

EFFECTO DEL PISOTEO ANIMAL SOBRE LAS PROPIEDADES DE UN SUELO. PARTE II: INFILTRACIÓN Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA

EFFECT OF ANIMAL TRAMPLING ON THE PROPERTIES OF A SOIL. PART II: INFILTRATION AND SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY

Daniel Martínez¹, Ana Landini¹, Eduardo Soza^{2*}, Claudia Sainato¹, Olga S. Heredia³

¹Cátedra de Física; ²Cátedra de Maquinaria Agrícola; ³Cátedra de Edafología.

Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453 C1417DSE, Buenos Aires, Argentina. Autor para correspondencia: esoza@agro.uba.ar

RESUMEN

Es importante predecir el proceso de infiltración en el suelo para elaborar estrategias de manejo de la producción animal, que tengan en cuenta riesgos de contaminación. Por otra parte, existen pocos trabajos en donde se comparan las tasas de infiltración básicas (*TIB*) medidas a campo con las conductividades hidráulicas saturadas (*Ks*) obtenidas en laboratorio. Los objetivos del experimento fueron: 1) Medir el proceso de infiltración para cuatro intensidades de pisoteo: nula (testigo), media, alta y muy alta; 2) Medir y comparar las *TIB* de campo y las *Ks* en laboratorio; 3) Evaluar la eficiencia del modelo Green y Ampt (GA) junto con el de varias funciones de pedotransferencia (FPT) para predecir el proceso de infiltración. El estudio se realizó en un establecimiento de producción animal ubicado en Buenos Aires, Argentina, con suelos Argiudoles, en una llanura con pastura implantada. El proceso de infiltración se midió con anillos de Muntz y la *Ks* en laboratorio con un permeámetro de carga constante. Se encontró que la *TIB* disminuyó a la mitad de su valor en los sectores con muy alta carga animal respecto del suelo testigo. La *Ks* resultó menor en sitios con mayor carga animal. Conclusiones: Los valores de *Ks* resultaron entre 5 y 10 veces mayores que los de *TIB*. El modelo de GA predijo en forma aproximada el fenómeno de infiltración cuando sus parámetros fueron obtenidos por una FPT proveniente de suelos europeos, no así con parámetros de suelos norteamericanos. Esto se atribuye a que los valores de *Ks* predichos por la FPT europea son menores a los obtenidos con las FPTs de suelos norteamericanos.

Palabras clave: Modelos de infiltración, tasa de infiltración básica, funciones de pedotransferencia.

ABSTRACT

It is important to predict the infiltration process of a soil in order to develop future management strategies for animal production that take into account contamination risks. There are few studies in which basic infiltration rate (*TIB*) and saturated hydraulic conductivities measured in laboratory (*Ks*) are compared. The objectives of this study were: 1) To measure the infiltration process for four trampling intensities: zero (control), medium, high and very high; 2) To measure and compare the *TIB* and *Ks*; 3) To evaluate the efficiency of the Green and Ampt model (GA) and several pedotransfer functions (FPT) in predicting the infiltration process. The study was carried out in an animal production facility located in Buenos Aires, Argentina, with Argiudolls soils in a plain with planted grasslands. The infiltration process was measured with rings of Muntz and *Ks* in the laboratory using a constant head permeameter. It was found that the *TIB* decreased to half its value in areas with very high trampling

with respect to the control soil. K_s were lower in areas with higher trampling. It was concluded that K_s values were between 5 and 10 times higher than those of *TIB*. The GA model predicted the approximate infiltration process when its parameters were obtained by FPT from European soils, but not with FPT with parameters from American soils. This is attributed to the fact that K_s values predicted by the European FPT are lower than those obtained using American FPTs.

Key words: infiltration models, basic infiltration rate, pedotransfer functions.

INTRODUCCIÓN

Existe el desafío de producir alimentos para una población mundial creciente y hacerlo de manera sustentable. Esto demanda actuar con responsabilidad dentro de la conservación de los recursos suelo y agua. Diversos autores expresan que la intensificación en el uso del recurso suelo, conlleva a la degradación y deterioro de sus propiedades. Richmond y Rillo (2005) expresan que en una agricultura moderna, es fundamental mejorar la calidad de diagnóstico del funcionamiento físico del suelo con la finalidad de elaborar mejores estrategias de manejo. Una de estas metodologías de diagnóstico es la medición de la capacidad de infiltración de los suelos.

Cualquier obstáculo que impida el flujo a través del perfil afecta la infiltración (Schwab et al., 1990). Además, influye en la escorrentía superficial, el riesgo de erosión, de encostramiento, la disponibilidad de agua para los cultivos (Ressia et al., 1999) y en el lixiviado de efluentes.

La intensificación de la actividad pecuaria implica encierre y suplementación, o confinamiento hacia suelos solo con aptitud ganadera. El pisoteo animal genera compactación del suelo, siendo éste uno de los factores que afectan la infiltración con resultados dispares. En particular, se han encontrado concentraciones excesivas de nitratos en el suelo y en el agua freática, en establecimientos de ganadería intensiva (Andriulo et al., 2003; Sainato C. et al., 2006; Sainato C. et al., 2010). Por ello, la evaluación del proceso de infiltración como vía de entrada de contaminantes en el perfil resulta de importancia en la determinación de indicadores de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

Mwendera y Saleem (1997) al comparar diferentes intensidades de pastoreo animal por unidad de mes y hectárea ($AUM\ ha^{-1}$), reportaron que intensidades de 3 a 4 $AUM\ ha^{-1}$ aumentaron significativamente la escorrentía y la pérdida de suelo superficial y redujeron la infiltración, en contraste con intensidades entre 0,6 $AUM\ ha^{-1}$ y 1,8 $AUM\ ha^{-1}$. Además, los suelos de textura fina fueron más susceptibles a la compactación que los de textura gruesa.

Fernández et al. (2006) encontraron que la tasa de infiltración fue afectada significativamente por el pastoreo, resultando 31 y 62,8% más baja, en sistemas mixtos que en agricultura continua, en un suelo Argiudol y en un Hapludol, respectivamente.

Además, estos autores concuerdan con Greenwood et al. (1997) en que la infiltración es probablemente el parámetro más sensible a la compactación por pisoteo, ya que es afectada la macroporosidad superficial, principal vía de circulación de agua de infiltración.

La agricultura moderna exige mejorar la calidad de diagnóstico del funcionamiento físico del suelo para elaborar mejores estrategias de manejo, siendo una metodología la medición de la capacidad de infiltración. Eiza et al. (2008) la califican como una propiedad física muy importante para varias disciplinas, ampliamente usada en la evaluación de la calidad física y esencial en la resolución de distintos problemas. Aoki y Sereno (2006) observaron que la velocidad final de infiltración o tasa de infiltración básica se comportó como un indicador de calidad de suelo.

La medición de infiltración del agua en el suelo demanda tiempo y esfuerzos además de costos económicos. Existen modelos predictivos del fenómeno de infiltración, como el de Green y Ampt (GA) (Lal y Shukla, 2004) que hacen uso de valores de propiedades físicas del suelo, como la conductividad hidráulica saturada (K_s) y el potencial del frente húmedo (y_f) como parámetros de entrada.

