

INFILTRACIÓN DEL AGUA CON LABRANZA CERO DEL SUELO EN UNA MICROCUENCA AGRÍCOLA DE ARGENTINA

Water Infiltration under No Tillage in an Arable Small Watershed of Argentina

M. G. Castiglioni^{1†}, M. J. Massobrio¹, C. I. Chagas¹, O. J. Santanatoglia¹ y A. Buján²

RESUMEN

En la producción agrícola de secano son de fundamental importancia la captación y conservación del agua para su aprovechamiento por los cultivos, siendo el principal factor que regula dicha captación la tasa de infiltración del suelo. En la Pampa Ondulada, Argentina, no existe suficiente información acerca de la variación espacial en la tasa de infiltración, en pequeñas cuencas agrícolas con labranza cero y baja cobertura del suelo. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar la tasa de infiltración básica y los coeficientes de escurrimiento superficial y de decaimiento de la tasa de infiltración en suelos descubiertos con labranza cero, ubicados en distintas posiciones del relieve de una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada, Argentina, y 2) relacionar la tasa de infiltración básica con distintos parámetros edáficos. El trabajo se desarrolló en una microcuenca agrícola de 300 ha, ubicada en la localidad de San Pedro, provincia de Buenos Aires, Argentina, labrada con el sistema de labranza cero desde 1999. Se simuló lluvia sobre suelo descubierto en distintas posiciones del relieve y se estudió la relación entre los parámetros: tasa de infiltración básica, coeficiente de escurrimiento superficial, coeficiente de decaimiento de la tasa de infiltración, humedad superficial del suelo, densidad aparente, carbono orgánico y estabilidad estructural. No se observaron diferencias estadísticas significativas en la tasa de infiltración básica entre los suelos ubicados en distintas posiciones en el relieve de la microcuenca. El sector cercano a la vaguada mostró que el mayor contenido de carbono orgánico de su suelo, lo mismo que su menor densidad aparente, fueron los parámetros que provocaron mayor tasa de infiltración absoluta en dicha posición. Se observó variabilidad

estacional en la tasa de infiltración básica, la que no estuvo asociada a diferencias en el contenido inicial de humedad del suelo superficial, ni a los cambios experimentados en la estabilidad de los agregados.

Palabras clave: movimiento de agua, posición en el relieve, suelo descubierto, estabilidad de agregados.

SUMMARY

Water interception and conservation are critical for growing crops in dryland farming systems. The infiltration rate is one of the main processes that control water interception. In the Argentine Rolling Pampa there is not sufficient information on infiltration spatial variability in small watersheds subjected to no tillage with scarce surface soil cover. The aims of the present work were: 1) to determine the basic infiltration rate, the runoff coefficient and the decreasing infiltration rate coefficient for bare soils under no tillage, located at different landscape positions in an arable microbasin of the Rolling Pampa, Argentina, and b) to relate the basic infiltration rate to soil parameters. The experiment was carried out in an arable microbasin of 300 ha located in San Pedro county, Buenos Aires Province, Argentina, under no tillage since 1999. Experimental sites were selected taking into account their landscape position. Simulated rainfall was applied to soils with no surface cover and the following properties were studied: basic infiltration rate, runoff coefficient, decreasing infiltration rate coefficient, antecedent soil moisture condition, bulk density, organic carbon content, and aggregate stability. No significant differences in basic infiltration rate were observed between landscape positions. The sites near the intermittent waterway showed a larger absolute basic infiltration rate along with the highest organic carbon content and the lowest bulk density. Seasonal variability in basic infiltration rate which was not associated with soil water content and soil aggregate stability was also observed.

Index words: water movement, landscape position, bare soil, aggregate stability.

¹ Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

[†] Autor responsable (castigli@mail.agro.uba.ar)

² Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, Argentina.

Recibido: julio de 2004. Aceptado: febrero de 2006.

