

# MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL PERFIL DE UN HAPLUSTOL BAJO CONDICIONES DE BOSQUE NATIVO Y MONOCULTIVO DE SOJA

## Soil Water Movement in a Haplustol Profile under Native Forest and Soybean Monocropping Conditions

M. R. Ateca<sup>1‡</sup>, A. M. Aoki<sup>1</sup> y R. Sereno<sup>1</sup>

### RESUMEN

El movimiento de agua en suelos estructurados naturalmente difiere de aquéllos homogeneizados de manera artificial. Está reconocido que la variabilidad espacial de las propiedades físicas, hidráulicas y topográficas del suelo afectan los procesos hidrológicos que tienen lugar en el mismo y, además, son modificados por la vegetación. Se pretende analizar la distribución espacial del movimiento de agua en el perfil de un suelo Haplustol típico bajo condiciones de bosque nativo y monocultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] y labranza tradicional durante dos períodos de humedecimiento y uno de desecamiento natural en un campo ubicado en la región central de Córdoba, Argentina. Cuatro sitios de ensayo se caracterizaron y evaluaron hidrológicamente en períodos de humedecimiento y desecamiento. Se observó que la variabilidad espacial de las propiedades físicas, hidráulicas y topográficas del suelo se manifiesta por un comportamiento diferente en el proceso de acumulación y redistribución del agua edáfica de cada sitio de ensayo. Sin embargo, este proceso presenta un patrón temporalmente estable.

**Palabras clave:** *Glycine max* (L.) Merr., agua del suelo, conductividad hidráulica, infiltración-redistribución, variabilidad espacial.

### SUMMARY

The soil water movement through naturally structured soils is different from those artificially homogenized. It is acknowledged that spatial variability of physical,

hydrological, and topographic soil properties affects hydrological processes, which is also modified by vegetation. The goal of this research was to analyze spatial distribution of soil water movement in a Typic haplustol under woodland and soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] monoculture and conventional tillage, during two wetting and one natural drying periods, in a field located in the central region of Córdoba (Argentina). Four trial sites were characterized and the hydrological response was evaluated during wetting and drying periods. The spatial variability of physical, hydraulic, and topographic soil properties was manifest in different responses in the processes of accumulation and redistribution of soil water at each trial site. However, this process shows a seasonally stable pattern.

**Index words:** *Glycine max* (L.) Merr., soil water, hydraulic conductivity, infiltration-redistribution, spatial variability.

### INTRODUCCIÓN

En la provincia de Córdoba, República Argentina, gran parte de la integridad física, química y biológica de los suelos se ve condicionada por una serie de características del ambiente, como: presencia de un relieve con gradientes y longitudes de pendientes susceptibles a la erosión hídrica; suelos de composición edafogénica frágil, con bajos niveles de estructura y materia orgánica; clima con una fuerte concentración estival de las lluvias; cultivos que proveen poca cobertura y sistemas de labranzas inadecuados. Por otra parte, existe una deficiencia de agua, acentuada por el impacto de un uso y manejo del suelo inapropiado, que repercute sobre sus propiedades hidráulicas (Mendoza-Reinoso y Porcel de Peralta, 1997).

En ambientes semiáridos, como en la región en estudio, la determinación de la heterogeneidad espacial y temporal de la humedad del suelo es crítica para predecir procesos hidrológicos (Fitzjohn *et al.*, 1998).

<sup>1</sup> Grupo de Gestión Ambiental de Suelos y Agua, Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNC. Av. Valparaíso s/n, Ciudad Universitaria. CC (PO Box) 509, 5000 Córdoba, R. Argentina.

<sup>‡</sup> Autor responsable (marateca@agro.uncor.edu)

El identificar las fuentes de variabilidad y describir la naturaleza de la misma tiene un efecto decisivo en el éxito de cualquier modelación. Esta variación espacial puede determinarse por medio de relaciones derivadas teórica o empíricamente observadas y descritas por tendencias cartografiadas (Beven y Kirkby, 1979).

La humedad del suelo exhibe una gran heterogeneidad en el espacio y el tiempo, aun en cuencas pequeñas (Gomez-Plaza *et al.*, 2000; Ateca *et al.*, 2001). Esta variabilidad puede deberse a diferencias en la topografía (Burt y Butcher, 1985), suelos (Havley *et al.*, 1983), vegetación (Dunne *et al.*, 1991) y uso del suelo (Fu *et al.*, 2003). Entre los factores que controlan la humedad del suelo algunos autores consideran que el principal es la textura (Vachaud *et al.*, 1985).

En el mismo sentido, está ampliamente reconocido que en cuencas pequeñas la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas complica la comprensión y el cálculo de la infiltración y el escurrimiento (Loague y Gander, 1990). A menudo, la distribución del agua en el perfil del suelo después del humedecimiento no es uniforme (Gardner, 1974). La fracción de la porosidad total que contribuye al flujo de agua influye en la profundidad a la que el agua penetra después de la infiltración (Lin *et al.*, 1996). Además, las propiedades estructurales de los suelos y su escala, la densidad y las características espaciales de la cobertura del suelo y la estructura radical de la vegetación, normalmente no se mencionan en los estudios (Dunne *et al.*, 1991), por lo que no es fácil interpretar los procesos físicos responsables de la variabilidad.

La variabilidad de las propiedades del suelo, tanto en dirección vertical como horizontal, tiende a presentar correlación espacial. En este sentido, la geoestadística permite estimar una variable física en un bloque o un punto, utilizando medidas de esta variable efectuadas en puntos vecinos; así pues, si se dispone de un número adecuado de medidas se pueden obtener mapas con la distribución espacial de las variables (Taboada-Castro *et al.*, 1998).

Estas variabilidades y correlaciones de las propiedades del suelo permiten diferenciar zonas de puntos más o menos homogéneos, agrupados geoespacialmente dentro de una determinada área de estudio. Esto, en consecuencia, incide en la funcionalidad del perfil, según su posición espacial, lo que a su vez ocasiona una variabilidad espacial de la producción de los cultivos en un mismo tipo de suelo.

