisión final en la elección. En este aspecto, para el caso del ambiente de sabana, se ha optado por el sitio que presenta un menor grado de deterioro en su calidad ambiental. Cabe destacar que en la zona quedan muy pocos sitios de sabana, totalmente aislados y afectados en algún momento con el uso ganadero.

El sitio agricultura tiene una antigüedad superior a los 10 años, en los cuales siempre se utilizó las prácticas agrícolas convencionales. En cuanto al sitio aibal, de acuerdo al propietario actual, eventualmente ha sido afectado por el ganado.

### **2.5.3 Mediciones de infiltración *in situ* y toma de muestras de suelo**

Las mediciones han sido realizadas *in situ* y sobre la superficie del suelo. Para ello, se utilizó el infiltrómetro de disco que trabaja con tensión (Model 2.800 Guelph Permeameter). Los parámetros de medición establecidos son:  $\Psi = -2\text{cm}$ ; reservorio de agua: 35,24cm de diámetro; intervalo de lectura: 60s; tiempo de medición: 40min. Se ha situado una capa de arena entre el disco del infiltrómetro y el suelo, con el fin de garantizar un adecuado contacto hidráulico durante la medición; rango de tamizado de la arena:  $\phi = 250 \mu\text{m} - \phi = 100 \mu\text{m}$ . Los puntos de medición se ubicaron a lo largo de una transecta con una separación de 30m entre ellos.

En el sitio aibal se han realizado ocho mediciones de 40min cada una. En cambio, para el sitio agricultura, se han obtenido cinco mediciones de 40min y una de 23min, a causa de imprevistos surgidos durante la toma de datos *in situ*.

Las muestras de suelo han sido extraídas con cilindros de  $100\text{cm}^3$  a una profundidad de 5cm, todas en las proximidades de cada medición. Se obtuvieron dos muestras por cada punto, una conservada en el cilindro y la otra disturbada y colocada en una bolsa plástica.

### **2.5.4 Análisis de las muestras de suelo en laboratorio**

El análisis de suelo ha permitido obtener los datos requeridos para el desarrollo del modelo e interpretación de los resultados. Los parámetros que han sido determinados en el laboratorio son:

- ❖ distribución de los tamaños de poros, utilizando la curva de retención de agua obtenida mediante el drenaje de muestras saturadas vía una placa cerámica (Klute, 1.986). La parametrización de la curva se obtuvo con el modelo de Van Genuchten (Van Genuchten, 1.980), empleando la siguiente ecuación no lineal:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + [\alpha h]^n \right]^{-m} \quad \text{donde:}$$

$\theta$  : humedad volumétrica del suelo;

$\theta_r$  : humedad volumétrica residual del suelo;

$\theta_s$  : humedad volumétrica del suelo a saturación;

$\alpha$  : parámetro de ajuste;

$h$  : potencial en cm de columna de agua;

$n$  y  $m$  : parámetros de adecuación de la curva.

- ❖ humedad volumétrica inicial, utilizando el método gravimétrico de Gardner (1.986);
- ❖ humedad volumétrica final extraído de la curva de retención de agua;
- ❖ densidad aparente (Dap), utilizando el método del cilindro de Blake y Hartge (1.986);
- ❖ porosidad total según la fórmula  $P = 1 - [(Dap)/(Dr)]$ , establecida por Danielson y Sutherland (1.986), donde  $Dr = 2,65 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  es la densidad del cuarzo;
- ❖ carbono orgánico mediante la oxidación con dicromato de potasio y detección espectrofotométrica de  $\text{Cr}^{+3}$  (Page et al., 1.982; Schlichting et al., 1.995). Las muestras han sido expuestas a una temperatura de 120 °C por 90min. El contenido de la materia orgánica del suelo se ha determinado por:  $\text{MO} = C_{\text{org}} * 1.724$ . El pretratamiento de las muestras ha consistido en:
  - secado al aire;
  - tamizado a  $\varnothing = 1\text{mm}$ .

### 2.5.5 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos y los gráficos se realizaron con el paquete software SYSTAT 6.0 (SYSTAT, 1.992).

En el análisis estadístico se realizaron los siguientes test:

- ❖ test de Kolmogorov-Smirnov, modificación Lilliefors, para probar la normalidad de las variables;
- ❖ test no paramétrico (prueba de dos muestras de Wilcoxon) para diferencia de medias de la conductividad hidráulica y la humedad volumétrica ( $pF = 1$ ) entre sitios;
- ❖ test de t para probar diferencia entre las medias de los parámetros restantes del suelo.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Test a Normalidad

La aplicación del test de t a las variables estudiadas requiere que los datos presenten distribución normal. El test a normalidad aplicado corresponde a Kolmogorov-Smirnov, variación Lilliefors, cuyos valores se exponen en la tabla 6. Se observa que a excepción de la conductividad hidráulica del sitio agricultura (SAG) y la variable humedad volumétrica ( $pF = 1$ ) del sitio aibal (SA), el resto de los parámetros presentan distribución normal, ya que los valores  $p$  son mayores que 0,05. Ante esta situación, para las excepciones mencionadas, se ha aplicado la prueba de dos muestras de Wilcoxon (test no paramétrico).

**Tabla 6. Test a normalidad de las variables de los sitios de aibal y agricultura según Kolmogorov-Smirnov, modificación Lilliefors.**

Parámetro	Sitio Aibal (SA)		Sitio Agricultura (SAG)	
	n	p	n	p
Conductividad hidráulica K (mm/h)	8	1,00	6	0,03
Sorptividad S (mm.s <sup>-1/2</sup> )	8	0,97	6	1,00
Densidad Aparente Dap (g/cm <sup>3</sup> )	8	1,00	6	1,00
Porosidad Total PT (% vol.)	8	1,00	6	0,99
Materia Orgánica del Suelo MOS (g/kg)	8	1,00	6	0,15
Humedad Volumétrica Inicial (Hvi)	8	1,00	6	0,61
Hv ( $pF = 0,3$ )	8	0,20	6	0,75
Hv ( $pF = 1$ )	8	0,02	6	1,00
Hv ( $pF = 1,8$ )	8	1,00	6	0,22
Hv ( $pF = 2,5$ )	8	0,15	6	0,65
Hv ( $pF = 3,3$ )	8	0,45	6	0,20
Hv ( $pF = 4,1$ )	8	0,37	6	0,74



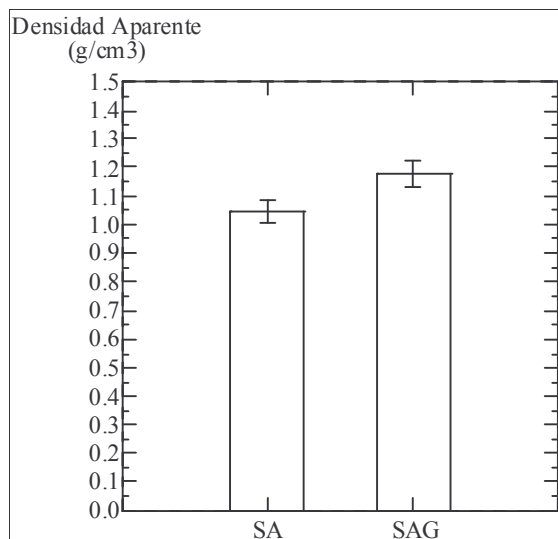
### 3.2 Parámetros de Evaluación del Sistema Poroso

#### 3.2.1 Porosidad total y densidad aparente

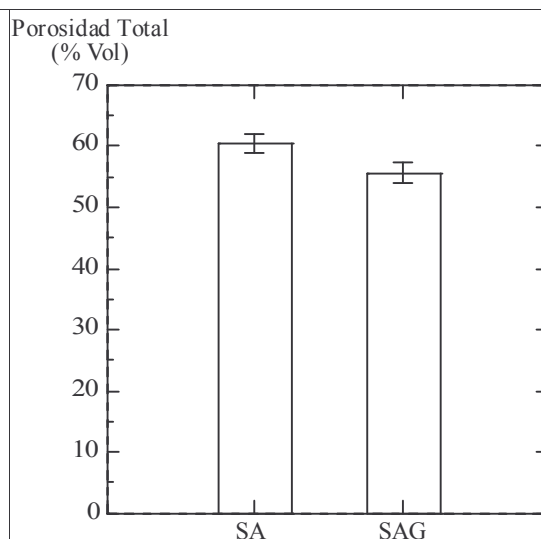
La porosidad total (PT) está en estrecha relación con la densidad aparente (Duchaufour, 1.987). Presentan una relación inversamente proporcional entre sí, lo que establece que reflejan en un mismo sentido el estado de la estructura del suelo. Dicha relación deriva de la expresión analítica ( $P = 1 - [(Dap)/(Dr)]$ ) que se utiliza para calcular PT en función de Dap. Por ello, ambos parámetros son presentados juntos.

En la tabla 7 se muestran para ambos sitios los valores promedios de Dap y PT con el valor  $p$  del test de  $t$ , y sus gráficos de barras en las figuras 9 y 10. Se observa que la porosidad total promedio de SA,  $PT = 60,6 \% \text{ vol. (alta)}$ , es un 9,18% mayor que la de SAG,  $PT = 55,5 \% \text{ vol. (alta)}$ . El test de  $t$  para este caso refleja que existe diferencia significativa ( $p = 0,0003$ ) entre las medias de ambos sitios. En cuanto a Dap, el promedio para SA,  $Dap = 1,05 \text{ g/cm}^3$ , es un 12,38% menor que el correspondiente a SAG,  $Dap = 1,18 \text{ g/cm}^3$ , existiendo diferencia significativa ( $p = 0,0013$ ) al respecto.