La ecuación de Green y Ampt es de más fácil resolución que la de Richards (Hillel, 1998), que rige el movimiento del agua dentro del suelo bajo condiciones generales, y las soluciones que se obtienen con una u otra no difieren apreciablemente (Gowish y Muñoz-Carpena, 2009).

Como K_s y y_f , son de difícil obtención experimental, se puede hacer uso de funciones de pedotransferencia (FPT) (Wösten J.H.M. y Van Genuchten, 1988; Schaap et al., 2001; Tomasella et al., 2003; Saxton y Rawls, 2006) que estiman estas magnitudes. Algunas de estas funciones como las de Saxton y Rawls (SR) (Saxton y Rawls, 2006) y las del programa Rosetta (ROS) (Schaap et al., 2001), emplean como fundamento extensas bases de datos de propiedades físicas de suelos de Estados Unidos. Otras, como las Wösten y Nemes (2004) usan como base resultados experimentales de suelos europeos.

Algunos autores llaman a la *TIB* conductividad hidráulica saturada medida a campo (K_{sf}) para diferenciarla de la conductividad hidráulica medida en laboratorio (K_s) (Wu et al., 1999; Fallico et al.,

2005), aunque es también frecuente encontrar artículos en donde esta diferencia no se haga explícita y el término conductividad hidráulica saturada se emplee como sinónimo de lo que en este trabajo llamamos *TIB*. Así por ejemplo, Carnevale et al. (2009) deducen la *Ks* a partir de información de campo, concluyendo que los resultados no mostraron sensibilidad a los diferentes manejos, aunque pudo encontrarse diferencia significativa con la situación original del suelo, y Pilatti et al. (2009) informan que la *Ks* es un indicador adecuado para evaluar su calidad física a largo plazo.

Cabría y Culot (1999), al evaluar laboreo continuo y suelo sin disturbar en 20 años, no hallan diferencias significativas entre las *Ks* medidas en laboratorio y las *TIB* para muestras de suelos udoles, determinada esta última como el término lineal del modelo de ajuste de Swartzendruber (1993).

Sales de Oliveira et al. (1999) hallaron valores de *TIB* 1,4 veces superiores a los de *Ks* para un suelo de textura muy arcillosa, y por el contrario 1,6 veces inferiores a los de *Ks* para un suelo arcilloso.

Wu et al. (1999) reportaron que los valores de *Ks* medidos en laboratorio son dos veces mayores que los medios a campo, y atribuyen estos resultados al aire que queda atrapado en los procesos de medición a campo. Por este motivo se empleó en la ecuación de GA una conductividad hidráulica efectiva (K_{ef}) igual a 0,5 *Ks* (Landini et al., 2007).

En Argentina son pocos los trabajos en donde se comparan de un mismo suelo las *TIB* medidas a campo con las *Ks* determinadas en laboratorio.

Por otro lado, la demanda de tiempo y esfuerzo que exige la medición de la *Ks* en laboratorio y la *TIB*, resulta de interés poder predecir el proceso de infiltración a través de la medición de propiedades del suelo de más sencilla determinación como variable de entrada de modelos predictivos. Como primer paso es necesario verificar si los modelos disponibles predicen aceptablemente la infiltración del agua en el suelo en los sitios de interés, particularmente en este trabajo en un predio de producción animal en donde el riesgo de contaminación del agua y del suelo es alto.

Los objetivos de este trabajo son: 1) Analizar el proceso de infiltración en un suelo perteneciente a un establecimiento de producción animal intensiva, con cuatro manejos pastoriles diferentes, por medio de los modelos de tres parámetros de Mezenzev (MEZ) (Lal y Shukla, 2004) y Swartzendruber (SW) (Swartzendruber, 1993); 2) Comparar los valores de las *TIB* medidas a campo con los de *Ks* medidas en laboratorio, para sectores pertenecientes a un predio de producción animal intensiva con distinta carga animal; 3) Evaluar la eficiencia del modelo de GA en la predicción del proceso de infiltración basado en variables de entrada obtenidas con las FPT de Saxton y Rawls (SR), las desarrolladas por

Wösten y Nemes (WN) y las del programa Rosetta (ROS).

Las hipótesis son: 1) Los sitios con mayor intensidad de carga animal presentan los valores más bajos de *TIB* y de *Ks*; 2) Para un mismo sector los valores de *TIB* no difieren significativamente de los de *Ks*; 3) El modelo de Green-Ampt puede predecir en forma aproximada el fenómeno de infiltración en este tipo de suelo bajo las diferentes cargas animales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio experimental

El trabajo se realizó en un establecimiento agropecuario ubicado en la localidad de Marcos Paz, Provincia de Buenos Aires (34°52' S; 58°45' O, 25 msnm), cuya actividad principal es la cría y engorde intensivo de ganado vacuno. Dicha actividad comprende el pastoreo a campo, la producción de forraje con cosecha mecánica y la suplementación a corral.

El mismo se encuentra ubicado en una llanura con pasturas de leguminosas y gramíneas (pastura polifítica) implantadas. En la misma se hallaron las siguientes especies: alfalfa (*Medicago sativa*), lotus (*Lotus corniculatus*), trébol rojo (*Trifolium pratense*), trébol blanco (*Trifolium repens*), cebadilla (*Bromus unioloides*), raigrass (*Lolium multiflorum*) y pasto ovillo (*Dactylis glomerata*).

De acuerdo al manejo del establecimiento, algunos sectores se destinaban a pastoreo directo y a producción de forraje sin pisoteo animal.

Los muestreos se llevaron a cabo durante el período 2007-2009, en las cuatro estaciones del año. Durante este período existieron años muy lluviosos, como el 2007 y 2009 (1130,7 y 1032,3 mm, respectivamente), y otro de menores precipitaciones como el 2008 (789,0 mm) (Datos proporcionados por la estación Ezeiza del Servicio Meteorológico Nacional, Argentina, ubicada a 19 km del establecimiento).

Diseño experimental

Se seleccionaron 4 grupos de sectores (A, B, C y D) siguiendo un diseño experimental dirigido. Tres de los grupos estaban formados por 3 sectores cada uno y el grupo restante por un único sector ya que no se hallaron dentro de establecimientos similares condiciones edáficas y de manejo para considerar repeticiones en este cuarto grupo C. Cada grupo se caracterizó por distinta intensidad de pisoteo o carga animal (tratamientos). Ésta se cuantificó en base a la superficie de los sectores, el número de animales presentes y el tiempo de permanencia en ellos. Los resultados se expresaron en AM ha⁻¹ (Ani-

males por mes y por hectárea), es decir la cantidad de animales que estimativamente se encontraban durante un mes, por cada hectárea del sector. Los animales vacunos tenían una masa promedio de 200 kg.

Las intensidades de carga de cada grupo eran: Grupo A (testigo) 0 AM ha⁻¹; Grupo B: 5 a 25 AM ha⁻¹; Grupo C 50 AM ha⁻¹; Grupo D 60 a 200 AM ha⁻¹. Otros antecedentes se pueden ver en la Parte I de este artículo en este mismo número.

Mediciones de infiltración y determinación de la TIB

Se realizaron mediciones de infiltración empleando los anillos concéntricos de Muntz (Burt, 1995) con carga hidráulica constante. La duración de cada medición fue de 1,5 a 3 h a fin de alcanzar el estado estacionario que define la TIB.