Por otra parte, es necesario contar con situaciones testigo, es decir, patrones de referencia a partir de los cuales se puedan comparar, analizar y discutir distintas condiciones actuales. La escasez de publicaciones que contemplan situaciones de "no uso" demuestra la dificultad de contar con ellas para los trabajos de investigación (Cisneros *et al.*, 1997).

En este trabajo se pretende caracterizar el movimiento del agua en el perfil de un suelo Haplustol típico bajo condiciones de bosque nativo y monocultivo de soja, en dos períodos de humedecimiento y uno de secado natural.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en un campo ubicado a 25 km al sur de la ciudad de Córdoba (31° 29' S y 64° 13' O), República Argentina, durante la campaña 1997-1998. El área posee un clima semiárido, con 750 mm de precipitación anual, régimen monzónico con inviernos secos. La vegetación original está conformada por un bosque abierto, donde se destacan especies arbóreas como algarrobo blanco (*Prosopis alba*), algarrobo negro (*Prosopis nigra*), quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) y especies herbáceas, entre las que predominan los géneros *Paspalum*, *Setaria*, *Trichloris*, *Stipa* y *Bromus*, entre otros. El suelo se clasificó como Haplustol típico y el perfil modal presentó los siguientes horizontes: Ap 0-14 cm, A2 14-20 cm, Bw 20-40 cm, BC 40-60 cm, C1 60-84 cm, Ck +84 cm. La pendiente media del terreno oscila entre 0.8 y 1.2% (Romero *et al.*, 1995).

Se seleccionaron cuatro sitios para los ensayos: una situación testigo, que corresponde a un suelo bajo bosque nativo (BN), y tres correspondientes a suelos en los que se realizó monocultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merr.] con labranza convencional para la zona. Estos últimos sitios se eligieron por su ubicación espacial dentro de una microcuenca de 9.3 ha y corresponden a un punto de alta humedad (AH), en la parte baja; otro de baja humedad (BH), ubicado en un área intermedia, ligeramente convexa e influenciada por un islote de bosque nativo; y un tercer sitio, con valores intermedios de humedad (MH). Entre los sitios de ensayo no existe asociación espacial (Apezteguía *et al.*, 1999). Las mediciones se realizaron en el suelo sin cobertura antes de la implantación del cultivo de soja. Cabe aclarar que el sitio BN se encuentra a 1000 m de la microcuenca y

no debe confundirse con el islote de bosque nativo que se encuentra en ella.

Para la selección de los sitios de ensayo se utilizó el índice topográfico de Beven y Kirkby (1979). Este índice permite diferenciar zonas con pendientes altas que no reciben aporte de agua, de zonas con menores pendientes y que poseen una mayor tendencia a la saturación o encharcamiento, debido a que colectan el agua proveniente de otras superficies. Además, se tomaron en cuenta trabajos anteriores del grupo de investigación, como: 1) la caracterización topográfica de la microcuenca: efectuada mediante un levantamiento altimétrico en cuadrícula 20.83 m x 20.83 m, con nivel montado (114 puntos), con lo que se obtuvo el plano de curvas de nivel, a partir del cual se simuló un modelo numérico de terreno; 2) el análisis de la variabilidad espacial en el contenido de humedad del suelo (Apezteguía *et al.*, 1999); y 3) el estudio de la variabilidad espacial del cuerpo natural del suelo. Para ello, se midió con barreno la profundidad del horizonte superficial y la del horizonte cálcico, en 57 puntos.

En la Figura 1 se aprecia la ubicación de los sitios en estudio elegidos en la microcuenca. La misma está delimitada mediante bordos y tiene pendiente en sentido oeste-este. La salida del escurrimiento de la microcuenca

es a través de un aforador ubicado en el extremo sudeste de la misma.

En los sitios de ensayo se extrajeron muestras de suelo de los primeros 20 cm y se caracterizaron en cuanto a: porcentaje de arena, limo y arcilla, por el método de la pipeta (Gree y Bauder, 1986); pH (relación suelo:agua 1:2.5); porcentaje de materia orgánica (MO), por el método de Walkley y Black (1934); densidad aparente, según lo describe Blake y Hartge (1986); e índice de agregación (Wu *et al.*, 1990).

Se observaron las variables meteorológicas con una estación automática (Davis Weather Monitor II) instalada en el lugar del ensayo (Figura 1). La evapotranspiración potencial (ETP) se calculó utilizando la metodología de Penman (1948).

Se utilizaron datos de medición semanal de humedad del suelo con sonda de neutrones hasta 2.80 m de profundidad (en intervalos de 0.20 m) en los cuatro sitios de ensayo seleccionados.

Para caracterizar la infiltración en los sitios de ensayo, se realizaron mediciones con un infiltrómetro de tensión que aplica agua con presiones menores o iguales a la presión atmosférica (Perroux y White, 1988); éstas se hicieron antes de la época de siembra del cultivo de soja, sobre suelo al que se le limpió la cobertura de