Esto indica la degradación de la estructura del suelo efectuada por el laboreo de la actividad agrícola. La disminución de MOS y el peso de la maquinaria, han contribuido a que el suelo del sitio agricultura presente un mayor grado de compactación que el aibal. Debido a que esta situación afecta en forma negativa el ingreso de agua al suelo, se espera que las propiedades hidráulicas reflejen este suceso.



**Figura 9. Representación de la densidad aparente de ambos sitios mediante el gráfico de barras.**



**Figura 10. Representación de la porosidad total de ambos sitios mediante el gráfico de barras.**

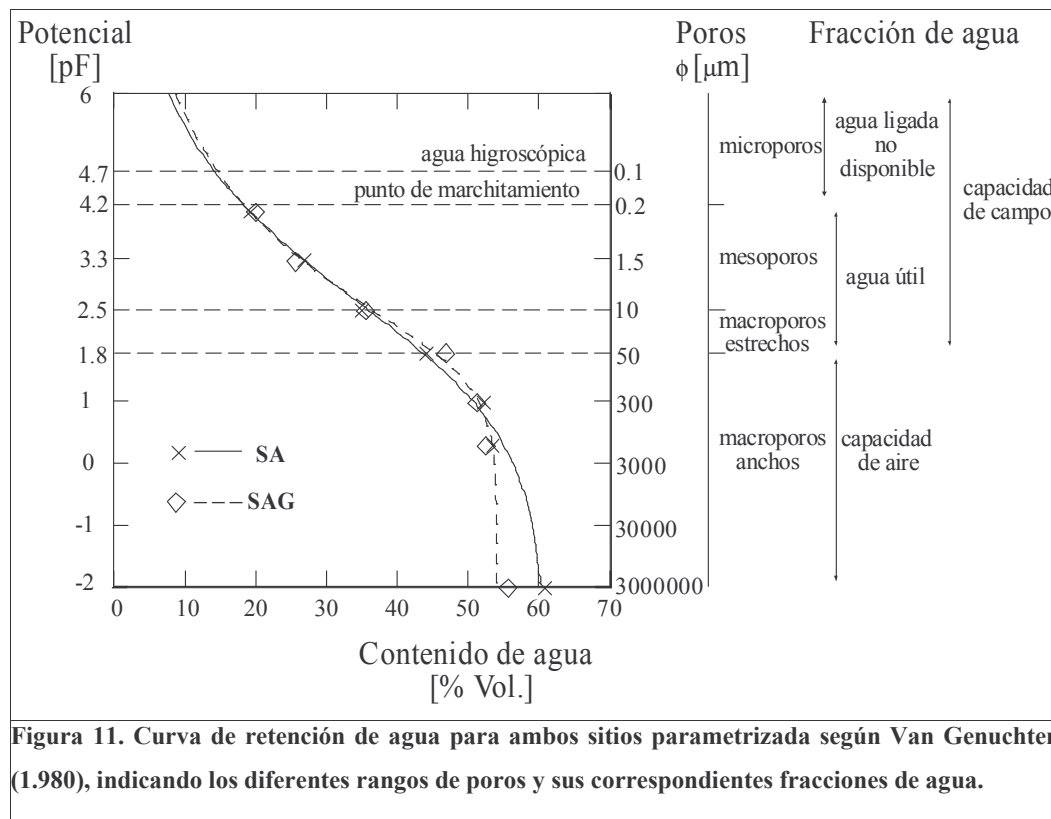
**Tabla 7. Promedio de PT y Dap del sitio aibal y agricultura con el valor estadístico p del test de t para cada caso.**

Parámetro	SA	SAG	p
PT (% vol.)	60,6	55,5	0,0003
Dap (g/cm <sup>3</sup> )	1,05	1,18	0,0013

### 3.2.2 Distribución de tamaños de poros

La curva de retención de agua contribuye en la descripción del sistema poroso del suelo, por que muestra la distribución de los tamaños de poros. En ella, se puede evidenciar los cambios que puede producir la actividad agrícola en dicho sistema.

La figura 11 muestra la parametrización de la curva de retención de agua según Van Genuchten (1.980) para los dos sitios. Se observa que el modelo se ajusta bien a los valores obtenidos en laboratorio. Los parámetros del modelo de las curvas son: para SA,  $a = 0,01$ ;  $n = 0,41$ ;  $m = 0,53$ ;  $\theta_s = 0,61$ ; para SAG,  $a = 0,03$ ;  $n = 0,93$ ;  $m = 0,19$ ;  $\theta_s = 0,54$ . La tabla 9 expone la información de las curvas.



La tabla 8 expone para ambos sitios los valores promedios de poros (% vol.) en sus diferentes rangos de diámetros, obtenidos de la medición de la curva de retención de agua en

laboratorio. También se visualiza el potencial utilizado en cada caso y el valor estadístico  $p$  del test de  $t$  llevado a cabo. Los resultados exponen (tabla 8), que no existe diferencia significativa entre las diferentes fracciones de poros que han participado en el proceso de infiltración.

**Tabla 8. Volúmenes promedios de poros en sus correspondientes rangos de diámetros para ambos sitios; pF = potencial utilizado en cada caso;  $p$  = valor estadístico de los test de  $t$ ;  $T'$  = valor estadístico del test no paramétrico para diferencia de medias.  $H_0$ : no existe diferencia significativa entre las medias,  $p < 0,05$ : rechazo de  $H_0$ ,  $T' < 29$ : rechazo de  $H_0$ .**

pF	Diámetro de poro ( $\mu\text{m}$ )	SA (% vol.)	SAG (% vol.)	Valor estadístico
0,3	<1.500	53	52	0,18
1	<300	52	51	* $T' = 34$
1,8	<50	44	47	0,12
2,5	<10	35	36	0,69
3,3	<1,5	27	26	0,41
4,1	<0,2	19	20	0,49

\* Para este caso se ha aplicado la prueba de dos muestras de Wilcoxon (test no paramétrico), debido a que los datos no presentan distribución normal.

**Tabla 9. Información de ambos sitios extraída de la parametrización de la curva de retención de agua según Van Genuchten (1.980).**

Potencial (pF)	Diámetro de poros ( $\mu\text{m}$ )	Fracción de poros	SA Fracción de poros (% vol.)	SAG Fracción de poros (% vol.)
> - 2	Rango Completo	Porosidad	60	54
< 2,5	> 10	Macroporos (anchos + estrechos)	24	18
< 1,8	> 50	Macroporos Anchos	17	9
1,8 - 2,5	10 - 50	Macroporos Estrechos	7	9
2,5 - 4,2	0,2 - 10	Mesoporos	18	18
> 4,2	0, 2	Microporos	18	18

Sobre la base de la parametrización de la curva de retención de agua, se aprecia que el porcentaje de volumen de macroporos es mayor en el sitio aibal (24% vol. vs. 18% vol.). No sucede lo mismo con los mesoporos y microporos, ya que presentan iguales volúmenes (18% vol.) en ambos sitios. También se destaca la mayor uniformidad en la distribución de poros

para SAG, presentando el mismo volumen (18% vol.) para cada una de las fracciones (microporos, mesoporos y macroporos).

En el aibal los macroporos representan el mayor porcentaje del total de volumen de poros, en comparación a lo que sucede en SAG. En tal sentido, los macroporos de SA (24% vol.) representan el 40% de la porosidad total, siendo el 70,83% de ellos macroporos anchos (17% vol.) y un 29,17% macroporos estrechos (7% vol.). En cambio en SAG, los macroporos (18% vol.) representan el 33,3% de la porosidad total, siendo el 50% de ellos macroporos anchos (9% vol.) y el 50% restante, macroporos estrechos (9% vol.).

Lo expuesto manifiesta una posición más favorable al aibal en cuanto a la macroporosidad, ya que en el sitio agrícola existe un 6% menos de volumen de macroporos. Esta diferencia está relacionada a los resultados obtenidos para Dap y PT, con valores significativamente diferentes entre ambos sitios. Sin embargo, debido al potencial utilizado (-2cm) en las mediciones, los poros con diámetro mayor a 1.500 $\mu$ m (parte de los macroporos anchos) no participan en el proceso de infiltración. Por ello, un 5% de los macroporos anchos en el aibal han quedado excluidos del proceso (ver Tab. 10), mientras que para el caso de SAG no ha existido exclusión, implicando la participación del rango completo del volumen de poros. Por lo tanto, se aprecia que SA solamente posee un 1% más de macroporos anchos que han participado en la infiltración.

**Tabla 10. Comparación de la exclusión de la participación de los volúmenes de macroporos anchos en función del potencial utilizado. Información de ambos sitios extraída de la parametrización de la curva de retención de agua según Van Genuchten (1.980).**

Potencial (pF)	Diámetro de poros ( $\mu$ m)	Fracción de poros	SA Fracción de poros (% vol.)	SAG Fracción de poros (% vol.)
> - 2	Rango Completo	Porosidad	60	54
< 0,3	> 1.500	Macroporos anchos que no han participado en la infiltración	5	0

De lo analizado, se desprende dos aspectos importantes a destacar:

1. en términos generales, el sistema poroso del suelo ha sufrido un cambio a causa de la actividad agrícola, suceso que se evidencia claramente con la reducción de un 6% de la fracción de macroporos en SAG;
2. debido a la similitud en la distribución de tamaños de poros que ha participado en la infiltración, entre ambos sitios no se espera obtener diferencia significativa en las

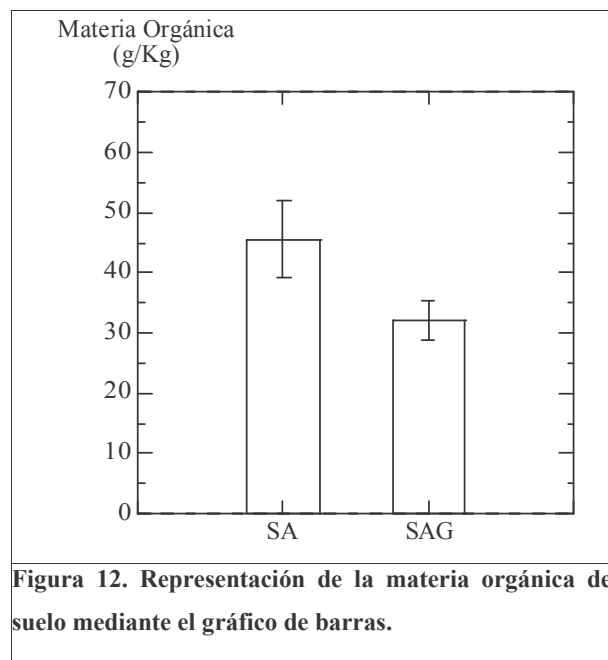
propiedades hidráulicas del suelo. Esta situación no era la esperada, ya que se suponía un cambio más profundo en la distribución de los tamaños de poros. Posiblemente, esta realidad está vinculada a las condiciones existentes en SA, eventualmente usado con fines ganaderos y, a su mayor contenido de materia orgánica.