Publicado como nota de investigación en
Terra Latinoamericana 24: 423-430.

INTRODUCCIÓN

En la producción agrícola de secano son de suma importancia la captación y conservación del agua para su aprovechamiento por las especies cultivadas; la tasa de infiltración es el principal factor que regula la entrada de agua al suelo.

Sullivan *et al.* (1996) indicaron que los atributos que influyen en la variación de la relación infiltración/escorrentia son el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la pendiente, agregando que es muy general la base de datos que existe, respecto a las propiedades de los suelos que están relacionadas con la tasa de infiltración. Bonta (1998) señaló que los usuarios de modelos hidrológicos utilizan normalmente valores promedio de los parámetros necesarios para estimar la tasa de infiltración del suelo, ignorando sus cambios en el espacio.

Con la finalidad de estudiar la variabilidad en la tasa de infiltración de una microcuenca de Estados Unidos y relacionarla con las texturas de sus suelos, Loague (1990) no encontró una asociación satisfactoria entre ambos parámetros. Sharma *et al.* (1980) tampoco visualizaron, en una microcuenca de Estados Unidos, un patrón coherente en la distribución de la tasa de infiltración, respecto a los suelos presentes y su ubicación.

Cuando el suelo está desprovisto de vegetación, la formación de sellos es uno de los procesos que más influye en la reducción de la infiltración (Risse *et al.*, 1995), por lo tanto, en estas situaciones también se deben tener en cuenta los factores que desencadenan dicho proceso (Wangemann *et al.*, 2000). En este sentido, Assouline y Mualem (1997) mencionaron que las características edáficas que regulan la formación de sellos son: el tamaño de los agregados superficiales, su composición mecánica, su densidad aparente, su contenido inicial de humedad y las condiciones químicas del sistema suelo-agua que determinan la naturaleza y la fuerza de unión de las partículas del suelo.

En la Pampa Ondulada, Argentina, en la última década se ha incrementado la producción agrícola con el sistema de labranza cero. Como se sabe, dicho sistema, al dejar el rastrojo sobre la superficie del suelo, disminuye la tasa de evaporación y la escorrentía del agua, evitando el impacto directo de la gota de lluvia sobre el suelo. En este sentido, son numerosos los trabajos que mencionan el efecto favorable de la presencia del rastrojo en la superficie del suelo sobre la tasa de infiltración

(Potter *et al.*, 1995; De la Vega *et al.*, 2004). Sin embargo, en ciertas ocasiones, esta cobertura puede disminuir a partir de un bajo aporte de residuos de cosecha, por su alta tasa de descomposición o al ser utilizada como recurso forrajero.

No existe en la Pampa Ondulada suficiente información acerca de la variación espacial en la tasa de infiltración en pequeñas cuencas agrícolas con labranza cero y baja cobertura del suelo. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1) determinar la tasa de infiltración básica y los coeficientes de escurrimiento superficial y de decaimiento de la tasa de infiltración en suelos descubiertos con labranza cero, ubicados en distintas posiciones del relieve de una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada, Argentina, y 2) relacionar la tasa de infiltración básica con distintos parámetros edáficos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en una microcuenca de 300 ha, ubicada en la vertiente norte de la cuenca media del Arroyo del Tala, en la localidad de San Pedro, Provincia de Buenos Aires, República Argentina (Chagas *et al.*, 1993).

El clima regional se caracteriza por una temperatura media mensual de 16.9 °C, con máxima media anual de 22.8 °C y mínima media anual de 11.2 °C. La precipitación media anual asciende a 1069 mm, concentrada en el período primavera – estivo – otoño. Los suelos presentes corresponden a Argiudoles Vérticos (INTA, 1973).

Durante los últimos años, el uso de la tierra en esta microcuenca ha sido fundamentalmente agrícola, siendo la soja el cultivo más frecuente. El sistema de labranza utilizado hasta el año 1999 fue la labranza convencional, mientras que a partir de ese año se adoptó el sistema de cultivos con labranza cero.