En cada sector, los sitios de medición fueron seleccionados siguiendo un diseño en forma de grilla (Pennock et al., 2008). Se realizaron 26 determinaciones dentro de los sectores del grupo A, 28 en el grupo B, 6 en el grupo C y 10 en el D. Se descartaron para el análisis 5 determinaciones dentro del grupo A, 5 dentro del grupo B y 1 en el D, por haber presentado valores extremadamente elevados de la TIB respecto de los restantes del mismo grupo, posiblemente debido a la existencia de grietas o fisuras en el sitio de medición. El criterio adoptado para determinar la TIB fue considerarla igual a la pendiente de la recta de ajuste de los tres últimos puntos experimentales de F vs. t (Hillel, 1998).

Determinación de las propiedades físicas y químicas del suelo

En cada uno de los sectores se tomaron muestras de suelo de 0 a 20 cm de profundidad para analizar los porcentajes de arena, limo y arcilla y el contenido de carbono orgánico (Cox) (Walkley y Black) (Page, 1982)

Se determinó en algunos sectores el contenido de carbono total (CT) del suelo, es decir la suma del contenido de carbono inorgánico (principalmente carbonatos) y el de carbono orgánico total (Skjemstad y Baldock, 2008). Se extrajo una muestra compuesta obtenida de tres submuestras en la profundidad de 0 a 20 cm en cada uno de los siguientes sectores: A1, A2, B1, C, D1 y D3. El contenido de CT se determinó por el método de combustión seca en horno a 500°C durante 5 horas (AOAC, 1980).

A 1 m de distancia alrededor de cada sitio donde se llevaron a cabo las mediciones de infiltración y previo a la realización de éstos, se tomaron tres muestras de suelo en la profundidad de 0 a 10 cm para determinar la densidad aparente (DA) del sue-

lo por el método del cilindro de volumen conocido (Blake, 1965). Se determinó también la humedad gravimétrica (θ_g) de las muestras por secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante. La humedad volumétrica inicial θ_i se calculó como el producto de DA por θ_g . Los valores de DA y θ_i de cada sitio fueron posteriormente promediados para obtener valores representativos de los mismos para la profundidad de 0 a 10 cm.

Determinación de la conductividad hidráulica saturada

Para la determinación de K_s se empleó un permeámetro de carga hidráulica constante (Klute, 1986) adaptado para medir seis muestras en forma simultánea. Las muestras de suelo fueron extraídas al azar de cada uno de los sectores y de una profundidad de 0 a 10 cm, empleando cilindros de 7 cm de diámetro interior y 7 cm de altura. Se llevaron a saturación por 24 horas en el mismo permeámetro y posteriormente se midió el tiempo transcurrido en fluir un determinado volumen de agua para tres gradientes hidráulicos: 0,5; 1,0 y 1,5. De acuerdo a la Ley de Darcy (Hillel, 1998),

$$q = -K_s \frac{\Delta H}{L}$$

donde q : caudal por unidad de área (m³ m⁻²); $\frac{\Delta H}{L}$:

gradiente hidráulico (adimensional); ΔH : diferencia de niveles de alturas hidráulicas (m); L : longitud de la muestra (m)

El valor de la conductividad hidráulica saturada de cada muestra se obtuvo con la pendiente de

la recta de ajuste q vs. $\left(-\frac{\Delta H}{L}\right)$

Análisis estadístico de TIB y K_s

Para verificar el cumplimiento de los supuestos del test de ANOVA fue necesario transformar los datos de TIB mediante la función raíz cuadrada, mientras que para los valores de K_s se empleó la función raíz cúbica.

El supuesto de normalidad de los errores se testeó por medio de un gráfico Q-Q plot realizado con el programa InfoStat (2002), considerando que la distribución era normal cuando el coeficiente r era mayor a 0,95. El supuesto de homogeneidad de las varianzas se comprobó también en forma gráfica.

Sobre los datos transformados se empleó test LSD de Fisher ($p \leq 0,05$) para la comparación de medias.

Aplicación de modelos de infiltración

Modelos empíricos

Los valores experimentales de lámina de agua infiltrada y tiempo, correspondientes a cada medición de infiltración, se ajustaron por regresión no lineal con los modelos de tres parámetros de MEZ (Ec. 1) y SW (Ec. 2), mediante el programa Prism 4.0 (GraphPad, 2005)

$$F_{(t)} = kt^n + bt \quad (1) \quad F_{(t)} = \frac{S}{A} (1 - e^{-At^{0.5}}) + i_c t \quad (2)$$

donde: k (mm min^{-n}); n : parámetros sin significado físico preciso; b : parámetro asociado a la tasa de infiltración básica (mm min^{-1}); S : sortividad ($\text{mm min}^{-0.5}$); A : ($\text{min}^{-0.5}$); i_c parámetro asociado a la tasa de infiltración básica (mm min^{-1}).

Mediante el ajuste se obtuvieron los valores de los parámetros de cada modelo y el coeficiente R^2 ; con el conjunto de datos de cada sector se realizó también un ajuste global con estos modelos.

Modelo predictivo de Green y Ampt (GA)

La infiltración acumulada predicha por el modelo predictivo GA está dada por la ecuación

$$F_{(t)} = K_{ef} t + 0,102 \psi_f (\theta_s - \theta_i) \ln \left(1 + \frac{F(t)}{0,102 \psi_f (\theta_s - \theta_i)} \right) \quad (3)$$

donde:

$F(t)$: infiltración acumulada (m) al tiempo t (s).

Parámetros de entrada:

K_{ef} : conductividad hidráulica efectiva (m s^{-1})

ψ_f : potencial del frente húmedo (kPa)

θ_s : humedad del suelo en estado de saturación ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_i : humedad volumétrica del suelo al inicio de la medición ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

El valor del potencial del frente húmedo ψ_f se calculó a partir de la relación:

$$\psi_f = \frac{(2+3\lambda)\psi_e}{1+3\lambda} \quad (4)$$

donde λ y ψ_e son los parámetros del modelo de Brooks-Corey (BC) (Hillel, 1998), siendo λ un parámetro asociado a la distribución de tamaños de poros y ψ_e el potencial de entrada de aire.

En primera instancia, los parámetros de entrada del modelo de GA, K_s , λ y ψ_e se obtuvieron con las FPT de SR, utilizando los valores medidos de los contenidos de arena, arcilla, carbono orgánico del suelo (Cox) y densidad aparente (DA) de cada sector. En un segundo análisis, se

utilizaron las funciones de WN y de ROS que dan como respuesta, además de K_s , los parámetros n y α de van Genuchten (VG) (Van Genuchten, 1980). Se transformaron estos últimos a los de BC (λ y ψ_e) por medio de las ecuaciones de Morel-Seytoux et al. (1996).

La conductividad hidráulica efectiva K_{ef} en la expresión (3) se consideró igual a $0,5 K_s$ (Landini et al., 2007), y el contenido de agua en saturación $\theta_s = 0,9 P$ (Stahr et al., 2004), siendo P la porosidad del suelo. Se aplicó el modelo predictivo de GA al conjunto de datos de cada sector individual, ya que las condiciones de humedad del suelo antes de realizar las mediciones fueron en general diferentes, por haberse realizado en distintas fechas. Las respuestas de los modelos fueron comparadas con los datos experimentales de infiltración acumulada.