### 3.3 Parámetros Complementarios

#### 3.3.1 Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo promueve la ordenación estructural, la estabilidad de los agregados y la retención de agua. Su pérdida contribuye al incremento de la densidad aparente, a la disminución del volumen total de poros y de la velocidad de infiltración de agua en el suelo (Thompson, 1.965).

El test de t realizado refleja que existe diferencia significativa ( $p = 0,004$ ) entre la MOS de ambos sitios (Tab. 11), presentando SA el valor mayor que es de 45,52 g/kg (Fig. 12).



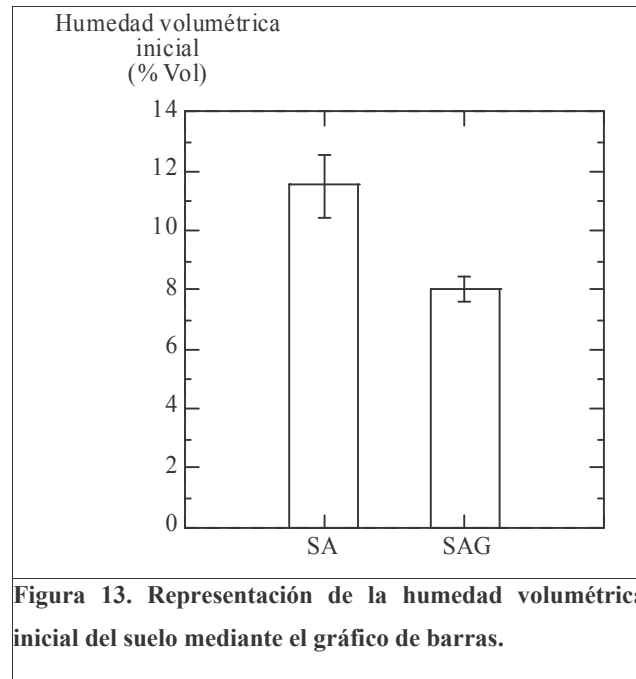
**Tabla 11. Promedio de MOS del sitio aibal y agricultura con el valor estadístico p del test de t.**

Parámetro	SA	SAG	p
MOS (g/kg)	45,52	32,09	0,004

Este resultado concuerda con los valores obtenidos de la porosidad total y la densidad aparente (Pág. 32). En tal sentido, la disminución de la materia orgánica ha contribuido en la disminución de PT y en el incremento de Dap en SAG.

### 3.3.2 Humedad del suelo

En el momento de realizar las mediciones de infiltración y la toma de muestras de suelo, a finales de la estación de verano, en la zona no llovía como mínimo hace dos meses. Por ello, se han obtenido valores relativamente muy bajos de humedad inicial (Tab. 12), correspondiendo un valor promedio para SA (11,5% vol.) superior al de SAG (8% vol.) en un 3,5% (Fig. 13). El test de t confirma que existe diferencia significativa (0,0001) entre las medias de los dos sitios.



**Tabla 12. Promedio de humedad volumétrica inicial (Hvi) del sitio aibal y agricultura con el valor estadístico p del test de t.**

Parámetro	SA	SAG	p
Hvi (% vol.)	11,5%	8%	0,0001

Esta situación revela las mejores condiciones del aibal para conservar la humedad del suelo. Se destaca que SA presentaba una cobertura del 80% aproximadamente, mientras que en el sitio agricultura no superaba el 30%. La cobertura de SAG era de los plantines del cultivo, existiendo un suelo sin el rastrojo de la cosecha anterior. Ello refleja que el suelo del sitio agricultura presentaba una mayor exposición a los rayos del sol y al viento, factores que favorecen a la evaporación de la humedad del suelo. Se recuerda que las muestras del suelo son superficiales.

De acuerdo con la curva de retención de agua (Fig. 11, Pág. 33; Tab. 9, Pág. 34), la humedad del suelo tanto de SA (Hvi = 11,5% vol.; pF 5,2) como de SAG (Hvi = 8% vol.; pF 6,2) pertenecen a la fracción higroscópica (> pF 4,7), en la cual no existe agua capilar. Esta fracción es agua de adsorción en la superficie de las partículas, no aprovechable para las plantas.

Si bien se encuentra diferencia significativa entre ambas humedades, ellas son valores muy bajos y pertenecientes a la misma fracción de agua. En tal sentido, la inexistencia de agua capilar en ambos sitios, permite decir que las condiciones desde el punto de vista de este parámetro, son iguales para ambos casos ante el proceso de infiltración. Por lo tanto, los valores de las humedades volumétricas iniciales, no representan un aspecto fuerte que influya de manera determinante en los valores que se obtengan en las propiedades hidráulicas del suelo (K y S).

### 3.4 Infiltración

El proceso de infiltración está estrechamente vinculado a las propiedades hidráulicas del suelo (K y S), que pueden verse afectadas por el cambio en el uso de la tierra. Por ello, las mediciones de infiltración son importantes para indagar sobre dichas propiedades, quienes establecen el comportamiento hidrodinámico del suelo.

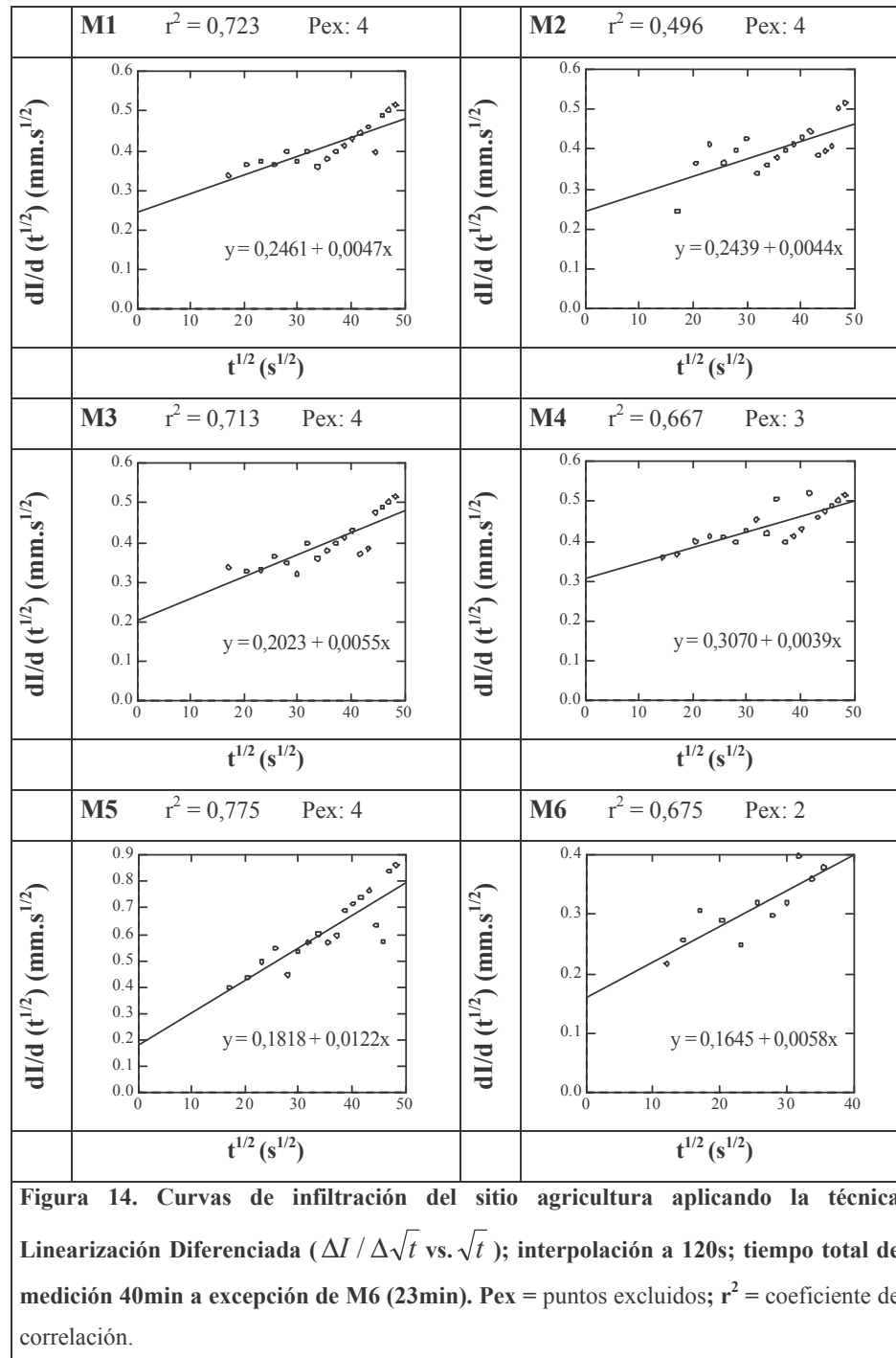
Las mediciones de infiltración *in situ* y las estimaciones de K y S se han realizado de acuerdo a Vandervaere et al., (2.000a y 2.000b). El aparato utilizado para las mediciones es un infiltrómetro de disco a tensión (Model 2.800 Guelph Permeameter).