Dentro de la microcuenca, se seleccionaron cuatro posiciones en el relieve [ladera este, ladera oeste, el sector cercano a la vaguada (pie de ladera) y el sector de loma] que presentaron diferencias en la composición textural del horizonte superficial de los suelos (Cuadro 1).

Una vez seleccionadas las posiciones en el relieve, en cada una de ellas, se realizaron tres mediciones de infiltración, utilizando un simulador de lluvia (Irurtia y Mon, 2004) sobre parcelas cuadradas de 25 cm de lado y con el suelo desprovisto de mantillo y de vegetación viva. La selección de este artefacto para medir la tasa

Cuadro 1. Composición textural del horizonte superficial (0 a 27 cm) de los suelos ubicados en distintas posiciones del relieve.

Posición en el relieve	Arena	Limo grueso	Limo fino	Arcilla	Clase textural
----- % -----					
Ladera oeste	10.4	26.9	27.7	35.0	Franco arcillo limoso
Loma	9.9	29.8	32.4	27.9	Franco arcillo limoso
Sector vaguada	3.6	18.0	44.2	34.2	Franco arcillo limoso
Ladera este	10.2	27.1	34.6	28.1	Franco arcillo limoso

de infiltración del suelo se debió a que sus dimensiones facilitan su traslado y a que no es tan pequeño como para aportar resultados con alta variabilidad. En este sentido, Irurtia y Mon (2004) recomiendan, para disminuir la variación en el muestreo, equipos no menores de 20 a 30 cm de diámetro. A su vez, este método, a diferencia de otros, incluye el efecto del impacto de la gota de lluvia sobre el suelo en los resultados observados de la tasa de infiltración. En la parte superior del simulador (150 cm) está ubicado el portagoteros de acrílico, en cuya base están los 49 picos formadores de gotas, tubos de plástico con un diámetro interno de 0.5 mm que forman gotas con 4.7 mm de diámetro. En todos los casos, la lluvia se aplicó durante una hora, con una intensidad promedio de 60 mm h⁻¹ y una energía igual a 15 kJ m⁻² m⁻¹. La tasa de infiltración se determinó a partir de la diferencia entre el escurrimiento, medido en la salida de las parcelas cada cuatro minutos, y el total de lluvia aplicada en igual período. La infiltración básica se calculó utilizando el promedio de las últimas tres lecturas, las cuales siempre se ubicaron en períodos de alta estabilidad en la tasa de infiltración.

Para eliminar la protección de la cobertura vegetal, todo el rastrojo superficial se retiró sin disturbar el suelo y, en el caso de haber plantas vivas, éstas se cortaron al ras del suelo.

Para cada posición en el relieve se ajustaron los valores de tasa de infiltración a un modelo exponencial negativo, cuya fórmula general es:

$$y = a * \exp(-b * x)$$

donde: y, tasa de infiltración (cm h⁻¹); x, lluvia acumulada desde el inicio del escurrimiento (mm); a, coeficiente de ajuste; b, coeficiente de decaimiento.

En cada posición del relieve se tomaron muestras de los primeros 5 cm del suelo para determinar humedad gravimétrica (Gardner, 1986), densidad aparente (Blake, 1965), carbono orgánico (Walkley y Black, 1965) y estabilidad estructural (De Leenheer y De Boodt, modificado por Santanatoglia y Fernández, 1982). Esta última determinación contempla el cambio en el tamaño medio de tres fracciones de agregados (8 a 4.8 mm, 4.8 a 3 mm y 3 a 2 mm), luego que éstos son sometidos a la energía proveniente del impacto de gotas de agua y su posterior tamizado bajo el agua.