La eficiencia de predicción del modelo de GA junto con las FPT se evaluó por medio del coeficiente de eficiencia (CE) de Nash-Sutcliffe (King, 2000; Evans et al., 2003). El coeficiente de eficiencia adopta en general valores entre $-\infty$ y 1. El ajuste perfecto corresponde $CE = 1$, mientras que un valor de $CE = 0$ significa que la predicción del modelo es tan precisa como la media de los valores medidos.

RESULTADOS

Caracterización general de los sitios de medición

En la Tabla 1 se muestran los valores medidos de los contenidos de arena, limo, arcilla, Cox , CT , DA y θ_i %. Puede observarse que los valores de los contenidos de arena, limo y arcilla en los suelos de los sitios estudiados son muy similares, lo que da en consecuencia que la clase textural de los mismos sea clasificada como franco limosa.

El mayor contenido de Cox hallado en los sectores D (corrales de encierre) se atribuye a la abundante acumulación de estiércol en superficie, producido por los animales en los momentos de permanencia. Sin embargo, la mayor diferencia se encuentra en los altísimos contenidos de CT en los sectores D, atribuido a los excrementos de los animales, que resultaron entre 4 y 10 veces superiores a los de los demás sectores.

Esto explica también que en el grupo D, la DA experimentara una disminución máxima del 27,5% respecto de los valores en el estrato superficial para los otros niveles de intensidad de carga animal. En síntesis, las diferencias encontradas en los suelos de los distintos sitios se deben al manejo del mismo.

Tabla 1. Valores de los contenidos de arena, limo, arcilla, carbono orgánico (Cox), carbono total (CT) de cada sector entre 0 y 20 cm de profundidad. Densidad aparente (DA) y humedad volumétrica inicial (θ_i %) entre 0 y 10 cm de profundidad.

Table 1. Values of sand, silt, clay, organic carbon (Cox), total carbon (CT) contents for each sector between 0 and 20 cm depth. Bulk density (DA) and initial volumetric water content (θ_i) between 0 and 10 cm depth.

| Sector | Arena % | Limo % | Arcilla % | Cox g kg ⁻¹ | CT g kg ⁻¹ | DA g cm ⁻³ | θ_i % |
|--------|------------|-----------|--------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| A1 | 17,9 | 58,1 | 24,0 | 32,4 | 56 | 1,19 | 12,6 |
| | | | | | | 1,15 | 18,3 |
| | | | | | | 1,21 | 26,7 |
| A2 | 26 | 54 | 20 | 22,6 | 48 | 1,27 | 20,4 |
| A3 | 13,7 | 67,9 | 18,4 | 26,5 | sd | 1,28 | 25,7 |
| B1 | 17,7 | 57,3 | 25 | 25 | 52 | 1,17 | 32,4 |
| | | | | | | 1,26 | 39,4 |
| B2 | 18,7 | 53,3 | 28 | 36,4 | sd | 1,24 | 12,8 |
| | | | | | | 1,18 | 21,1 |
| B3 | 24,1 | 52,9 | 23 | 36,4 | sd | 1,15 | 21 |
| | | | | | | 1,19 | 37 |
| C | 17,7 | 57,4 | 25 | 21,2 | 66 | 1,28 | 24 |
| D1 | 25 | 52,5 | 22,5 | 37,6 | 682 | 1,0 | 48 |
| D3 | 21,9 | 55,6 | 22,5 | 25,2 | 198 | 1,15 | 29 |

sd: sin medir; sd: not measured.

Efecto de la carga animal sobre el movimiento del agua en el suelo

Tasa de infiltración básica y conductividad hidráulica saturada

En la Tabla 2 se observan los valores medios de las *TIB* calculadas a partir de la pendiente de la recta *F* vs. *t* de ajuste, de los últimos 3 puntos experimentales de cada medición. Para facilitar la lectura de los datos se expresan estos resultados en mm min⁻¹ y en mm h⁻¹. Se indica también el

coeficiente de variación (CV%).

La menor *TIB* se obtuvo en los sectores D, es decir aquellos con la mayor carga animal (corrales de encierre), difiriendo significativamente de los valores medios hallados en el grupo testigo (A) y en el de baja intensidad de carga (B).

Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de las *TIBs* del grupo C y del D, ni entre los de los grupos A, B y C. Esto se atribuye a la alta variabilidad espacial que presenta el fenómeno de infiltración.

Tabla 2. Tratamientos, valores medios de las tasas de infiltración básica (TIB), coeficientes de variación (CV) y número de mediciones.

Table 2. Treatments, mean values of basic infiltration rates (TIB), coefficients of variation (CV) and number of measurements.

| Trat. | <i>TIB</i> (mm min ⁻¹) | <i>TIB</i> (mm h ⁻¹) | CV % | Mediciones N° |
|-------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------|------------------|
| . | | | | |
| A | 0,058 a | 3,48 a | 51,9 | 21 |
| B | 0,055 a | 3,32 a | 58,6 | 23 |
| C | 0,032 ab | 1,93 ab | 63,4 | 6 |
| D | 0,026 b | 1,57 b | 96,6 | 9 |

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según el test de LSD Fischer ($p \leq 0,05$). Different letters means significant differences among treatments after LSD Fischer's test ($p \leq 0,05$).

En la segunda columna de la Tabla 3 se observan los valores medios de las K_s obtenidos en laboratorio para muestras extraídas de los distintos grupos de sectores. Se observa una clara disminución de los valores medios con el aumento de la intensidad de pisoteo, aunque con muy al-

tos valores de CV. Como es sabido (Hillel, 1998) la tasa de infiltración del suelo y la conductividad hidráulica saturada se encuentran entre las propiedades del suelo con mayor variabilidad, siendo comunes valores del orden de 50%, como se halló en este trabajo.

Tabla 3. Tratamientos, valores medios experimentales de la conductividad hidráulica saturada (K_s), coeficiente de variación (CV) y número de mediciones.

Table 3. Treatments, mean experiment values of saturated hydraulic conductivity (K_s), coefficients of variation (CV) and number of measurements.

| Trat. | K_s (medido) (mm h ⁻¹) | CV % | Mediciones N° |
|-------|---|---------|------------------|
| A | 37,3 c | 86,5 | 17 |
| B | 22,0 b | 131,9 | 13 |
| C | 9,6 b | 89,8 | 6 |
| D | 0 a | -- | 4 |

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según el test LSD Fisher ($p \leq 0,05$).
Different letters means significant differences among treatments after LSD Fisher's test ($p \leq 0,05$).

En la Fig. 1 se presentan los valores medios de la TIB y K_s experimentales para los tratamientos A, B y C, con su desviación estándar. Con excepción del grupo D, los valores de TIB resultaron hasta 10 veces inferiores a los de K_s .

El valor nulo de K_s obtenido para las muestras del grupo D se debió a que ni siquiera se logró saturar las muestras a presión atmosférica, ni aún luego del doble de tiempo (48 hs) que el empleado para las de los otros grupos.