Las figuras 14 y 15 correspondientes a SAG y SA, muestran las curvas de infiltración de cada medición. Las mismas obedecen a la regresión lineal  $\Delta I / \Delta \sqrt{t}$  vs.  $\sqrt{t}$  de acuerdo con la técnica Linearización Diferenciada. De esta regresión se obtienen los valores de los coeficientes  $C_1$ , igual a la ordenada al origen y de  $C_2$ , igual a la mitad de la pendiente (Tab. 13), ambos pertenecientes a la ecuación de infiltración (Ec. [1]). Cabe destacar que el gráfico  $\Delta I / \Delta \sqrt{t}$  vs.  $\sqrt{t}$  debe presentar una relación lineal aceptable para que la estimación de los coeficientes sea fehaciente, lo cual es importante ya que a partir de los mismos se estiman K y S. Debido a que las curvas a un intervalo de lectura de 60s no presentan una relación lineal aceptable, las mismas han sido interpoladas a 120s (ver Mediciones preliminares, Pág. 23).

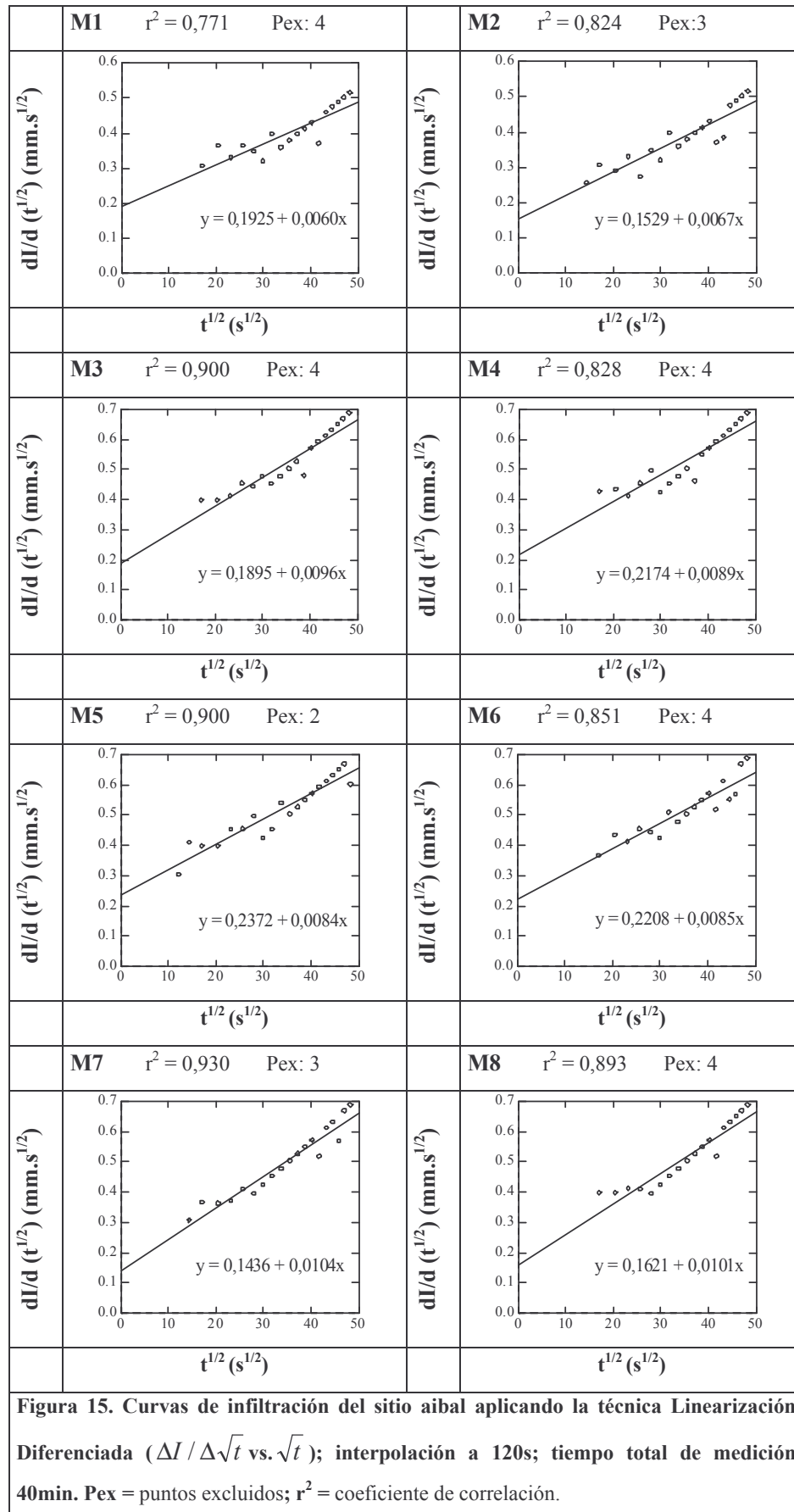
A causa de una lluvia intensa durante el trabajo *in situ*, no se pudo completar en SAG los 40 minutos para la sexta curva, así como el total de mediciones, obteniéndose seis de las ocho previstas. En los días siguientes se decidió no intentar completar la cantidad de mediciones para SAG, ya que por un lado, las condiciones de los caminos no eran aceptables para

regresar al sitio y, por otro, no hubiese sido conveniente obtener el resto de las mediciones con otra humedad del suelo (mayor), ya que la misma influye en el proceso de infiltración, suceso que pudo haber perturbado la comparación de K y S entre los sitios.

La exclusión de los puntos al principio de cada curva se debe a la influencia de la capa de arena en el comienzo de la infiltración. En ninguna curva se ha excluido puntos al final.







**Tabla 13. Valores de los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$  de la ecuación de infiltración (Ec. [1]) y de los coeficientes de correlación ( $r^2$ ), pertenecientes a las regresiones lineales de acuerdo con la técnica Linearización Diferenciada para cada medición de ambos sitios.**

Medición	SA			SAG		
	$C_1$	$C_2$	$r^2$	$C_1$	$C_2$	$r^2$
M1	0,1925	0,0030	0,771	0,2461	0,0023	0,723
M2	0,1529	0,0034	0,824	0,2439	0,0022	0,496
M3	0,1895	0,0048	0,900	0,2023	0,0028	0,713
M4	0,2174	0,0045	0,828	0,3070	0,0020	0,667
M5	0,2372	0,0042	0,900	0,1818	0,0061	0,775
M6	0,2208	0,0042	0,851	0,1645	0,0029	0,675
M7	0,1436	0,0052	0,930			
M8	0,1621	0,0051	0,893			

Una vez obtenidos los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$ , se ha procedido a estimar los valores de  $K$  (mm/h),  $S$  (mm.h<sup>-1/2</sup>) y  $S_{opt}$  (mm.h<sup>-1/2</sup>) para cada medición de ambos sitios (Tab. 14). Se destaca que en todos los casos se presenta que  $S \ll S_{opt}$ , tal como sucede en las mediciones preliminares. Esta situación sostiene la elección del método de medición utilizado (*Simple Test*).

**Tabla 14. Valores de  $K$  (mm/h),  $S$  (mm.h<sup>-1/2</sup>) y  $S_{opt}$  (mm.s<sup>-1/2</sup>) de cada medición para ambos sitios; potencial utilizado: -2cm.**

Medición	SA			SAG		
	$K$ (mm/h)	$S$ (mm.h <sup>-1/2</sup> )	$S_{opt}$ (mm.h <sup>-1/2</sup> )	$K$ (mm/h)	$S$ (mm.h <sup>-1/2</sup> )	$S_{opt}$ (mm.h <sup>-1/2</sup> )
M1	21,96	11,55	24,17	16,56	14,77	22,09
M2	25,20	9,17	26,50	15,48	14,63	21,46
M3	36,00	11,37	31,70	20,16	12,14	24,33
M4	33,12	13,04	31,26	12,60	18,42	19,32
M5	30,96	14,23	29,44	46,44	10,91	36,74
M6	31,32	13,25	29,78	21,96	9,87	25,06
M7	39,60	8,62	32,63			
M8	38,52	9,73	32,25			

Debido a que  $S \ll S_{opt}$ , las condiciones son muy buenas para la estimación de  $K$  con el método ST, pero una estimación precisa de la sorptividad es poco probable. Sin embargo, la

estimación de S mejora considerablemente cuando las condiciones iniciales son muy secas, siendo éstas precisamente en las cuales se han realizado las mediciones para este trabajo.

La tabla 15 muestra que el valor promedio de la conductividad hidráulica del aibal (32,09mm/h) es mayor que la de SAG (22,20mm/h). En cambio con respecto a la sorptividad, el valor promedio de SA (11,37mm.h<sup>-1/2</sup>) es menor que la de SAG (13,46mm.s<sup>-1/2</sup>). El test no paramétrico llevado a cabo establece que no existe diferencia significativa para el caso de K (T' = 29,5). Lo mismo sucede para el caso de S, exponiendo el test de t un valor de p = 0,16.

**Tabla 15. Promedio de las propiedades hidráulicas del suelo (K y S) de ambos sitios; potencial utilizado: -2cm; p = valor estadístico del test de t; T' = valor estadístico del test no paramétrico para diferencia de medias. Ho: no existe diferencia significativa entre las medias, p < 0,05; rechazo de Ho, T' < 29: rechazo de Ho.**

Parámetro	SA	SAG	Valor estadístico
K (mm/h)	32,09	22,20	* T' = 29,5
S (mm.h <sup>-1/2</sup> )	11,37	13,37	p = 0,16

\* Para este caso se ha aplicado la prueba de dos muestras de Wilcoxon (test no paramétrico), debido a que los datos no presentan distribución normal.