La determinación de la tasa de infiltración y este muestreo se realizaron en todas las posiciones en el relieve en otoño, invierno y primavera de 2003, mientras que en las dos laderas y en la loma se hicieron, además, mediciones de infiltración y estabilidad de agregados a principios del verano del mismo año (Cuadro 2).

El estudio se realizó con un diseño estadístico completamente aleatorizado con cuatro tratamientos, correspondientes a las distintas posiciones en el relieve, y tres repeticiones que constituyeron las simulaciones de lluvia efectuadas en distintas fechas en las unidades experimentales (parcelas de 25 cm de lado), ubicadas en lugares representativos de cada una de las posiciones del relieve seleccionadas. Se realizó análisis de varianza (Montgomery, 1991) para evaluar las diferencias en la tasa de infiltración básica y en los coeficientes de escurrimiento superficial y de decaimiento de la tasa de infiltración entre las distintas posiciones en el relieve. También se hizo un análisis de correlación (Montgomery, 1991) para determinar la existencia de alguna vinculación entre los distintos parámetros analizados y la tasa de infiltración básica. A su vez, para aquellas posiciones del relieve en que se hicieron simulaciones de lluvia en las cuatro estaciones del año, se compararon los valores de infiltración básica del suelo y de estabilidad de agregados de las diferentes fechas mediante análisis de varianza, recurriéndose, además, a la prueba de Tukey para la diferenciación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tasa de Infiltración Básica

Como puede observarse en el Cuadro 3, no existieron diferencias estadísticas significativas en la tasa de infiltración básica, luego de 60 mm de lluvia simulada, en los suelos ubicados en distintas posiciones del relieve.

Cuadro 2. Estación del año, grado de las pendientes y uso del suelo en cada una de las posiciones en el relieve donde se evaluó la infiltración.

Posición en el relieve	Estación del año	Grado de la pendiente %	Uso del suelo
Ladera oeste	Otoño	0.5 a 0.8	Maíz cosechado
Ladera oeste	Invierno	0.5 a 0.8	Maíz cosechado
Ladera oeste	Primavera	0.5 a 0.8	Maíz cosechado
Ladera oeste	Verano	0.5 a 0.8	Soja emergida
Loma	Otoño	menor de 0.5	Soja cosechada
Loma	Invierno	menor de 0.5	Trigo emergido
Loma	Primavera	menor de 0.5	Trigo encañado
Loma	Verano	menor de 0.5	Soja emergida
Sector vaguada	Otoño	menor de 0.5	Soja cosechada
Sector vaguada	Invierno	menor de 0.5	Trigo emergido
Sector vaguada	Primavera	menor de 0.5	Trigo encañado
Ladera este	Otoño	1 a 1.3	Soja cosechada
Ladera este	Invierno	1 a 1.3	Trigo emergido
Ladera este	Primavera	1 a 1.3	Trigo encañado
Ladera este	Verano	1 a 1.3	Soja emergida

Efecto de las Características del Suelo

No obstante lo mencionado, la densidad aparente y el carbono orgánico fueron los parámetros que influyeron en mayor medida sobre la tasa de infiltración básica (coeficientes de correlación de -0.79 y 0.89, respectivamente). Según se observa en la Figura 1a y b, el sector cercano a la vaguada fue la posición en el relieve en la que los suelos presentaron menores valores de densidad aparente y mayores de carbono orgánico, lo que explica la mayor tasa de infiltración.

Cuadro 3. Valores medios y coeficientes de variación de la tasa de infiltración básica de agua en el suelo por posición en el relieve.

Posición en el relieve	Tasa de infiltración básica cm h ⁻¹	Coefficiente de variación %
Ladera oeste	0.608 a	42.7
Loma	0.548 a	39.8
Sector vaguada	0.702 a	59.2
Ladera este	0.614 a	30.3

El sector vaguada de la microcuenca, debido a su posición topográfica, presenta durante el año mayor contenido de humedad edáfica, respecto a las restantes posiciones analizadas, por lo que la producción de materia seca en el mismo es mayor. Esto provocó que el suelo ubicado en dicha posición tuviera más materia orgánica y una densidad aparente menor. Similares resultados encontraron Shaver *et al.* (2003), al este de Colorado (EE.UU.), al relacionar la producción de biomasa vegetal de tres sitios con diferente balance hídrico edáfico, y la densidad aparente y porosidad efectiva correspondiente a los suelos presentes en cada uno de dichos sitios.