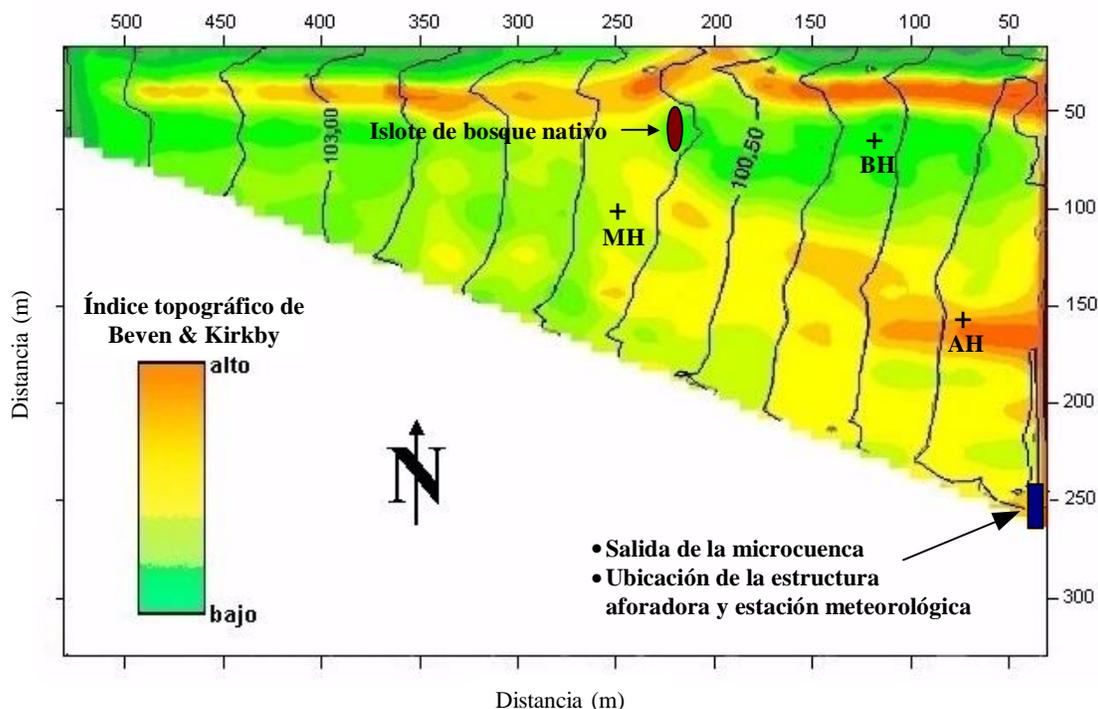


Figura 1. Ubicación de los sitios de ensayo de alta humedad (AH), moderada humedad (MH) y baja humedad (BH) sobre una zonificación de la microcuenca, según el índice topográfico de Beven y Kirkby (1979).

rastrajo y que presentaba una costra superficial fina. Las mediciones se hicieron a tres tensiones: 20, 40 y 80 mm, en el sitio BN; 20, 40 y 60 mm, en los sitios BH, AH y MH.

Con las medidas realizadas en campo, en los distintos sitios de ensayo, se determinó la conductividad hidráulica no saturada ( $K_o$ ) del suelo, mediante el método de Ankeny *et al.* (1991), por ser éste uno de los que minimiza los errores experimentales en el cálculo de  $K_o$  (Aoki y Sereno, 2005a). A partir de las determinaciones mencionadas, en los sitios BH, AH y MH se extrapolaron los valores de  $K_o$  hasta tensiones de 80 mm, mediante un modelo exponencial decreciente.

El análisis estadístico de los distintos factores se realizó mediante estadística descriptiva; se buscó una significancia entre tratamientos mediante la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de propiedades del suelo de los sitios muestreados se observan en el Cuadro 1.

Desde el punto de vista textural, los cuatro sitios de ensayo poseen un horizonte superficial de clase franco-limosa; el sitio de ensayo BH tiene un mayor contenido de arena, mientras que el sitio AH posee un mayor contenido de arcilla. Los sitios MH y BN poseen un contenido intermedio de ambos elementos.

Si se relaciona el espesor del horizonte superficial y la profundidad del  $\text{CaCO}_3$  (Cuadro 1) con la ubicación

espacial de los sitios elegidos en la microcuenca, se observa que el sitio BH es un área de pérdida o erosión de partículas finas (arcilla), mientras que el sitio AH es un sitio de depósito y acumulación de dichas partículas, lo que se traduce en un mayor espesor del horizonte superficial y una mayor profundidad del  $\text{CaCO}_3$ . Marelli (1989) sostiene que, con frecuencia, el sedimento de grandes parcelas de escurrimiento o de pequeñas subcuencas se ve enriquecido básicamente con arcilla y limo, de donde se deduce que en el sitio erosionado se encontrará un aumento residual de partículas gruesas.

La densidad aparente suele utilizarse como indicadora de compactación (Greenland, 1981); si se observan los valores de ésta se constata que los sitios de ensayo de la microcuenca poseen una tendencia significativa a la compactación, si se les compara con el sitio BN (Cuadro 1). Esto está estrechamente relacionado con la porosidad total del suelo, propiedad de suma importancia en los procesos de movimiento de agua y aire en el mismo. En este sentido, el sitio de ensayo BN poseería una mayor porosidad total, por su mayor contenido de MO (Cuadro 1) y su no laboreo. Es importante destacar que los suelos limosos ofrecen serios inconvenientes en cuanto a su capacidad de regenerar macroporos (Douglas *et al.*, 1986). Ello se atribuye a que, a menudo, son débilmente estructurados, con limitado potencial de expansión-contracción y, además, se compactan fácilmente. En Argentina este problema afecta a muchos suelos agrícolas (Pecorari *et al.*, 1990).

**Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas de los sitios de ensayo.**

|  | Sitio de ensayo <sup>†</sup> |                 |                 |                 |
|--|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | BN <sup>‡</sup>              | BH <sup>‡</sup> | MH <sup>‡</sup> | AH <sup>‡</sup> |
| Profundidad de muestreo (cm)             | 0-20                         | 0-20            | 0-20            | 0-20            |
| Clase textural                           | Franco limosa                | Franco limosa   | Franco-limosa   | Franco-limosa   |
| Arena (%)                                | 24                           | 29              | 18              | 15              |
| Limo (%)                                 | 56                           | 63              | 62              | 57              |
| Arcilla (%)                              | 20                           | 8               | 20              | 28              |
| pH                                       | 5.86 a                       | 6.53 b          | 6 a             | 6.55 b          |
| Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) | 1.04 a                       | 1.25 b          | 1.26 b          | 1.19 b          |
| Porosidad total <sup>§</sup>             | 0.61                         | 0.53            | 0.52            | 0.55            |
| Materia orgánica ( $\text{g kg}^{-1}$ )  | 37.6 a                       | 19.3 b          | 23.5 c          | 27.1 d          |
| Índice de agregación <sup>¶</sup>        | 65 a                         | 29.8 b          | sd              | 38 c            |
| Espesor horizonte superficial (cm)       | 27                           | 23              | 23              | 26              |
| Profundidad del $\text{CaCO}_3$ (cm)     | 88                           | 66              | 91              | 118             |

<sup>†</sup> Valores seguidos de letras distintas difieren significativamente, según el test de Tukey ( $P < 0.05$ ).