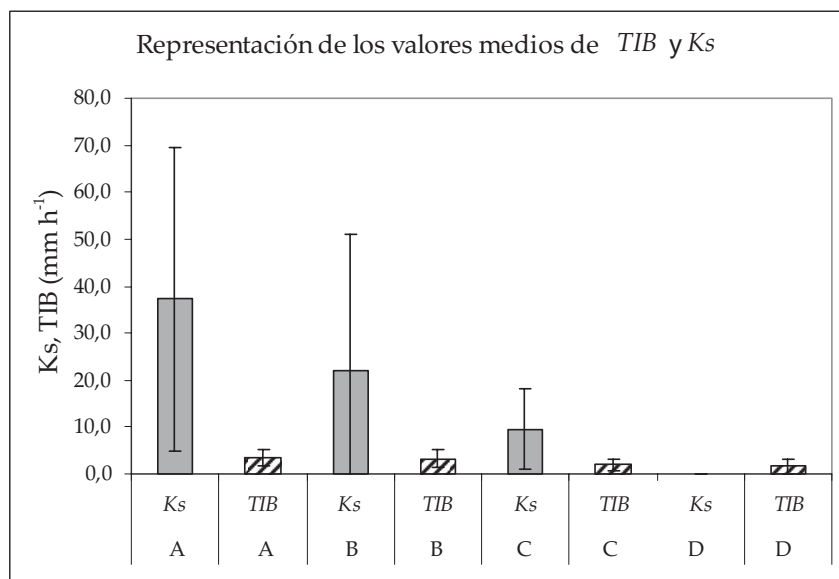


Fig. 1. Valores medios de tasa de infiltración básica (TIB) y conductividad hidráulica saturada (K_s) y desvíos estándar para los tratamientos A, B y C.

Fig. 1. Mean values of basic infiltration rate (TIB) and saturated hydraulic conductivity (K_s) and standard deviations for treatments A, B and C.

Utilización de modelos para caracterizar el movimiento del agua en el suelo**Ajuste de los modelos empíricos de Mezencev y Swartzendruber.**

En la Tabla 4 se muestran los parámetros obtenidos de los ajustes globales de los datos de infiltración acumulada para cada tratamiento empleando ambos modelos. Se destaca que ambos modelos tuvieron coeficientes de regresión R^2 casi idénticos y que se obtuvo un valor negativo para el término lineal del modelo de Mezencev.

En la Tabla 4 se muestran los parámetros obtenidos de los ajustes globales de los datos de infiltración acumulada para cada tratamiento empleando ambos modelos. Se destaca que ambos modelos tuvieron coeficientes de regresión R^2 casi idénticos y que se obtuvo un valor negativo para el término lineal del modelo de Mezencev.

Tabla 4. Modelos de Mezencev y Swartzendruber. Tratamientos, parámetros correspondientes y coeficiente de determinación (R^2).

Table 4. Mezencev and Swartzendruber models. Treatments, parameters of these models and determination coefficient (R^2).

| Trat. | Mezencev | | | R^2 | Swartzendruber | | | R^2 |
|-------|--------------------------------|------|--------------------------------|-------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------|
| | k (mm min ⁻ⁿ) | N | b (mm min ⁻¹) | | S (mm min ^{-0,5}) | A (min ^{-0,5}) | ic (mm min ⁻¹) | |
| A | 8,00 | 0,33 | -0,01 | 0,48 | 8,02 | 0,29 | 0,10 | 0,48 |
| B | 4,61 | 0,29 | 0,01 | 0,40 | 4,88 | 0,39 | 0,06 | 0,41 |
| C | 5,92 | 0,26 | 0,05 | 0,59 | 6,55 | 0,46 | 0,11 | 0,59 |
| D | 3,76 | 0,28 | 0,02 | 0,47 | 3,87 | 0,38 | 0,05 | 0,47 |

Aplicación del modelo predictivo de GA.

En la Tabla 5 se muestran los valores de los parámetros del modelo de GA (K_s y ψ_f) predichos por las FPT de SR, WN y ROS, obtenidos de los resultados presentados en la Tabla 1, para cada sector en los que se llevaron a cabo las me-

diciones de infiltración. Puede verse que los valores de K_s predichos por las funciones de SR o las de ROS son unas 3 veces superiores a los valores predichos por las de WN. Asimismo las funciones de SR y ROS predicen valores 30 veces superiores a las de WN para la cantidad ψ_f .

Tabla 5. Valores de la conductividad hidráulica saturada (K_s) y del potencial del frente húmedo (ψ_f) obtenidos a partir de las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (SR), de Wösten y Nemes (WN) y Rosetta (ROS) para cada sector.

Table 5. Saturated hydraulic conductivity (K_s) and wetting front suction head (ψ_f) values obtained using Saxton and Rawls (SR), Wösten and Nemes (WN) and Rosetta (ROS) pedotransfer functions for each sector.

| Sector | K_s (mm h ⁻¹) | | | ψ_f (kPa) | | |
|--------|-----------------------------|-------|------|----------------|-------|-----|
| | SR | WN | ROS | SR | WN | ROS |
| A1 | 17,9 | 5,9 | 16,6 | 3 | 0,071 | 2,4 |
| | 22 | 6,8 | 20,4 | 2,2 | 0,07 | 2,4 |
| | 16 | 5,5 | 14,9 | 3,4 | 0,073 | 2,4 |
| A2 | 21 | 7,85 | 12,0 | 2,9 | 0,102 | 2,6 |
| A3 | 14,6 | 3,43 | 14,1 | 5,5 | 0,149 | 3,0 |
| B1 | 21,7 | 8,33 | 17,8 | 2 | 0,081 | 2,2 |
| | 13,2 | 6,12 | 11,0 | 4 | 0,083 | 2,2 |
| B2 | 10,6 | 5,05 | 10,9 | 4 | 0,055 | 1,8 |
| | 15,2 | 6,3 | 15,3 | 2,7 | 0,051 | 1,8 |
| B3 | 24 | 7,62 | 20,5 | 1,8 | 0,059 | 2,4 |
| | 19,6 | 6,59 | 16,5 | 2,6 | 0,061 | 2,3 |
| C | 12,6 | 6,55 | 9,9 | 4,1 | 0,092 | 2,2 |
| D1 | 47,6 | 13,03 | 47,5 | -0,9 | 0,063 | 2,4 |
| D3 | 28,6 | 9,78 | 21,3 | 1,3 | 0,086 | 2,5 |

En la Tabla 6 se presentan los valores de los coeficientes de eficiencia de los ajustes del modelo de GA con los parámetros estimados por las FPT de SR, WN y ROS individualizados por sector, y

contenido de humedad volumétrica inicial. Se aprecia que la mejor eficiencia de predicción se obtuvo con las FPT de WN, en donde ocho de los coeficientes CE resultaron positivos.

Tabla 6. Valores de los coeficientes de eficiencia (CE) de la predicción de la ecuación de Green-Ampt (GA) a partir de las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (SR), de Wösten y Nemes (WN) y Rosetta (ROS) para los datos experimentales de infiltración de cada sector y contenido de humedad volumétrica inicial (θ_i %).