Soane (1990) mencionó que el incremento de la materia orgánica en los suelos reduce su compactibilidad, debido al incremento en su resistencia a la deformación o al aumento en su elasticidad. En este sentido, son varios los autores que encontraron altas correlaciones negativas entre la máxima compactibilidad de los suelos y su contenido de carbono orgánico (Thomas *et al.*, 1996; Aragón *et al.*, 2000).

A su vez, en el proceso de compactación, los macroporos son la categoría de poros más afectados

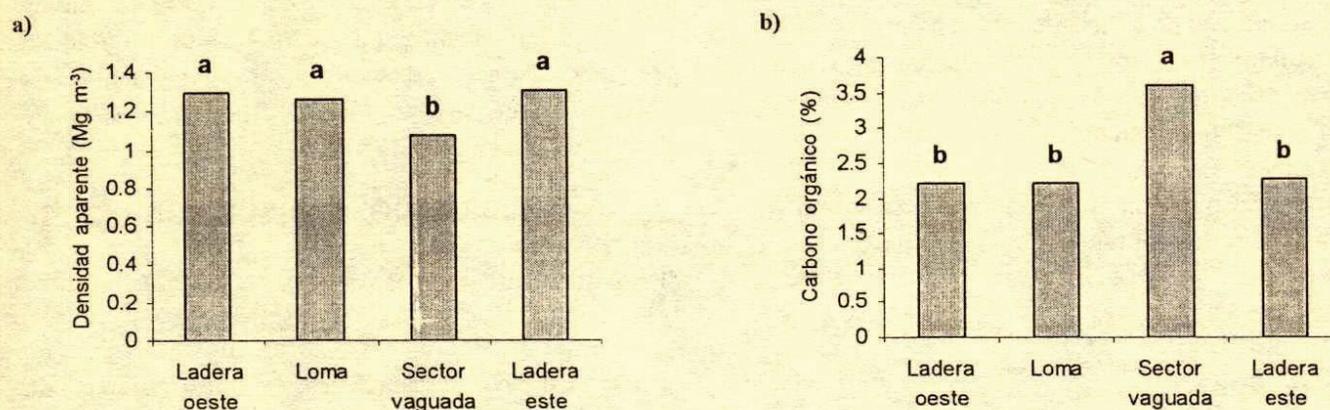


Figura 1. Valores medios de densidad aparente (a) y carbono orgánico (b) correspondientes al horizonte superficial de los suelos analizados. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

(Carter, 1990), éstos son los que gobiernan el flujo saturado del agua en el suelo (Lipiec y Hatano, 2003). Horton *et al.* (1994) y Guerif *et al.* (2001) mencionaron una drástica reducción en la conductividad hidráulica saturada ante incrementos en la compactación del suelo.

En el presente trabajo, el suelo perteneciente al sector cercano a la vaguada mostró un mayor porcentaje de limo fino, respecto a los otros suelos estudiados (Cuadro 1), lo cual lo haría más susceptible a sufrir procesos de encostramiento (FAO, 1980), como también un menor porcentaje de arena (Cuadro 1), por lo que su tasa de infiltración debería ser menor que la de los restantes suelos estudiados. Sin embargo, su menor densidad, obtenida a partir de un mayor contenido de materia orgánica, contrarrestó esos dos factores negativos, logrando que su tasa de infiltración básica no fuera menor que la de los restantes suelos.