Debido a que la participación del rango de poros ha sido completa en SAG, la infiltración se ha desarrollado en condiciones de saturación, por lo tanto, según la clasificación de la conductividad hidráulica saturada del suelo (Ks(Ψ=0)) del U. S. Department of Agriculture (1.993), el valor promedio de K para este sitio es moderadamente alto. Para el caso del aibal, sin lugar a duda Ks(Ψ=0) debe presentar un rango superior en la clasificación, debido a que no ha participado un 5% de macroporos en la infiltración a causa del potencial utilizado.

El hecho de no encontrar diferencia significativa entre las medias tanto de K como de S, obedece a que el volumen de poros que ha participado en el proceso de infiltración ha sido prácticamente igual en ambos sitios, debido al potencial utilizado (-2cm). Si bien la diferencia no es significativa, se observa una clara tendencia de valores mayores de K para el caso de SA (Tab. 14). En este contexto, puede apreciarse que a excepción de la quinta medición de SAG, siendo el valor más alto de todas las mediciones, el resto de los valores de SAG son claramente inferiores a los de SA. Sin lugar a duda, este valor máximo ha sido el responsable que SAG no presente una distribución normal en sus datos.

La tendencia de valores mayores de K a favor de SA, seguramente está sujeta a que la mejor estructura del suelo de SA, permite una mejor continuidad de los poros, lo que indudablemente favorece al proceso de infiltración. También puede haber contribuido a este

suceso, pero en menor grado, el hecho que en SA ha participado un 1% de volumen más de macroporos anchos que en SAG.

La diferencia del 6% de volumen de macroporos anchos a favor de SA, establece que la capacidad de captación de agua del suelo seco,

$$CS(pF < 4.2) \text{ (l/m}^2\text{)} = \text{Porosidad - vol. microporos}$$

calculado para los 10cm superficiales, es un 16,6% mayor en SA ( $CS(pF < 4.2) = 42 \text{ (l/m}^2\text{)}$ ) en comparación con SAG ( $CS(pF < 4.2) = 36 \text{ (l/m}^2\text{)}$ ). Indudablemente, la mejor condición de la estructura de SA establece tal situación.

Por último, es importante destacar que el 5% de volumen de macroporos anchos que ha quedado excluido de la infiltración en SA, no captado en las mediciones debido al potencial utilizado (-2cm), le asigna una mejor capacidad de infiltración a SA. En tal sentido, éste volumen contiene poros muy grandes, inclusive grietas, con la aptitud de permitir un flujo muy elevado. Ello establece que  $K_s(\Psi=0)$  para SA sea superior al valor obtenido con el potencial -2cm. En cambio en SAG, el valor obtenido de K con el potencial -2cm, corresponde a  $K_s(\Psi=0)$ , debido a que la totalidad de poros ha participado en la infiltración. Por lo tanto, todo lo analizado sirve de argumentos sólidos que permiten establecer que la hipótesis del trabajo es verdadera. En este contexto, la actividad agrícola convencional presenta una influencia negativa en las propiedades hidráulicas del suelo del ambiente de pastizal (sección baja de la subcuenca).

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1 Influencia del Uso Agrícola Sobre la Estructura del Suelo

Como la estructura hace referencia a la ordenación de las partículas en el suelo, determinando la distribución en el espacio de la materia sólida y de los espacios vacíos (Duchaufour, 1.987), condiciona a las propiedades físicas fundamentales del suelo, tales como aireación y posibilidad de respiración de las raíces, la capacidad de infiltración de agua, la retención por las fuerzas capilares de una reserva de agua utilizable por las plantas en períodos secos, etc.

Desde hace mucho tiempo se conoce que la materia orgánica promueve la ordenación estructural y la estabilidad de los agregados. Por lo que, en la formación de la estructura juegan un papel considerable los cementos floculados: elementos finos o coloides, tales como las arcillas y los cementos orgánicos, en estado de complejos órgano-minerales, quienes forman puentes o revestimientos alrededor de las partículas minerales más gruesas y las unen entre sí, formándose agregados separados (Duchaufour, 1.987).

Las condiciones de cultivo se asocian a una reducción del contenido de la materia orgánica, debido a que el laboreo del suelo la expone a una mayor cantidad de oxígeno, lo que activa su descomposición (Thompson, 1.965). También se asocian a una tendencia a la compactación como consecuencia de la maquinaria pesada (Van der Weert y Lenselink, 1.972) y a una exposición a la acción directa de las gotas de lluvia (Smith et al., 1.990). Estos factores producen una reducción de los agregados grandes, y a medida que disminuyen de tamaño, disminuyen sus volúmenes de poros (Thompon, 1.965). Es muy común utilizar el parámetro Dap como indicador para tal situación, cuyo valor incrementa con la reducción del volumen de poros.

Precisamente, en SAG se registró una disminución del contenido de MOS en un 41,85 % comparado con SA, encontrándose diferencia significativa entre las medias de ambos sitios, coincidiendo con los resultados obtenidos por Lorenz et al., (2.000) y Roldán et al., (2.000) en la misma área de estudio. Este hecho explica el incremento significativo de Dap en un 12,38% y la disminución significativa de PT en un 9,18% en SAG. Seguramente también han contribuido para tal situación, el peso de la maquinaria debido a la compactación que genera en el suelo y la acción de las gotas de lluvias que impactan en el suelo desnudo. Cabe destacar que en SAG, la práctica utilizada es la convencional, lo que implica que se deja el suelo prácticamente desnudo después del laboreo.

La densidad aparente para suelos cultivados varía generalmente entre 1,0 y 1,6 g/cm<sup>3</sup> (Thompson, 1.965). Si bien en SA no se ha practicado agricultura, para la misma, se ha obtenido un valor de Dap de 1,05 g/cm<sup>3</sup>. Esto probablemente esté vinculado al uso ganadero

en SA, realizado en forma breve comparado con la práctica agrícola en SAG. Diversos estudios (Sánchez et. al., 1.989; Amézquita y Pinzón, 1.991; Lal, 1.996) demuestran que el ganado mediante el pisoteo, genera un considerable grado de compactación en los suelos. Obviamente que el mayor contenido de MOS en SA, ha contribuido fuertemente a establecer una Dap menor que en SAG. En este contexto, la pérdida de MOS puede incrementar el peso del suelo de dos maneras, una es que la materia orgánica es mucho más ligera que la mineral, y otra es que, en general, su disminución se halla asociada con una reducción en el volumen total de poros (Thompson, 1.965).

Según lo analizado, el suelo del sitio agrícola presenta una estructura más degradada que la del aibal. Ello hace suponer un cambio en la distribución de los tamaños de poros, que afectaría las propiedades hidráulicas del suelo.

#### **4.2 Influencia del Uso Agrícola en la Distribución de Tamaños de Poros**

El análisis de la distribución de tamaños de poros mediante la curva de retención de agua, muestra que el sistema poroso del suelo ha cambiado a causa de la actividad agrícola, con una disminución de un 6% de volumen de macroporos anchos en SAG. Sin lugar a duda, ésta diferencia ha sido determinante en los valores obtenidos en Dap y PT.

A pesar de este cambio desfavorable en SAG, la distribución de los tamaños de poros que han participado en el proceso de infiltración, ha resultado ser similar para ambos sitios. Cabe destacar que los diámetros de poros que han participado han sido hasta 1.500 $\mu$ m, suceso vinculado al potencial utilizado (-2cm). En este contexto, en SA ha participado el 55% de volumen de poros, quedando excluidos del proceso un 5% de volumen de macroporos anchos. En cambio en SAG, el volumen total de poros (54% vol.) ha participado en la infiltración. Los mesoporos y los microporos han resultado ser exactamente iguales para ambos sitios (18% vol). Es decir, que en SA ha participado solamente 1% de volumen más de poros (macroporos anchos) que en SAG.

La similitud entre los sitios de la distribución de los tamaños de poros que han participado en la infiltración, no era la situación esperada. En tal sentido, diversos estudios (Aoki y Serrano, 2.003; Coria, 2.004) que comparan un mismo tipo de suelo con uso agrícola y en su adyacencia un virgen, demuestran que el cambio de estos parámetros (Dap y PT) deriva en un cambio de la distribución de tamaños de poros. Cabe destacar que en los estudios mencionados, el suelo adyacente al agrícola es totalmente virgen, en cambio en este estudio, el aibal ha sido eventualmente afectado por el uso ganadero. En la formulación de la hipótesis de este trabajo, se ha considerado al uso agrícola como el factor de influencia significativa en

las propiedades hidráulicas del suelo, subestimando al uso ganadero debido a su brevedad en comparación con el uso agrícola (antigüedad superior a los 10 años). Por lo tanto, todo hace suponer que el uso ganadero en SA ha sido uno de los factores que ha contribuido a que la distribución de los tamaños de poros acompañe de cerca a lo ocurrido en SAG.