<sup>‡</sup> BN = bosque nativo; BH = área de baja humedad; MH = área de moderada humedad; AH = área de alta humedad.

<sup>§</sup> Valores estimados a partir de la densidad aparente.

<sup>¶</sup> Índice de agregación realizado con muestras compuestas (sd = sin dato).

Al analizar estas diferencias significativas en los valores de densidad aparente y al compararlas con los valores de contenido de MO, se observa que están inversamente relacionadas (Cuadro 1). Si se comparan los sitios BH y MH, respecto a AH, se observan diferencias significativas en el contenido de MO, debido a su ubicación diferencial en la topografía de la microcuenca; de este modo, BH y MH, como se mencionó anteriormente, sufrirían mayor erosión de la capa superficial y pérdida de material rico en MO y otros elementos del suelo; mientras que en el punto AH se originan condiciones más propicias para el desarrollo de mayor biomasa aérea y subterránea y la posterior incorporación de un volumen mayor de MO. Esto se corrobora con el índice de agregación, en donde también se observaron diferencias significativas entre los sitios BH y AH. Por otra parte, si se relacionan los sitios ubicados en la microcuenca con la situación testigo se observa que BN tiene una menor densidad aparente y un mayor contenido de MO. En general, se puede afirmar que la utilización del recurso natural degrada las características presentes en la condición sin laboreo (Pilatti *et al.*, 1988). La pérdida de MO en los sitios de la microcuenca se debe al permanente monocultivo de soja, mientras que la inalteración del bosque nativo favorece que ésta se conserve. Esto se corrobora con los valores del índice de agregación, que también muestran

diferencias significativas entre ambos sistemas de uso (Cuadro 1).

Para caracterizar el movimiento de agua en el perfil del suelo se seleccionaron períodos con y sin precipitación. El período de medición de humedad del suelo comprendió entre el 24/11/1997 y el 24/12/1997. Este lapso incluye dos ciclos de humedecimiento: A) entre el 24/11/1997 y el 15/12/1997, en el que se registraron 183 mm, y B) entre el 19/12/1997 y el 24/12/1997, con 38 mm de precipitación; las mediciones de humedad del suelo se realizaron al inicio y al final de cada ciclo, y un ciclo de desecamiento: C) entre el 15/12/1997 y el 19/12/1997, con mediciones diarias de la humedad del suelo. La Figura 2 muestra la precipitación y los ciclos húmedos y secos durante los meses de estudio. Se debe mencionar que el mes de noviembre tuvo 28 mm y diciembre 114 mm sobre los valores normales de precipitación de la región.

En las Figuras 3 y 4 se observa el patrón de comportamiento individual de acumulación y redistribución de agua en los distintos sitios de ensayo en los dos períodos de humedecimiento. Se evidencia variabilidad espacial de estas propiedades del suelo entre los sitios ubicados en la microcuenca. La cantidad e intensidad de las precipitaciones es igual en los sitios de ensayo, sin embargo, los procesos de infiltración y redistribución de agua en el perfil tienen características

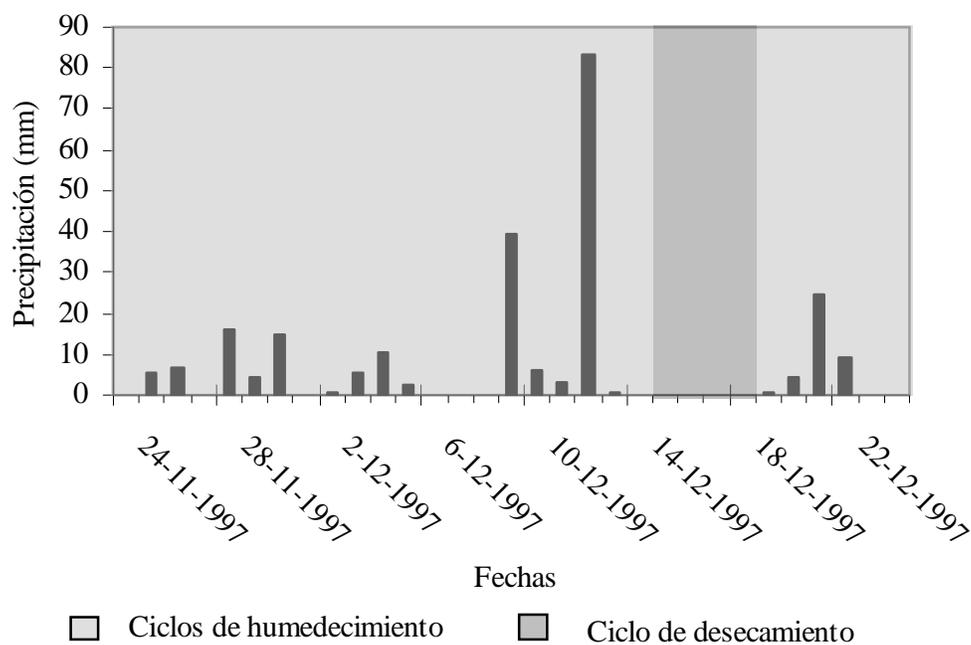


Figura 2. Distribución de las precipitaciones en el período analizado (noviembre-diciembre de 1997) en la microcuenca.