También se pudo comprobar, al comparar la estabilidad de agregados de los distintos horizontes superficiales (Cuadro 4), que el mayor contenido de materia orgánica del suelo correspondiente al sector cercano a la vaguada, no se reflejó en una diferencia significativa en esta propiedad respecto a la obtenida por los otros suelos.

Como se observa en el Cuadro 4, las diferencias texturales existentes entre los diferentes suelos (Cuadro 1) no se expresaron en los resultados obtenidos de esta propiedad, debido, probablemente, al alto contenido de carbono orgánico presente en todos

Cuadro 4. Valores medios y coeficientes de variación de la estabilidad de agregados del suelo por posición en el relieve.

Posición en el relieve	Estabilidad de agregados	Coefficiente de variación
	mm	%
Ladera oeste	0.5997 a	14.7
Loma	0.7386 a	47.6
Sector vaguada	0.7488 a	33.0
Ladera este	0.6561 a	37.0

los suelos (Figura 1b). En este sentido, Loveland y Webb (2003) mencionaron que con menos de 2% de carbono orgánico, los suelos se vuelven físicamente inestables, más susceptibles a sufrir daños por su uso agrícola y más proclives a desencadenar procesos erosivos; este valor es superado por todos los horizontes superficiales analizados en el presente estudio.

Pese a ello, y como puede observarse en la Figura 2, existieron diferencias en el comportamiento de los agregados durante el año, debidas al pasaje de la maquinaria en las posiciones sembradas con trigo durante el invierno, recuperando su valor inicial en las siguientes estaciones del año.

Sin embargo, estas diferencias en la estabilidad estructural, ocurridas durante el año, no influyeron en la tasa de infiltración básica, ya que el coeficiente de correlación hallado entre ambos parámetros fue muy bajo.

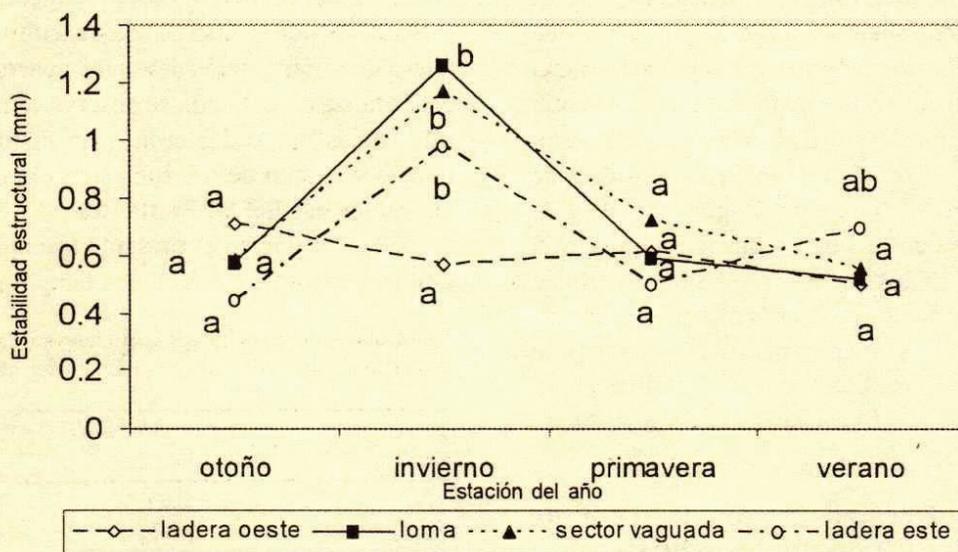


Figura 2. Estabilidad estructural de los agregados del suelo por posición en el relieve según la estación del año. Letras distintas para una misma posición en el relieve indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

Cuadro 5. Valores medios y coeficientes de variación de los coeficientes de decaimiento de la tasa de infiltración y de escurrimiento superficial por posición del relieve.