### 4.3. Infiltración

Debido a que las condiciones en la distribución de los tamaños de poros han resultado ser similares entre ambos sitios, resulta lógico los valores obtenidos tanto para la conductividad hidráulica como para la sorptividad. Si bien no se ha encontrado diferencia significativa en las propiedades hidráulicas con el potencial utilizado (-2cm), es importante destacar dos aspectos que le atribuyen una mayor capacidad de infiltración al ambiente de pastizal:

1. se observa una clara tendencia de valores mayores de K para el caso de SA, con un promedio mayor que SAG en un 44,55%. Seguramente, esto está sujeto a que SA presenta una mejor estructura que SAG, beneficiando la continuidad de los poros. Sin lugar a duda, esta situación favorece en forma notable al proceso de infiltración. También debe haber contribuido a esta situación, pero en un grado mucho menor, el hecho que en SA ha participado un 1% de volumen más de macroporos anchos que en SAG. Si bien ésta diferencia es mínima, se destaca que los macroporos presentan un rol importante en la transmisión de agua cerca de la saturación (Angulo- Jaramillo et al., 2.000). Los mismos, permiten una rápida transferencia de una importante fracción del flujo (Bouma y Wosten, 1.979). En este contexto, Aoki y Serrano (2.003), comprobaron en un suelo *Kastanozem* con bosque natural, que el 90% del flujo total es conducido por los macroporos gruesos (> 0,75mm);
2. el 5% de volumen de macroporos anchos de SA, excluido del proceso debido al potencial utilizado (-2cm), le atribuye una mejor capacidad de infiltración que a SAG. Este volumen contiene poros grandes que permiten un flujo muy elevado, hecho que favorece sin lugar a duda al ingreso del agua en el suelo. También, le atribuye una mayor capacidad de captación de agua del suelo seco, con un 16,6% superior a SAG.

Por lo analizado, se puede afirmar en forma concluyente que el aibal tiene una mayor capacidad de infiltración que el sitio agrícola. Presenta una conductividad hidráulica saturada netamente superior, ya que en el aibal PT no ha participado en su totalidad en la infiltración. También, se destaca las mejores condiciones de la estructura de SA, que facilita el ingreso del agua en el suelo.

El valor de la conductividad hidráulica de SAG, se ubica en el mismo rango de clasificación que la obtenida por Aoki y Serrano (2.003) en un sitio agrícola ( $11\text{mm.h}^{-1}$ ). Cabe señalar que las condiciones generales en que han realizado las mediciones en el estudio citado, son similares al presente trabajo. En este contexto, el área de estudio presenta un clima semiárido con alrededor de 700mm de precipitación anual, con inviernos secos. El suelo es un Haplustol típico de textura franco limoso situado en la depresión de una cuenca, con más de diez años de uso agrícola con prácticas convencionales. El valor mencionado ha sido obtenido con un potencial de -2cm, utilizando un infiltrómetro de disco a tensión. También, se corresponde con los mencionados por la bibliografía nacional, como ser, García et al., (2.000) efectuaron mediciones con infiltrómetros de tensión sobre suelos Haplustoles típicos franco limosos (la fracción limo variaba de 58% en superficie a 62% en profundidad), con tenores de materia orgánica medios a bajos con la siguiente situación de manejo: 24 años de agricultura tradicional (arado, rastra y cincel) seguidos de 5 años de siembra directa; obtuvieron valores de conductividad hidráulica a saturación de  $23\text{mm.h}^{-1}$ .

En el trabajo de Aoki y Serrano (2.003) citado en el párrafo anterior, se han realizado mediciones a 3 succiones diferentes: 2, 4 y 6cm. A partir de los valores encontrados, extrapolaron a otras succiones mediante un modelo exponencial decreciente. Los resultados mostraron que a medida que la succión aumentaba la conductividad disminuía. Se encontró para el potencial 0cm un valor de  $14\text{mm.h}^{-1}$ , mientras que para el potencial -2cm el de  $11\text{mm.h}^{-1}$ , estableciéndose que los poros situados entre el rango de succión 0-2cm, han contribuido en un 26% al flujo total. Precisamente, los diámetros de poros de este rango son los que han quedado excluidos en SA. Esta situación, es un fuerte indicio de que si hubiese participado el 5% de volumen de macroporos anchos de SA, indudablemente se hubiese encontrado un valor mayor de K para el ambiente de pastizal. Es decir, realizar las mediciones con un potencial 0cm, sin lugar a duda se obtendría un valor más alto de K en SA. En cambio para SAG, se encontraría el mismo valor obtenido en este estudio, ya que el potencial utilizado (-2cm) ha implicado la participación del volumen total de poros.

Todo lo analizado, establece que el ambiente de aibal presenta una capacidad de infiltración más favorable que el sitio agrícola, por lo que se puede considerar que la hipótesis del trabajo es verdadera, afirmando que las prácticas agrícolas convencionales influyen en forma negativa sobre las propiedades hidráulicas del suelo de la sección baja de la subcuenca del área de estudio. Por ello, es importante destacar la importancia del pastizal en la protección física del suelo, resguardando en forma adecuada algunas de las funciones que cumple el suelo en un ecosistema (Nearing et al., 1.990; Karlen y Stott 1.994) como la de



permitir la entrada de agua a través de la superficie y facilitar su transporte interno, lo que contribuye sin lugar a duda, a una mejor capacidad de captación de agua por parte del bajo.

#### **4.4 Función e importancia del pastizal (ambiente sumidero de escorrentía) en la dinámica del agua y protección del suelo**

Las diferentes secciones de una cuenca presentan su rol particular en la dinámica del agua en respuesta a las precipitaciones. Las partes altas y laderas son zonas generadoras de escorrentía, mientras que las zonas bajas captan el agua proveniente de las zonas más altas. En estas secciones también se establecen como parte de la dinámica la infiltración, la evaporación y la evapotranspiración.

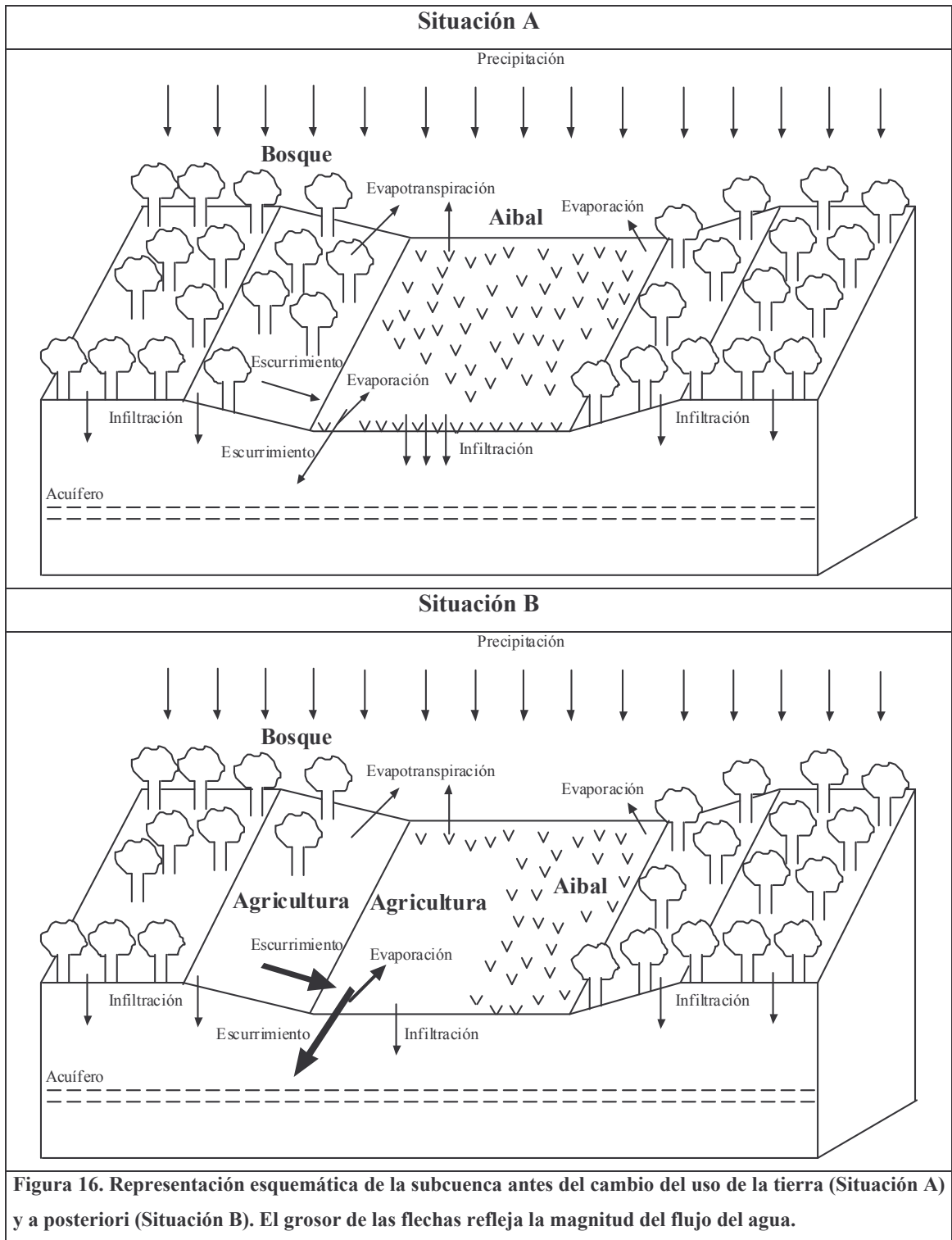
Esta dinámica está fuertemente vinculada a la vegetación, que tiene un papel destacable en la regulación del flujo del agua en una cuenca (Prat, 2.003). Una cobertura de vegetación bien constituida, en comparación con un suelo desnudo o con baja cobertura, establece:

- ❖ una minimización del impacto de las gotas de lluvia y del escurrimiento superficial de agua, protegiendo al suelo de la erosión;
- ❖ una mejor estructura del suelo que favorece al proceso de infiltración, lo que beneficia la disponibilidad de agua para las plantas y la recarga de acuíferos.

El reemplazo de los ecosistemas naturales por sistemas agrícolas, trae aparejado una reducción significativa de la cobertura vegetal y la degradación física del suelo. Estas modificaciones afectan la composición y estructura de las comunidades y los flujos de materia y energía (Dale et al., 2.000).