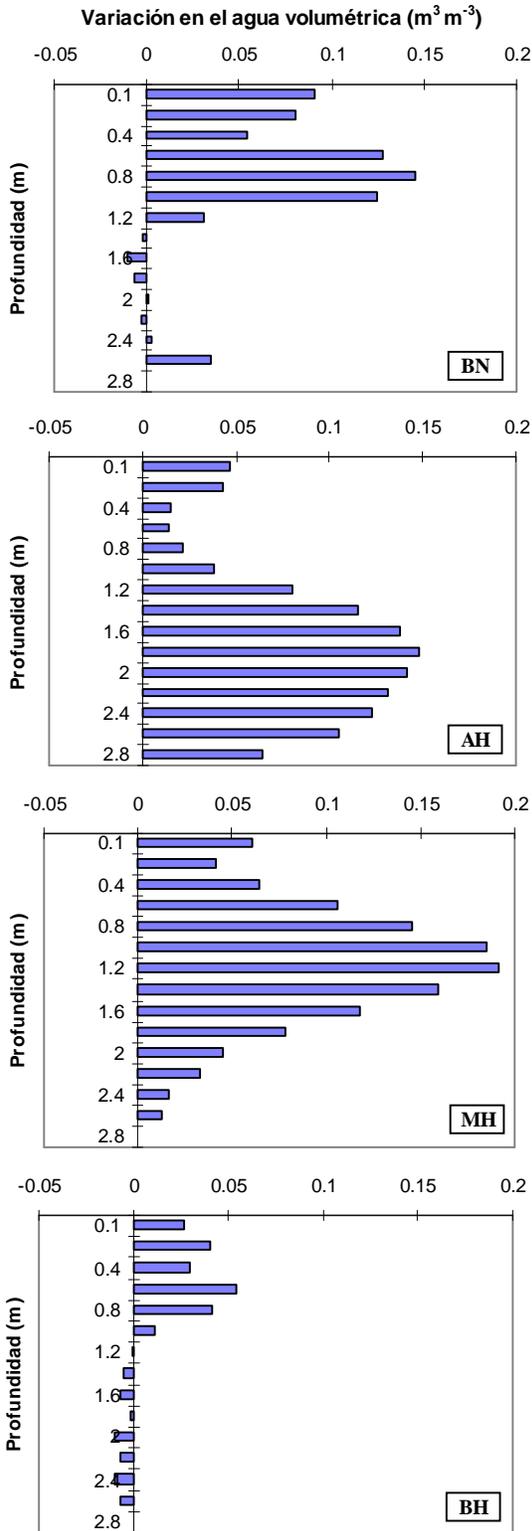


Figura 3. Variación en el contenido de agua volumétrica en el perfil de los cuatro sitios de ensayo medidos en el período de humedecimiento. Fechas de medición 24/11/1997 y 15/12/1997. Precipitación acumulada en el período: 183 mm. BN = bosque nativo, AH = alta humedad, MH = media humedad y BH = baja humedad.

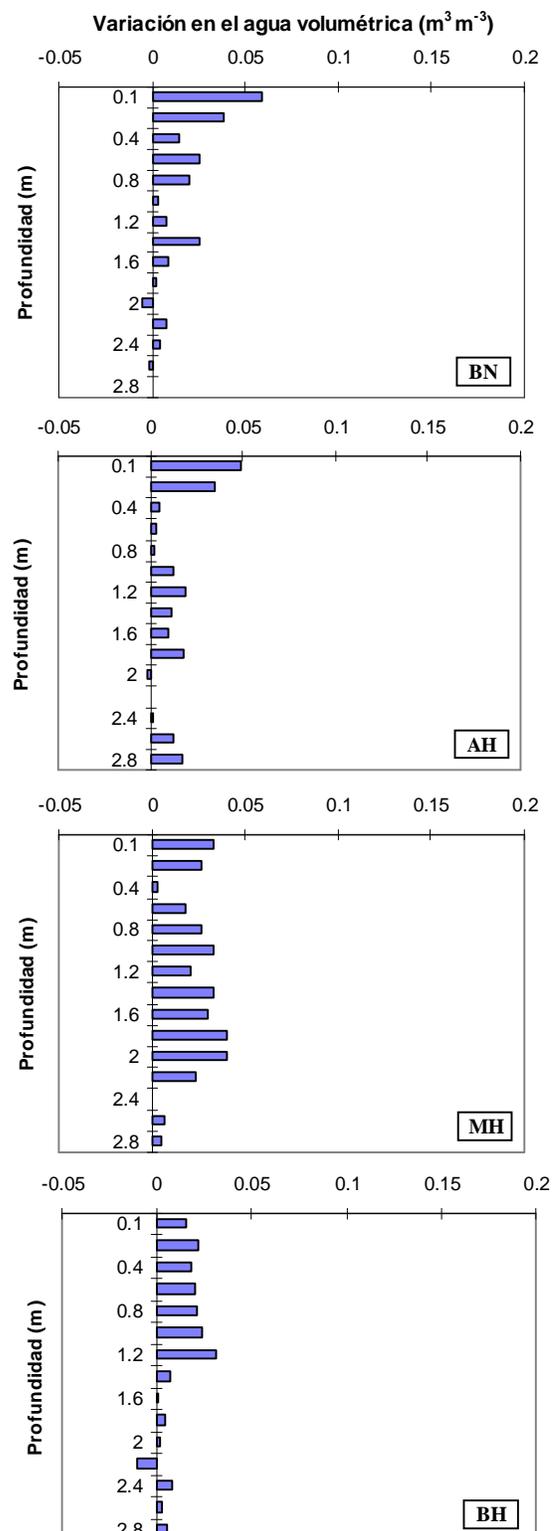
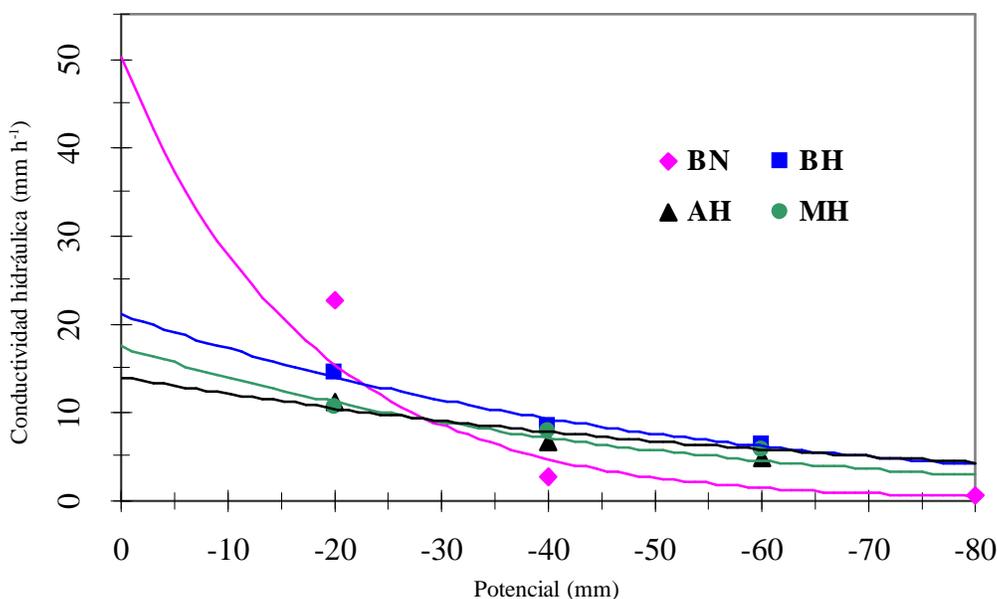