Table 6. Efficiency coefficient (CE) values of the prediction of Green-Ampt (GA) equation using Saxton and Rawls (SR), Wösten and Nemes (WN) and Rosetta (ROS) pedotransfer functions for experimental data of infiltration for each sector and initial volumetric water content (θ_i %).

| Sector | θ_i % | CE | | |
|--------|--------------|-------|-------|-------|
| | | SR | WN | ROS |
| A1 | 13 | -1,24 | -0,88 | -0,5 |
| A1 | 18 | -16,6 | -0,05 | -15,7 |
| A1 | 27 | -1,8 | 0,17 | -0,4 |
| A2 | 20 | -11,2 | 0,36 | -2,7 |
| A3 | 26 | 0,81 | -0,88 | 0,87 |
| B1 | 32 | -1,1 | 0,63 | -0,3 |
| B1 | 39 | -46,1 | -1,30 | -22 |
| B2 | 13 | -5,1 | 0,12 | -1,8 |
| B2 | 21 | -5,4 | 0,20 | -3,3 |
| B3 | 21 | -53 | -0,40 | -49 |
| B3 | 37 | -15,7 | 0,36 | -10,6 |
| C | 24 | -2,7 | 0,35 | -0,15 |
| D1 | 48 | -148 | -24 | -468 |
| D3 | 29 | -18,9 | 0,10 | -17,5 |

En las Figs. 2 y 3 se muestran como ejemplos, para el sector A2 con un 20% de θ_i %, y el sector B3 con un 37% de θ_i %, respectivamente, los valores medidos de lámina de agua infiltrada en función del tiempo, y las curvas predictivas de

infiltración del modelo de GA con las FPT mencionadas. En ambas se aprecia la mejor respuesta en cuanto ajuste del modelo de GA cuando se usaron las FPT de WN para predecir los parámetros de entrada del modelo.

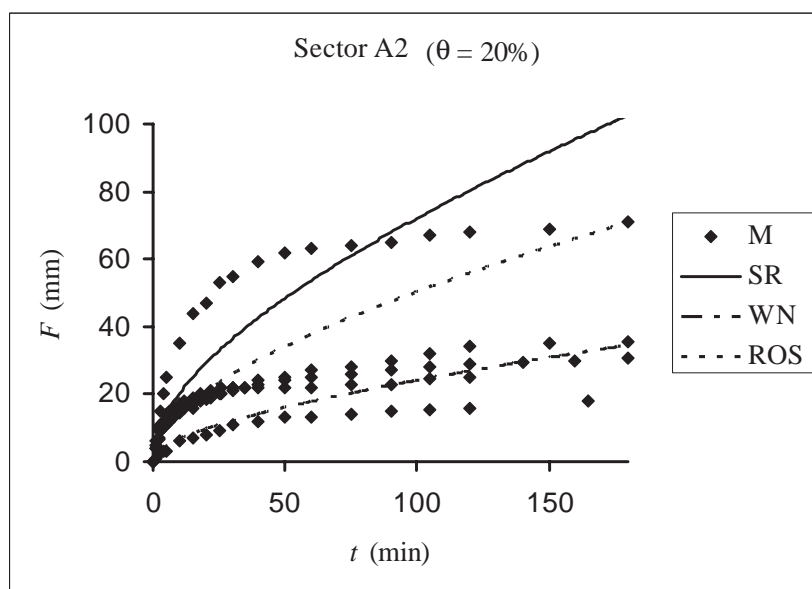


Fig. 2. Valores experimentales (M) de infiltración acumulada y curvas predichas con el modelo de Green-Ampt (GA) para el sector A2 con un 20% de humedad inicial, con las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (SR), de Wösten y Nemes (WN) y Rosetta (ROS).

Fig. 2. Cumulative infiltration experimental data (M) and predicted curves with Green-Ampt (GA) equation using Saxton and Rawls (SR), Wösten and Nemes (WN) and Rosetta (ROS) pedotransfer functions for sector A2 under 20% initial water content.

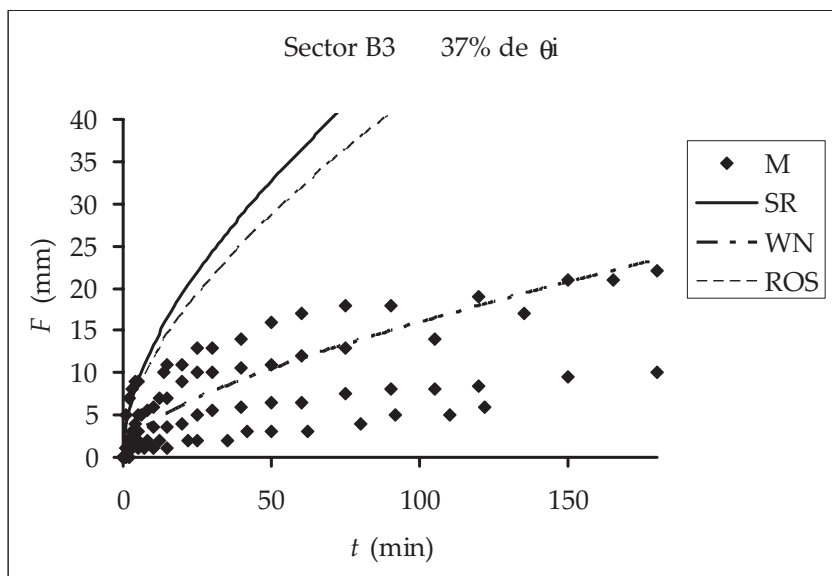


Fig. 3. Valores experimentales (M) de infiltración acumulada y curvas predichas con el modelo de Green-Ampt (GA) para el sector B3 con un 37% de humedad inicial, basadas en las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls (SR), de Wösten y Nemes (WN) y Rosetta (ROS).

Fig. 3. Cumulative infiltration experimental data (M) and predicted curves with Green-Ampt (GA) equation using Saxton and Rawls (SR), Wösten and Nemes (WN) and Rosetta (ROS) pedotransfer functions for sector B3 under 37% initial water content.

DISCUSIÓN

Efecto de la carga animal sobre el movimiento del agua en el suelo

El pisoteo animal no produjo un efecto notorio en los valores de TIB , como puede observarse en los valores de la Tabla 2, en donde el análisis estadístico mostró diferencias significativas sólo entre el grupo de muy alta intensidad de carga animal (D) y los grupos testigo (A) y de intensidad media (B). Este resultado contrasta con el obtenido por Pietola et al. (2005) quienes encontraron disminución de la infiltración en un suelo muy arcilloso, aún con intensidades bajas de pisoteo respecto de la del suelo sin pisoteo.

Los valores medios experimentales de las K_s (Tabla 3) resultaron menores ante mayores cargas animales sobre el suelo. Los menores valores obtenidos fueron en los sectores de intensidad media (B) y alta (C), difiriendo significativamente de los correspondientes a los sectores testigo (A). El valor nulo obtenido de la K_s para las muestras extraídas de uno de los corrales de encierre, es debido a que estas presentaban un impedimento al flujo de agua que no permitió saturarlas. Este hecho se atribuye al gran contenido de carbono total encontrado en estos sectores en el estrato de 0 a 10 cm, debido a los excrementos de los animales sometidos a encierre durante períodos prolongados

en esos corrales (ver valores de CT en la Tabla 1). Bajo estas condiciones la superficie del corral y hasta los 15 a 20 cm de profundidad presentaba características más semejantes a un compost, de muy baja permeabilidad hidráulica.