En el área de estudio, la superficie de tierra con cobertura de vegetación natural, integrada por bosque y sabana, disminuyó a causa de la expansión de la frontera agrícola, desde un 90% existente en 1.975 hasta el 54% en 1.997, principalmente por la transformación de unidades de sabana (Lorenz et al., 2.000). Este cambio en el uso de la tierra, tal como se ha demostrado en este estudio, ha causado que en el área agrícola la conductividad hidráulica del suelo disminuya. En consecuencia y, considerando la notable reducción del aibal en la depresión, la capacidad de captación de agua de esta sección de la subcuenca se ve disminuida, alterando la dinámica del agua.

La figura 16 es una representación esquemática de dos situaciones de la subcuenca, la primera (Situación A), antes del cambio del uso de la tierra y la segunda (Situación B), a posteriori. Sobre la base de estos escenarios, se procede a hacer algunas comparaciones y establecer los supuestos cambios identificados en la dinámica del agua en la subcuenca y sus implicancias para el ecosistema.



El agua ingresa al sistema vía precipitación. En la situación A, la mejor cobertura de vegetación evita el impacto directo de las gotas en el suelo y minimiza el escurrimiento superficial del agua, brindando protección al suelo de la erosión. Diversos estudios (Laguna, 1.989; López-Cuervo, 1.990; Castro, 1.993) demuestran que las áreas con cultivos en

pendiente, en comparación con el ambiente natural, presentan pérdidas significativas de suelo a causa de la erosión hídrica. En la situación B, el incremento de la escorrentía implica un mayor transporte de sedimento y de agua hacia la depresión. Precisamente, esta situación se evidencia con la presencia de capas de sedimentos en ésta sección de la subcuenca. Se puede apreciar que en el bajo, además de haber disminuido la capacidad para captar agua, se recibe más agua debido al incremento de la escorrentía en las zonas más altas, lo que hace suponer un incremento en la pérdida de agua de la subcuenca, ya que el exceso de agua que no infiltra, que es mayor en el caso B, se pierde por escurrimiento o se evapora. Esto implica una menor disponibilidad de agua para las plantas y una reducción de la recarga de acuíferos.

Las pérdidas de agua de lluvia por evaporación y por escurrimiento superficial en áreas con clima semiárido son sumamente cuantiosas. No se cuenta con estos datos para el área de estudio, sin embargo, en otras zonas del mundo, en ecosistemas semiáridos, se reportan pérdidas muy elevadas. Por ejemplo, en el norte-centro de México, una zona con una precipitación pluvial anual de 340mm, el 62% se pierde por evaporación y escurrimiento (González, 1.985). En numerosos estudios se comprueba las grandes pérdidas de agua en ecosistemas pastoriles que carecen de una cubierta vegetal estable. Por ejemplo, en el sur del Sahel, en África Occidental, también con un clima semiárido, Van Keulen y Breman (1.990) determinaron que solamente entre el 10 y el 15% de la precipitación queda disponible para la vegetación. Como causas de esto mencionan: pérdidas por la disminución de la infiltración, que resultan en un escurrimiento superficial severo y la elevada evaporación en la superficie del suelo.

Por lo analizado, se puede decir que el ambiente de aibal juega un rol destacable en la protección física del suelo, favoreciendo al proceso de infiltración y a una dinámica de agua más favorable para el ecosistema. Sin lugar a duda, ello beneficia a los sistemas productivos de la subcuenca. También, se destaca que presentan otras cualidades positivas en este aspecto, tales como: son una fuente de insectos polinizadores para los cultivos (Nabhan y Buchmann 1.997) y de enemigos naturales de las plagas que atacan a los mismos; entre otros aspectos, contribuyen a la regulación del clima, en la regeneración de la fertilidad de los suelos y en el control de inundaciones; purifican el agua y el aire y resguardan recursos genéticos, siendo el hábitat de numerosas especies (Costanza et al., 1.997).

A pesar de su importancia, muchas de las decisiones que se adoptan en relación con el manejo de los agroecosistemas, se llevan a cabo sin tener en cuenta los impactos ecológicos asociados a estas transformaciones y sin considerar un adecuado criterio científico.

En la actualidad, la Planificación del Uso de la Tierra (PUT) es considerado como una de las principales herramientas que posibilita conservar los ambientes, tanto para las generaciones presentes como para las futuras, así como satisfacer en forma aceptable a los sistemas productivos. Es importante destacar que la PUT contempla el ajuste de las prácticas de manejo para aminorar el impacto ambiental. En este sentido, en el sitio agrícola las prácticas utilizadas son las convencionales, lo cual implica un efecto más desfavorable para la conservación del suelo, en comparación de otras prácticas conservacionistas, como ser la siembra directa. Lamentablemente la PUT aún no se aplica en la provincia de Santiago del Estero, derivando, no solamente en la degradación de los suelos, sino también en la de sus diversos ambientes naturales.

## 5. CONCLUSIÓN

El cambio del Uso de la Tierra de pastizal natural a uso agrícola y la práctica de manejo que se utiliza (convencional), causan la degradación física del suelo en la depresión de la subcuenca. Esto provoca una fuerte tendencia a la disminución de la capacidad de infiltración, lo que lleva a disminuir la capacidad de captación de agua en el bajo, más aún si se considera el imponente grado de transformación que ha sufrido el aibal en esta sección de la subcuenca. Esta situación deriva en una menor disponibilidad de agua para las plantas y para la recarga de los acuíferos. Por lo que se puede concluir que:

- ❖ el uso agrícola con prácticas convencionales causó la degradación estructural del suelo, incrementado la densidad aparente y reduciendo la porosidad total;
- ❖ el sistema poroso del suelo cambió, produciéndose una reducción del 6% de volumen de macroporos anchos en el sitio agrícola;
- ❖ la distribución de tamaños de poros que ha participado en la infiltración es similar entre sitios, posiblemente por que el uso eventual del ganado en el aibal, ha acompañado de cerca a lo ocurrido en la agricultura en estos rangos de poros; se destaca que debido al potencial utilizado (-2cm), para el caso del aibal un 5% de volumen de macroporos ha quedado excluido de la infiltración, mientras que en la agricultura ha participado la totalidad de los poros;
- ❖ no se encontró diferencia significativa en la conductividad hidráulica con el potencial -2cm, debido a la similitud en la distribución de tamaños de poros, sin embargo, se observa una clara tendencia de valores mayores en el pastizal, hecho vinculado a la mejor estructura del suelo del aibal que favorece la continuidad de los poros y, en un grado menor, a que en el pastizal a participado 1% más de volumen de macroporos;
- ❖ el ambiente de pastizal tiene claramente una mayor capacidad de infiltración que el sitio agrícola, debido a que la conductividad hidráulica saturada  $K_s(\Psi=0)$  del aibal es considerablemente mayor al valor de  $K$  obtenido con el potencial -2cm, por la no participación del 5% de volumen de macroporos anchos en la infiltración, en cambio, para el caso de la agricultura,  $K_s(\Psi=0)$  coincide con el valor obtenido con el potencial -2cm, pues ha participado el total del volumen de poros;
- ❖ la disminución de la capacidad de captación de agua en la depresión, causa una reducción en la disponibilidad de agua para las plantas y de la recarga de acuíferos, situación que se agrava si se consideran las condiciones semiáridas del lugar;

- ❖ la planificación del uso de la tierra es una herramienta de vital importancia para el estado y el sector productor, que permite remediar la tendencia de la disminución de la capacidad de infiltración en la depresión de la subcuenca.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Amézquita, E. y Pinzón, A. 1991. Compactación de suelos por pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Pasturas Tropicales*. Vol. 13, Nº 2. 21-26 p.

Angulo- Jaramillo, R., F. Moreno, B. E. Clothier, J. L. Thony, G. Vanchaud, E. Fernández- Boy y J. A. Cayuela. 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 27-32.

Angulo- Jaramillo, R., J- P. Vandervaere, S. Roulier, J- L. Thony, J- P. Gaudet, M. Vauclin. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometer. A review and recent developments. *Soil & Tillage Research*. 55: 1-29.

Aoki, A. M. y Serrano, R. 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. La Plata, Argentina.

Blake, G. R. y Hartge, K. H. 1986. Bulk density. pp 363-375. En Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis*. Part 1: Physical and mineralogical methods. *Agronomy 9*, ASA, ASA, Inc., Publisher, 1.188p., Madison, Wisconsin, USA.

Blank, R. R., M. A. Fosberg. 1989. Cultivated and adjacent virgin soils in Northcentral South Dakota. I. Chemical and physical comparisons. *Soil Sci. Soc.* 53:1484-1490.

Boletta, P. E., 1988. Clima del Chaco Semiárido, Cap. I, pág. 7-21. En: *Desmonte y Habilitación de Tierras en la Región Chaqueña Semiárida*. Ed. Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe. Santiago, Chile.

Boletta, P. E., L. R. Acuña y M. L. Juárez. 1992. Análisis de las características climáticas de la provincia de Santiago del Estero y comportamiento del tiempo durante la sequía de la campaña agrícola 1998-1989. INTA-UNSE. Santiago del Estero. Argentina.

Bonneau, M., B. Souchier. 1987. *Edafología*. 2. Constituyentes y propiedades del suelo. Editorial Masson, S.A. Barcelona.

Bouma, J. y Wosten, J. H. M. 1979. Flow patterns during extended saturated flow in two undisturbed swelling clay soils with different macropores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 16-22.

Bucher, E. H., 1980. Ecología de la fauna chaqueña. *ECOSUR*, 7 (14): 111-159.

Burkart, G. 1969. *Flora ilustrada de Entre Ríos*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Colección Científica, Tomo VI, Parte 2, Buenos Aires, Argentina. xv + 551pp.

Cabrera, A. L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 14 (1-2): 1-42. Buenos Aires.

Cabrera, A. y A. Willink. 1973. *Biogeografía de América Latina*. Organización de Estados Americanos, Serie de Biología, Monografía 13, Washington, District of Columbia. 130 pp.

Castro, J., 1.993. Control de la erosión en cultivos leñosos con cubiertas vegetales vivas. Tesis Doctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Argentina.