Figura 4. Variación en el contenido de agua volumétrica en el perfil de los cuatro sitios de ensayo medidos en el período de humedecimiento. Fechas de medición 19/12/1997 y 24/12/1997. Precipitación acumulada en el período: 38 mm. BN = bosque nativo, AH = alta humedad, MH = media humedad y BH = baja humedad.



**Figura 5.** Conductividad hidráulica superficial de los sitios BN (bosque nativo), BH (baja humedad), MH (media humedad) y AH (alta humedad), medida a diferentes potenciales y extrapolada a otros mediante un modelo exponencial.

propias en cada sitio. Esto se relaciona con lo que se observa en la Figura 5, la cual muestra valores distintos de  $K_0$  estimados para los diferentes sitios de ensayo. Si se analizan comparativamente los valores presentados en esa figura, se destaca que los valores más elevados de  $K_0$  entre 0 y -20 mm de presión corresponden a BN, lo que concuerda con su mayor índice de agregación y contenido de MO y su menor densidad aparente (Cuadro 1). Esto le conferiría una mayor macroporosidad, lo que favorecería la infiltración a bajas succiones y, en consecuencia, una mayor acumulación de agua superficial tras un corto período de lluvia (Figura 3).

En la Figura 5 también puede observarse que a menores potenciales los valores de  $K_0$  de BN caen por debajo de los sitios de la microcuenca (BH, MH y AH), lo que indicaría una mayor heterogeneidad en la distribución porcentual de tamaños de poros en el bosque respecto al suelo labrado. En este sentido, Lin *et al.* (1996) afirmaron que el movimiento del agua en suelos estructurados naturalmente, debido a que poseen macroporos y poros biológicos, es diferente del de aquellos suelos homogeneizados artificialmente. Puede destacarse también que los valores de  $K_0$  para los distintos potenciales medidos en los sitios ubicados en la microcuenca son mayores en el sitio BH, lo cual es más notable a potenciales mayores.

Como se mencionó anteriormente, la ubicación topográfica de los sitios de ensayo determina los procesos

de desprendimiento, transporte y acumulación de las partículas finas del suelo, y afecta en forma directa la  $K_0$ . White *et al.* (1992), efectuando un transecto de medidas de sortividad y  $K_0$  pendiente abajo, desde un área pedregosa a otra con vegetación en una zona árida, estimaron un valor mínimo de  $K_0$  en una zona de depósito de sedimentos finos que reducía el tamaño medio de poros. Es interesante resaltar que la condición de mayor humedad del sitio AH (Figura 1), a pesar de que posee menores valores de  $K_0$  a menores potenciales de medición, está dada por su ubicación topográfica en una zona baja de la microcuenca, lo que favorece la acumulación y retención de agua superficial y, en consecuencia, un mayor almacenamiento de ésta en el perfil. Por el contrario, en el punto BH, a pesar de poseer los mayores valores de  $K_0$ , el agua escurre rápidamente al encontrarse en un lugar un poco convexo y más elevado. Esto señala la importancia del relieve en la distribución del agua edáfica en la microcuenca.

Al analizar el comportamiento del sitio MH, se observa que a bajos potenciales éste posee valores intermedios de  $K_0$ , si se comparan con los otros dos sitios de ensayo de la microcuenca, mientras que a mayores potenciales los valores de  $K_0$  caen por debajo de los de AH y BH. Si se tiene en cuenta que los valores de densidad aparente y porosidad total de los tres sitios de ensayo no difieren significativamente (Cuadro 1), las diferencias en la funcionalidad del horizonte superficial,

dada por la conductividad hidráulica, se explicarían por las características en la configuración del sistema poroso (Lin *et al.*, 1996), su geometría (tamaño y continuidad) y estabilidad (Aoki y Sereno, 2005b).

Durante el período de desecamiento (15/12/1997 al 19/12/1997) la humedad se determinó en forma diaria, a pesar de que se sugiere dejar 2 ó 3 días entre mediciones

para optimizar el funcionamiento del instrumental. La ETP diaria estimada en dicho período fue de 4.9 mm. La relación del contenido de agua volumétrica, en distintas profundidades en los sitios de ensayo, señala que la llegada del frente de humedad ocurre en momentos diferentes, lo que confirma velocidades de infiltración diferentes. Por ejemplo, en el sitio de ensayo