Comparando los valores medios de TIB y K_s obtenidos para cada tratamiento (intensidad de carga), puede verse en la Fig. 1 (o en las Tablas 2 y 3) que con la metodología empleada, los valores de K_s resultaron entre 5 y 10 veces mayores que los correspondientes TIB . Por lo tanto, estas dos cantidades no pueden considerarse equivalentes, sobre todo teniendo en cuenta que de acuerdo a las definiciones la TIB está relacionada con las condiciones de la superficie del suelo, mientras que la K_s caracteriza un horizonte.

Uso de modelos empíricos y predictivos del movimiento de agua en el suelo

Los modelos de Mezencev (MEZ) y Swartzendruber (SW) ajustaron con iguales coeficientes $0,4 < R^2 < 0,6$ para cada tratamiento (Tabla 4) y aceptables para la variabilidad que suele presentar la infiltración del agua en el suelo.

Sin embargo, se obtuvo un valor negativo del coeficiente b del modelo de MEZ para el ajuste global de los datos del sector A, lo cual hace que este parámetro carezca de significado físico, no pudiéndose asociar a la tasa de infiltración básica.

Los valores del parámetro ic del modelo de SW de tres parámetros no coinciden exactamente con los de la *TIB* según el método empleado en este trabajo. Sin embargo en ninguno de los casos estudiados se hallaron valores negativos de este coeficiente. De estos resultados puede inferirse que, para los suelos estudiados, el modelo de SW presenta un mejor comportamiento desde el punto de vista físico que el de MEZ, teniendo en cuenta que ambos tienen la misma cantidad de parámetros.

En la Tabla 5 puede observarse que las funciones de SR y ROS predicen valores muy semejantes de K_s y ψ_f para los suelos estudiados.

Como indica la ecuación (4), la cantidad ψ_f se obtiene a partir de los parámetros de BC. Las funciones de SR predicen estos parámetros en forma directa, sin embargo las funciones del programa ROS predicen los parámetros de la función de VG que luego deben ser transformados a los de BC.

Como afirman Morel-Seytoux et al. (1996) existen infinitas formas de realizar esta transformación de parámetros, sin embargo, teniendo en cuenta que las FPT de SR y de ROS fueron generadas a partir de datos experimentales de suelos norteamericanos, la semejanza de los valores aquí obtenidos sugeriría que la transformación propuesta por Morel-Seytoux es la apropiada.

En la Tabla 5 puede verse también que los valores de K_s predichos por las funciones de SR o las de ROS son unas 3 veces superiores a los valores predichos por las de WN. Asimismo las funciones de SR y ROS predicen valores 30 veces superiores a las de WN para la cantidad ψ_f . Estas marcadas diferencias pueden deberse a que las funciones de SR y ROS fueron generadas a partir de bases de datos de suelos norteamericanos, mientras que las de WN provienen de suelos europeos.

En la Tabla 6 se observa que con las funciones de pedotransferencia de WN, ocho de los catorce coeficientes de eficiencia CE resultaron positivos en la predicción de GA sobre el fenómeno de infiltración, lo cual según Donatelli et al. (2004) indica que la predicción del modelo es satisfactoria. En cambio, para las funciones de SR y las de ROS, sólo uno de los valores de CE resultó positivo.

La mejor eficiencia de predicción de las funciones de WN respecto de las de SR y ROS usadas con el modelo de GA puede verse con mayor claridad en las Figs. 3 y 4.

Esta mejor eficiencia se atribuye a que las funciones de WN predicen valores menores de K_s que las de SR y ROS, y por lo tanto valores de infiltración acumulada menores a tiempos grandes.

Es de destacar que las FPT de WN fueron confeccionadas a partir de datos de muestras de suelos europeos, mientras que las de SR y ROS a partir de suelos norteamericanos.

Lamentablemente en la bibliografía no se encontró información sobre la metodología (laboratorio o a campo) empleada para la determinación de K_s en la confección de las bases de datos.

Comparando los valores de K_s medidos experimentalmente con predichos por las funciones de pedotransferencia (Tablas 3 y 5, respectivamente), se observa que las funciones de SR dan valores mucho más concordantes con los obtenidos experimentalmente que las de WN y ROS.

CONCLUSIONES

El modelo de Swartzendruber representó mejor al fenómeno de infiltración en los suelos estudiados, que el de Mezencev teniendo en cuenta que ambos tienen la misma cantidad de parámetros.

En los sectores correspondientes a los corrales de encierre, con muy alta carga animal, la tasa de infiltración básica disminuyó (en promedio) aproximadamente a la mitad de su valor (1,6 mm h⁻¹) respecto del suelo testigo de carga nula (3,5 mm h⁻¹). También la conductividad hidráulica saturada resultó menor en sitios con mayor carga animal. La disminución observada no sólo es atribuida al efecto de pisoteo animal, sino también a la presencia de excrementos producidos por los animales durante el tiempo de encierre y a la pérdida de estructura del suelo por amasado. Estos resultados confirman la hipótesis 1 del trabajo.

Los valores medios experimentales de K_s obtenidos para cada tratamiento resultaron entre 5 y 10 veces mayores que los de *TIB*, por lo tanto, según estos resultados estas dos propiedades físicas no pueden considerarse equivalentes, no verificándose la hipótesis 2.

La mejor eficiencia de predicción del fenómeno de infiltración del modelo de GA usando como parámetros de entrada los valores de obtenidos con las FTP de WN respecto de la obtenida con las de SR y ROS se atribuye a que las FPT de WN predicen valores más bajos de K_s que las de SR y ROS.

En virtud a que las funciones de pedotransferencia probadas en este trabajo provienen de datos de suelos de otros países, se sugiere iniciar un estudio sistemático de recolección de información y obtención de nuevos datos para suelos argentinos, para desarrollar funciones predictivas que se ajusten a las características de nuestros suelos y sus alternativas de manejo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los Proyectos G089 UBACyT 2004-2007: "Elementos de diagnóstico de contaminación del suelo y el agua subterránea por producción animal intensiva"; G015

UBACyT 2008-2010: "Aspectos dinámicos de la contaminación de suelo y agua subterránea por actividad ganadera intensiva". Directora: Dra. Claudia M. Sainato y PICT 2006- N° 2413 (Agencia Nacional de Promoción Científica) Investigador Responsable: Dra. Claudia M. Sainato. Geofísica aplicada en la detección de fuentes puntuales de contaminación originadas en feedlots y en tecnologías de reutilización de sus residuos.