Clothier, B. E. y I. White. 1.981. Measurement of sorptivity and soil diffusivity in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 117, 311-314.

Coria, R. D. 2.004. Influencia de la agricultura en las propiedades hidráulicas del suelo en un paisaje del Chaco Semiárido: I. Suelos en ambientes generadores de escorrentía. Trabajo final de grado. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina.

Costanza, R., R. D'arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, N. S., R. O'Neill, J. Paruelo, R. Rasking, P. Sutton y M. Van Den Belt. 1.997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.

Dale, V. H., S. Brown, R. A. Haueber, N. T. Hobbs, N. Huntly, R. J. Naiman, W. E. Riebsame, M. G. Turner y T. J. Valone. 2.000. Ecological principles and guidelines for managing the use of land. *Ecological Applications* 10: 639-670.

Danielson, R. E., P. L. Sutherland. 1.986. Porosity. pp 443-460. En Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy 9*, ASA, ASA, Inc., Publisher, 1.188p., Madison, Wisconsin, USA.

Doran, J. W., T. B. Parkin. 1.994. Defining and assessing soil quality. In: *defining soil quality for a sustainable environment*; Doran, J.W., D.C. Coleman., D.F. Bezdicek, B. A. Stewart., eds., *Soil Sci. Soc. Amer.*: Madison, Wis., p 3-21.

Duchaufour, Ph. 1.975. *Manual de edafología*. Editorial Masson, S.A., Barcelona.

Duchaufour, Ph. 1.987. *Manual de edafología*. 214 pp., Editorial Masson, S.A., Barcelona.

FAO, 1.984. *Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas*. Boletín de suelos de FAO 10, Roma.

García J., R. Corbella., G. Sanzano y G. Fadda. 2.000. Distribución del agua del suelo en sistemas de siembra directa en cultivo de soja. 11° Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del suelo. Bs. As., Argentina. Actas en CD-R.

Gardner, H. W. 1.986. Water content. pp 493-541. En Klute, A. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy 9*, ASA, ASA, Inc., Publisher, 1.188p., Madison, Wisconsin, USA.

Gavande, S. A. 1.991. *Física de los suelos, principios y aplicaciones*. 351 pp. Editorial LIMUSA. México.

Gil, Rodolfo 2.001. *El comportamiento físico-funcional de los suelos*. Información completa de divulgación científica. Instituto de suelos. INTA Castelar. República Argentina.



González, M. 1.985. Range management in arid regions as related to water conservation and use. En: Water and water policy in World Food Supplies. Proceedings of the conference. May 26-30, 1.985. Texas A&M University.

ISSS Working Group RB. 1.998. World reference base for soil resources. World Soil Resources Report 84, 88pp., FAO, ISRIC, ISSS, Rome.

Karlen, D. L., D. E. Stott. 1.994. A Framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. Pp 53-72. En Doran, J.W., D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, B. A. Stewart (ed). 1.994. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication Number 35, Wisconsin. USA.

Klute, A. (ed) 1.986. Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy 9, ASA, ASSA, Inc., publisher, 1.118p., Madison, Wisconsin, USA.

Klute, A., C. Dirksen. 1.986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. pp 687-734. En Klute, A. (ed). Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Agronomy 9, ASA, ASA, Inc., Publisher, 1.188p., Madison, Wisconsin, USA.

Kramer, P. 1.989. Relaciones hídricas de suelos y plantas. 533 p. Industria Editorial Mexicana. México.

Kunst, C., R. Renolfi, H. Pérez, A. Smeriglio, N. Sueiro & F. Dallatea (1.985) *Elionurus muticus* Spreng. Información Técnica, Área Recursos Naturales y Producción Animal N° 7. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Argentina. 4 pp.

Laguna, A., 1.989. Estudio cuantitativo de la erosión del suelo. Tesis Doctoral. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.

Lal, R. 1.996. Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. I. Soil physical and hydrological properties. Land Degradation & Development, Vol. 7, 19-45 p.

Ledesma, N. R y P. E. Boletta, 1.972. Clima de las regiones forestales argentinas. En: Actas del VII° Congreso Forestal Mundial, Tomo II pág. 2.151-2.155. VII° Congreso Forestal Mundial, 4 al 18 de Octubre de 1.972, Centro Cultural San Martín. Buenos Aires. Argentina.

López- Cuervo, S., 1.990. La erosión en los suelos agrícolas y forestales de Andalucía. Colección Congresos y Jornadas N 17/1.990. 11-16. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca.

Lorenz, G. 1.997. Sistema poroso del suelo, distribución de los tamaños de poros y curva de retención de agua. Apunte teórico-práctico de la cátedra Edafología Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina.

Lorenz, G., L. Bonelli, S. Roldán, C. Araya, y K. Rondano. 2.000. Soil quality change due to land use in a Kastanozem-Phaeozem soilscape of Semiarid Chaco. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 93, 169-172.

Minetti, J. L., L. R. Acuña. 1994. Régimen de variabilidad interanual de las precipitaciones anuales en el centro este de la provincia de Santiago del Estero. El salto climático de las décadas de 1.950-60. INTA. Santiago del Estero, Argentina.

Ministerio de Defensa. 1.978. Evaluación de recursos naturales por información obtenida mediante teledetección satelitarea. Mapa geomorfológico 1:250.000. Ministerio de Defensa. Buenos Aires, Argentina.

Morello, J. y J. Adámoli. 1.968. Las grandes unidades de vegetación y ambientes del Chaco Argentino. Primera Parte. Objetivos y metodología. INTA, Serie Fitogeográfica N° 10. Buenos Aires, Argentina.

Morello, J., J. Adámoli. 1.974. Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco Argentino. Segunda Parte. Vegetación y ambiente de la provincia del Chaco. La vegetación de la República Argentina, Serie Fitogeográfica 13, 130 p.

Nabhan, G. P. y S. L. Buchmann. 1.997. Services provided by pollinators. En: Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems (ed. G. Daily). Washington DC., Island Press: 133-150.

Nearing, M. A., L. J. Lane, E. E. Alberts y J. M. Laflen. 1.990. Prediction technology for erosion by water: Status and research needs. Soil Sci. Soc. Am. J.. 54: 1.702-1.711.

Page, A. L., R. H. Miller, D. R. Keeney (ed). 1.982. Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties. Agronomy 9, ASA, SSSA, 1.159p., Madision, Wisconsin, USA.

Perroux, K. M., I. White. 1.988. Design for disc permeameters. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1.205-1.215.

Philip, J. R., 1.957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci. 84, 257-264.

Philip, J. R., J. H. Knight. 1.974. On solving the unsaturated flow equation: 3. New quasi-analytical technique. Soil Sci. 117, 1-13.

Prat, N. 2.003. El agua en los ecosistemas. Motor y sustancia de la vida (Segunda Parte). Jornada sobre Agua y desarrollo sostenible. Departamento de Ecología. Universidad de Barcelona. ETSII. UPM.

Red Agroforestal Argentina. 1.999. Estudio integral de región del Parque Chaqueño. 2° Edición. Proyecto de Bosques Nativos y Áreas Protegidas. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. Secretaria de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental. República Argentina.

Roldán, S., G. Lorenz, L. Bonelli. 2.000. Aspectos de calidad de la materia orgánica del suelo en función del uso de la tierra en el centro este santiagueño. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, resúmenes extendidos en CD-R. Mar del Plata, Argentina.

Sánchez, P., C. Castilla, J. Alegre. 1.989. Grazing pressure effects on the pasture Degradation Process. Documento No. 42511 CIAT. 182-187 p.

Schlichting, E., H. P. Blume, K. Stahr. 1.995. Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. Pareys Studentexte 81, 295pp., Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin.

Smettem, K. R. J., J. Y. Parlange, P. J. Ross, R. Haverkamp. 1.995. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 3. Parameter estimation using a double-disk tension infiltrometer. *Water Res. Res.*, 31, 2.491-2.495.

Smettem, K. R. J., J.-Y. Parlange, P. J. Ross, R. Haverkamp, 1.994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disk infiltrometer. 1. A capillary-based theory. *Water Resour. Res.* 30: 2.925-2.929.

Smith, H. J. C., G. J. Levy y I. Shainberg. 1.990. Water-droplet energy and soil amendments: effect on infiltration and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1.084-1.087.

Soil Survey Staff. 1.998. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Edición N<sup>o</sup> 8. Washington.

SYSTAT. 1992. Statistic, version 5.2 edition. SYSTAT Inc. Evanston, USA.

Thompson, L. M. 1.965. El suelo y su fertilidad. 3<sup>o</sup> Edición. Editorial Reverté S. A. Barcelona-Buenos Aires-México. MCMLXVI.

U. S. Dept. of Agriculture. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. 1.993. Soil Survey Manual. U. S. Dept. of Agric. Handb. 18. U. S. Govt. Print. Off. Washington, DC. 437 pp.

Van der Weert, R., K. J. Lenselink. 1.972. The influence of mechanical clearing of forest on some physical and chemical soil properties. *Surin. Landb.* 20: 2-14.

Van Genuchten, M. T. 1.980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 892-898.

Van Keulen, H. y H. Breman, 1.990. Agricultural development in the West African Sahelian region: a cure against land hunger? de: *Agricultural Ecosystems and Environment*, 32 (1.990) 177-197, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam

Vandervaere, J. P., M. Vauclin, D. E. Elrick. 2.000a. Transient flow from tension infiltrometers: I. The two-parameter equation. Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1.263-1.272.

Vandervaere, J. P., M. Vauclin, D. E. Elrick. 2.000b. Transient flow from tension infiltrometers: II. Four methods to determine sorptivity and conductivity. Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1.272-1.284.

Wilson, G. V. y R. J. Luxmoore. 1.988. Infiltration, macroporosity and mesoporosity distributions on two fore sted watersheds. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 329-335.