Posición en el relieve	Coefficiente de decaimiento	Coefficiente de variación	Coefficiente de escurrimiento	Coefficiente de variación
		----- % -----		
Ladera oeste	0.0776 a	22.5	59.3 a	16.9
Loma	0.0892 a	41.5	54.9 a	6.8
Sector vaguada	0.1510 a	59.2	58.2 a	56.6
Ladera este	0.0782 a	49.5	58.0 a	20.1

La formación de costras es uno de los procesos que más repercute en la reducción de la infiltración en suelos descubiertos (Risse *et al.*, 1995). Su formación no está dominada solamente por las características de la lluvia, sino que también está afectada por ciertas propiedades físico-químicas del suelo, las cuales determinan la magnitud de las fuerzas cohesivas entre sus partículas (Assouline y Mualem, 1997).

En este sentido, varios investigadores diseñaron ecuaciones de infiltración en las que incluyeron coeficientes que contemplan la estabilidad de los agregados ante la energía cinética de la lluvia (Risse *et al.*, 1995). Sin embargo, Mwendera y Feyen (1993) encontraron que la tasa de infiltración de un suelo con siembra directa disminuyó en forma muy lenta y menos marcadamente que con otros sistemas de labranza, ante incrementos en la cantidad de lluvia caída sobre suelo descubierto. Por su parte, Rhoton *et al.* (2002) vieron que el parámetro simple que mejor explicó el escurrimiento obtenido en ensayos realizados en parcelas y microcuencas con labranza cero, fue la densidad aparente del suelo superficial, mientras que cuando el suelo se labró en forma convencional, dicha propiedad fue menos efectiva para predecir la escurrimiento sufrida. En este último caso, dichos autores debieron incluir en el modelo de regresión la estabilidad de agregados o el porcentaje de arcilla dispersable al agua, para obtener una capacidad de predicción similar a la obtenida en el caso de los suelos con labranza cero.

Indudablemente, la estabilidad de agregados, en este sistema de labranza, es un parámetro de menor peso relativo frente a otros, cuando se le utiliza en la estimación de la tasa de infiltración del suelo descubierto frente a la acción de la lluvia.

Coefficientes de Decaimiento de la Tasa de Infiltración y de Escurrimiento Superficial

Respecto al coeficiente de decaimiento de la tasa de infiltración ("b"), el cual está relacionado con

el tiempo que tarda el suelo en llegar a su tasa de infiltración de equilibrio o básica, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las distintas posiciones del relieve analizadas (Cuadro 5). Tampoco se encontraron diferencias estadísticas significativas en el coeficiente de escurrimiento superficial entre posiciones (Cuadro 5), mientras que el grado de la pendiente en cada una de ellas no estuvo correlacionado con ninguno de estos coeficientes ni con la tasa de infiltración básica.

Efecto de la Estación del Año

Al comparar los resultados obtenidos en las distintas estaciones del año, se observó un mayor valor de la tasa de infiltración básica en el verano respecto a las fechas restantes (Cuadro 6).

Este distinto comportamiento obedecería a los cambios que se generaron en los primeros centímetros del suelo a partir de la descomposición de las raíces del cultivo anterior (trigo), conjuntamente con los efectos producidos por la emergencia del cultivo de soja, la cual alteró la estratificación del suelo, generada por el sistema de labranza cero. Según se observa en el Cuadro 7, estas diferencias no se debieron a un distinto contenido de humedad inicial de los suelos en el verano, respecto a las estaciones del año restantes.

Al igual que en el presente trabajo, Loague (1990) también encontró variaciones temporales en la tasa de

Cuadro 6. Valores medios y coeficientes de variación de la tasa de infiltración básica por estaciones del año.

Estación del año	Tasa de infiltración básica	Coefficiente de variación
	cm h ⁻¹	%
Otoño	0.578 a	34.8
Invierno	0.531 a	38.8
Primavera	0.661 a	36.2
Verano	2.044 b	41.6

Cuadro 7. Contenido de humedad gravimétrica del horizonte superficial del suelo por estación del año para tres posiciones en el relieve.