BIBLIOGRAFÍA

- Andriulo, A., C. Sasal, C. Améndola, y F. Rimatori. 2003. Impacto de un sistema intensivo de producción de carne vacuna sobre algunas propiedades del suelo y del agua. *RIA* 32(3):27-56.
- AOAC. 1980. Official methods of analysis. 14th ed. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), Washington, D.C, USA.
- Aoki, A., y H. Sereno. 2006. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvia. *Agriscientia* 23(1):23-31.
- Blake, G.R. 1965. Bulk density. p. 374-390. In C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* Agronomy Monograph Series. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Burt, C.M. 1995. *The surface irrigation manual. A comprehensive guide to design and operation of surface irrigation systems.* Waterman Industries. Exeter, California, USA.
- Cabrá, F.N., y J.P. Culot. 1999. Sortividad y conductividad hidráulica saturada de udoles del sudeste bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 17(1):8-19.
- Carnevale, I., R. Marano, O. Felli, y C. Alesso. 2009. Comparación de métodos de estimación de infiltración usando tensioinfiltrómetros bajo diferentes manejos de suelo. En S. Montico, N. Di Leo, y G. Nardón (eds.) X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR. 1 al 4 de septiembre de 2009. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Donatelli, M., M. Acutis, J.H.M. Wösten, and A. Nemes. 2004. Integrated Indices for pedotransfer function evaluation. p. 363-390. In Y. Pachepsky and W. Rawls (eds.). *Development of pedotransfer functions in soil hydrology 30.* Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Eiza, M., C. Irurtia, P. Carfagno, y F. Babinec. 2008. Comparación de modelos de infiltración aplicados a eventos de simulación de lluvia en suelos de la Región Pampeana. En XXI Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo. Área: Física, Química y Fisicoquímica de suelos. 13 al 16 de Mayo de 2008. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Evans, B., S.A. Sheeder, and D.W. Lehning. 2003. A spatial technique for estimating streambank erosion based on watershed characteristics. *J. Spatial Hydrol.* 3:1-13.
- Fallico, C., E. Migiari, and S. Troisi. 2005. Characterization of the field hydraulic conductivity on a hillslope: measurements techniques, data sensivity, analysis and spatial correlation modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2:1247-1298.
- Fernández, P., C. Álvarez, M. Luna, y M. Taboada. 2006. Propiedades físicas en sistemas de producción mixta y de agricultura continua en siembra directa. En XX Congreso de la Ciencia del Suelo. I Reunión de Suelos de la Región Andina. 19 al 22 de septiembre 2006. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Salta y Jujuy, Argentina.
- Gowish, L., and R. Muñoz-Carpena. 2009. An improved Green-Ampt infiltration and redistribution on method for uneven multistorm series. *Vadose Zone J.* 8:470-479.
- GraphPad. 2005. GraphPad Software Version 4.00 for Windows. San Diego, California, USA.
- Greenwood, K., D. MacLeod, J. Scott, and K. Hutchinson. 1997. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. *Aust. J. Exp. Agr.* 37:413-419.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics.* Academic Press, London, UK.
- InfoStat. 2002. Infostat versión 1.1. Brujas, Argentina. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- King, K.W. 2000. Response of Green-Ampt Mein-Larsen Simulated runoff volumes to temporally aggregated precipitation. *J. Am. Water Res. Ass.* 36(4):791-794.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. Part 1. p. 597-618. In A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis.* ASSA Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Lal, R., and M.K. Shukla. 2004. *Principles of soil physics.* Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- Landini, A.M, D. Martínez, H. Díaz, E. Soza, D. Agnes, y C. Sainato. 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia Suelo (Argentina)* 25(2):123-131.
- Morel-Seytoux, H.J., P.D. Meyer, M. Nachabe, J. Touma, M.T. van Genuchten, and R.J. Lenhard. 1996. Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soil characteristics: Preserving the effective capillary drive. *Water Resour. Research*

- 32:1251-1258.
- Mwendera, E.J., and M.A. Saleem. 1997. Hydrologic response to cattle grazing in the Ethiopian highlands. *Agr. Ecosyst. Environ.* 64:33-41.
- Page, A.L. 1982. *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties.* SSSA Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Pennock, D., T. Yates, and J. Braidek. 2008. Soil sampling designs. p.1-15. In M. R. Carter and E. G. Gregorich (eds.). *Soil sampling and methods of analysis.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Pietola, L., R. Horn, and M. Yli-Hallac. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil Till. Res.* 82(1):99-108.
- Pilatti, M., O. Felli, S. Imhoff, R. Marano, y A. Alesso. 2009. Cambios en un argiudol típico con siembra directa del centro este de Santa Fe: propiedades físicas. En S. Montico, N. Di Leo, y G. Nardón (eds.). *X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR.* 1 al 4 de septiembre de 2009. Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, and N. Miller. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydraul. Eng.* 109(1):62-70.
- Ressia, J.M., R.H. Balbuena, G.O. Mendivil, J.J. Milione, y H.O. Chidichimo. 1999. Propiedades físicas del suelo y producción de trigo (*Triticum aestivum* L.) bajo diferentes sistemas de labranza. En III Congreso Chileno de Ingeniería Agrícola. CIACH'99. 12 -14 de mayo 1999. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillán, Chile.
- Richmond, P., y S. Rillo. 2005. Evaluación de la infiltración básica en suelos Hapludoles sometidos a diferentes historias de manejo. Disponible en <http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/15/12/2005> (consulta 22 marzo 2011).
- Sainato, C., G. Galindo, M., y M.A. Herrero. 2006. Diagnóstico de la contaminación en suelo y agua subterránea por actividad ganadera mediante sondeos geoelectrónicos en la microcuenca del arroyo Cañete (Pcia. de Bs. As.). *Rev. Fac. Agron. (B. Aires)* 26(1):73-82.
- Sainato, C.M., B.N. Losinno, and H.J. Malleville. 2010. Electrical resistivity tomography applied to detect contamination at a dairy farm at the Pampean Region, Argentina. *Near Surface Geophysics* 8(2):163-172.
- Sales de Oliveira, L.E., M.M. Ferreira, M. Silva de Oliveira, e N. Curi. 1999. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. *Pesq. Agropec. Bras.* 34(11):2091-2095.
- Saxton, K., and W.J. Rawls. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1569-1578.
- Schaap, M.G., F.J. Leij, and M.T. Van Genuchten. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions *J. Hydrol.* 251: 163 -176.
- Schwab, G., R. Frevert, T. Edmister, y K. Barnes. 1990. *Ingeniería de conservación de suelos y agua.* Noriega Editores, México D.F., México.
- Skjemstad, J.O., and J.A. Baldock. 2008. Total and organic carbon. p. 225-237. In M.R. Carter, E.G. Gregorich (eds.). *Soil sampling and methods of analysis.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Stahr, L.M., D.E. Eisenhauer, M.J. Helmers, M.G. Dosskey, and T.G. Franti. 2004. Green-Ampt infiltration parameters in riparian buffers. Annual International Meeting Sponsored by ASAE. Ottawa, Ontario, Canada. 1-4 August 2004. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA.
- Swartzendruber, D. 1993. Revised attribution of the power form infiltration equation. *Water Resour. Res.* 29(7):2455-2456.
- Tomasella, J., Y. Papechepsky, S. Crestana, and W.J. Rawls. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1085-1092.
- Van Genuchten, M.T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Wösten, J.H., and A. Nemes. 2004. Pedotransfer functions for Europe. Vol. 30. p. 431-435. In Y. Pachepsky, Rawls W. J. (eds.). *Developments In soil science.* Elsevier, Beltsville, Maryland, USA.
- Wösten, J.H.M., and M.T. Van Genuchten. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1762-1770.
- Wu, L., L. Pan, L. Mitchell, and B. Sanden. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(63):788-792.