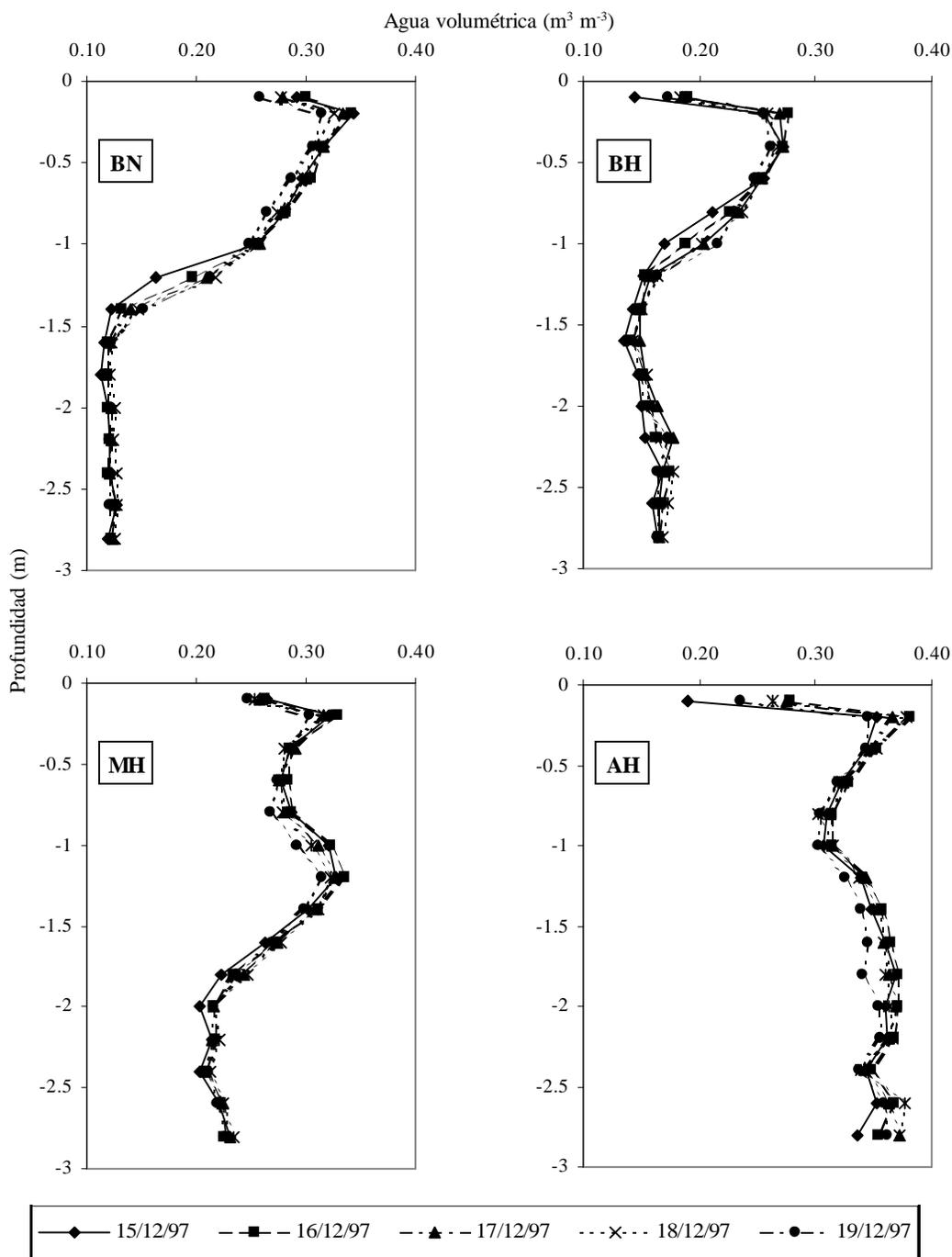


Figura 6. Variación en el contenido de agua volumétrica en un período de desecamiento (15/12/1997 al 19/12/1997) para los distintos sitios de ensayo. BN = bosque nativo, BH = baja humedad, MH = media humedad y AH = alta humedad.

BH (Figura 6), este frente llega el día 16/12/1997 a 0.2 m de profundidad, el 17/12/1997 a 0.4 m, el día 18/12/1997 a 0.8 m y el 19/12/1997 a 1.0 m de profundidad; a partir de 1.2 m no se observan variaciones en el contenido de agua volumétrica. En el bosque (Figura 6) se observa que el día 16/12/1997 se encuentra el mayor valor de humedad a 0.2 m, el 17/12/1997 a 0.8 m, el 18/12/1997 a 1.2 m y el 19/12/1997 a 1.4 m; a partir de esa profundidad se confunden los valores de distintas fechas. En el sitio de ensayo MH se observa que el frente de humedecimiento llega el 16/12/1997 hasta 1.4 m y el 18/12/1997 a 1.50-2.20 m y se mantiene constante el contenido de humedad debajo de 2.20 m de profundidad. Más complicado es el análisis en el punto AH (Figura 6), donde en el día 16/12/1997 se alcanzan valores superiores de agua volumétrica en distintas profundidades. En este caso, no es tan clara la respuesta como en los puntos anteriores, debido seguramente a una infiltración de agua en forma retardada que solapa el proceso de redistribución. Este comportamiento puede deberse a valores diferentes de  $K_0$  en las distintas profundidades.

Se puede afirmar que la variabilidad espacial de las propiedades físicas e hidráulicas (Dunne *et al.*, 1991) modifica el proceso de infiltración-redistribución, que no es homogéneo (Gardner, 1974) en la microcuenca. Por otra parte, el componente topográfico, como se resaltó anteriormente, juega un papel decisivo en la manifestación de estos procesos.

En el bosque, además del valor de  $K_0$ , se debe considerar la interceptación vegetal y el consumo producido por el sistema radical, que extrajo 111 mm de agua durante los períodos considerados. En el punto BH, al menor valor de  $K_0$  con respecto a AH, debe sumarse el escurrimiento que sufre ese sitio de ensayo al encontrarse en un lugar topográficamente más elevado. En uno de los eventos de precipitación ocurridos en el período considerado, se registraron 11 mm de escurrimiento. El sitio AH difiere de los anteriores, por el valor de  $K_0$  y su ubicación como zona de acumulación de agua, lo cual indica menor velocidad de infiltración y mayor tiempo de permanencia de agua en el perfil, como se mencionó anteriormente.

## CONCLUSIONES

En regiones semiáridas la caracterización del movimiento del agua edáfica bajo condiciones de bosque nativo y monocultivo de soja muestra que:

- La variabilidad espacial de las propiedades físicas, hidráulicas y topográficas del suelo se manifiesta por un comportamiento diferente en el proceso de acumulación y redistribución del agua edáfica de cada sitio de ensayo. Esta variabilidad debe tenerse en cuenta cuando se modela el contenido de agua del suelo, en especial en superficies pequeñas, y aun con pendientes no pronunciadas (0.8 a 1.2%).
- El proceso de almacenamiento y redistribución del agua en los sitios de ensayo presenta un patrón temporalmente estable.
- Los sitios de ensayo de la microcuenca muestran heterogeneidad en su comportamiento en el período de desecamiento, manifestada en su diferente velocidad de redistribución.
- El patrón de secado del sitio de ensayo de baja humedad presenta similitud con el correspondiente a bosque nativo, aunque el contenido de agua volumétrica es menor debido a sus propiedades físicas, hidráulicas y topográficas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por la SeCyT de la Universidad Nacional de Córdoba.

## LITERATURA CITADA

- Ankeny, M. D., T. C. Kaspar, and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 467-470.
- Aoki, A. M. y R. Sereno. 2005a. Comparación de metodologías de cálculo de propiedades hidráulicas de un suelo a partir de datos medidos con infiltrómetro de disco. *Agric. Téc. (Chile)* 65: 204-209.
- Aoki, A. M. y R. Sereno. 2005b. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. *Agric. Téc. (Chile)* 65: 295-305.
- Apezteguía, H., R. Sereno, A. Aoki, M. Ateca, L. Romero, R. Mendoza, G. Esmoriz y W. Robledo. 1999. Distribución espacial de la humedad del suelo en una microcuenca de Córdoba, Argentina. *Agric. Téc. (Chile)* 59: 233-241.
- Ateca, M. R., R. Sereno y H. Apezteguía. 2001. Zonificación de una superficie cultivada con soja según aspectos fenométricos y consumo de agua del suelo. *Rev. Brasileira Agrometeorol.* 9: 111-116.
- Beven, K. J. and M. J. Kirkby. 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24: 43-69.
- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 363-375. *In:* A. Klute (ed.). *Methods of soils analysis. Part I.* 2nd ed. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Burt, T. P. and D. P. Butcher. 1985. Topographic controls of soil moisture distribution. *J. Soil Sci.* 36: 469-486.

- Cisneros, J. M., C. Cholaky, E. Bricchi, O. Giayetto y J. J. Cantero. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. *Rev. Universidad Nacional Río Cuarto (Argentina)* 17: 13-22.
- Douglas, J., M. Jarvis, K. Howse, and M. Goss. 1986. Structure of a silty soil in relation to management. *J. Soil Sci.* 8: 123-149.
- Dunne, T., W. Zhang, and B. F. Aubry. 1991. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resour. Res.* 27: 2271-2285.
- Fitzjohn, C., J. L. Ternan, and A. G. Williams. 1998. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *Catena* 32: 55-70.
- Fu, B., J. Wang, L. Chen, and Y. Qiu. 2003. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena* 54: 197-213.
- Gardner, H. R. 1974. Prediction of water loss from a fallow field soil based on soil water flow theory. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 379-382.
- Gomez-Plaza, A. J., J. Alvarez-Rogel, J. Albaladejo, and V. M. Castillo. 2000. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrol. Process.* 14: 1261-1277.
- Gree, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. pp. 425-441. *In: A. Klute (ed.). Methods of soils analysis. Part I. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.*
- Greenland, D. J. 1981. Soil management and soil degradation. *J. Soil Sci.* 32: 301-332.
- Havley, M. E., T. J. Jackson, and R. H. McCuen. 1983. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. *J. Hydrol.* 62: 179-200.
- Lin, H. S., K. J. McInnes, L. P. Wilding, and C. T. Hallmark. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil. *Trans. ASAE* 39: 131-133.
- Loague, K. M. and G. A. Gander. 1990. R-5 revisited. 1. Spatial variability of infiltration on a small rangeland catchment. *Water Resour. Res.* 26: 957-972.
- Marelli, J. H. 1989. La erosión hídrica. Publicación Técnica 1. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Marcos Juárez, Córdoba, Argentina.
- Mendoza-Reinoso, R. I. y R. F. Porcel de Peralta. 1997. Caracterización de los suelos. pp. 1-12. *In: R. Sereno (ed.). Manual de control de la erosión hídrica. Facultad de Ciencias Agropecuarias - Secretaría de Ciencia y Tecnología-Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.*
- Pecorari, C., J. Guerif y P. Stengel. 1990. Fitólitos en los suelos pampeanos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *Ciencia del Suelo* 8: 135-141.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London A193-1032*: 120-145.
- Perroux, K. M. and I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1205-1215.
- Pilatti, M., J. de Orellana, L. J. Priano, O. M. Felli y D. A. Grenon. 1988. Incidencia de manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de un Argiudol en el sur de Santa Fé. *Ciencia del Suelo* 6: 19-29.
- Romero, L., H. Apezteguía, G. Esmoriz, R. Sereno, A. Aoki, M. Ateca, R. Mendoza y W. Robledo. 1995. Caracterización de una microcuenca sembrada con soja de la región semiárida central de la provincia de Córdoba (Argentina). *Agriscientia* 12: 59-66.
- Taboada-Castro, M. M., M. Lado-Liñares, A. Diéguez-Villar y A. Paz-González. 1998. Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela. pp. 101-127. *In: A. Paz-González y M. T. Taboada-Castro (eds.). Avances sobre el estudio de la erosión hídrica. La Coruña, España.*
- Vachaud, G., A. Passerat De Silans, P. Balabanis, and M. Vauclin. 1985. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 822-828.
- Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination on the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 34: 29-38.
- White, I., M. J. Sully, and K. M. Perroux. 1992. Measurement of surface-soil hydraulic properties: disc permeameters, tension infiltrometers and other techniques. pp. 69-104. *In: G. C. Tropp, W. D. Reynolds, and R. E. Green (eds.). Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice. Special Publ. 30. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA.*
- Wu, L., J. A. Vomocil, and S. W. Childs. 1990. Pore size, particle size, aggregate size, and water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 952-956.