Estación del año	Ladera oeste	Loma	Ladera este
	----- % -----		
Otoño	20.83	25.34	33.97
Invierno	24.83	24.77	25.01
Primavera	14.37	9.76	10.39
Verano	18.78	24.99	32.74

infiltración de los suelos pertenecientes a la microcuenca estudiada por este autor y concluyó que es incorrecto asumir tasas de infiltración invariables en el tiempo, como es de uso frecuente en los modelos de lluvia-escorrimento.

CONCLUSIONES

- No se observaron diferencias estadísticas significativas en la tasa de infiltración básica entre los suelos ubicados en distintas posiciones en el relieve de la microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada, Argentina, con labranza cero.

- El sector cercano a la vaguada mostró que el mayor contenido de carbono orgánico de su suelo, lo mismo que su menor densidad aparente, fueron los parámetros que provocaron mayor tasa de infiltración absoluta en dicha posición.

- Se observó variabilidad estacional en la tasa de infiltración básica, la que no estuvo asociada a diferencias en el contenido inicial de humedad del suelo superficial, ni a los cambios experimentados en la estabilidad de los agregados.

LITERATURA CITADA

- Aragón, A., M. G. García, R. R. Filgueira y Y. A. Pachepsky. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: the relationship with organic carbon and water content. *Soil Tillage Res.* 56: 197-204.
- Assouline, S. y Y. Mualem. 1997. Modeling the dynamics of seal formation and its effect on infiltration as related to soil and rainfall characteristics. *Water Resour. Res.* 33: 1527-1536.
- Blake, G. R. 1965. Bulk density. pp. 374-390. *In: C.A. Black (ed.). Methods of soil analysis. Monogr. 9. Part I. Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.*
- Bonta, J. V. 1998. Spatial variability of runoff and soil properties on small watersheds in similar soil-map units. *Trans. ASAE* 41: 575-585.
- Carter, M. R. 1990. Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. *Soil Tillage Res.* 15: 257-268.
- Chagas, C. I., O. J. Santanatoglia y E. A. Rienzi. 1993. Análisis del escurrimiento de una microcuenca utilizando distintas metodologías. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales* 8: 177-190.
- De la Vega, G., M. G. Castiglioni, M. J. Massobrio, C. I. Chagas, O. J. Santanatoglia y C. Iruetia. 2004. Efectos de la cobertura y la humedad inicial en la infiltración de un Argiudol Vértico bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 22: 25-27.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1980. Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos. Roma, Italia.
- Gardner, W. H. 1986. Water content. pp. 493-544. *In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.*
- Guerif, J., G. Richard, C. Durr, J. M. Machet, S. Recous y J. Roger-Strade. 2001. A review over tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Tillage Res.* 61: 13-32.
- Horton, R., M. D. Ankeny y R. R. Allmaras. 1994. Effects of soil compaction on soil hydraulic properties. pp. 141-155. *In: Soane B. D. y C. van Ouwerkerk (eds.). Soil compaction in crop production. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.*
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 1973. Carta de Suelos de la República Argentina Hoja 3360-33 Pérez Millán, E 1:50.000. Instituto de Suelos. Centro de Investigación en Recursos Naturales. Castelar, Buenos Aires, Argentina.
- Iruetia, C.B. y R. Mon. 2004. Aplicación de simuladores de lluvias portátiles, para determinar infiltración del suelo a campo. pp. 131-144. *In: Filgueira, R. R. y F.G. Micucci (eds.). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. Universidad de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.*
- Lipiec, J. y R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma* 116: 107-136.
- Loague, K. y G. A. Gander. 1990. R-5 Revisited. 1. Spatial variability of infiltration on a small rangeland catchment. *Water Resour. Res.* 26: 957-971.
- Loveland, P. y J. Webb. 2003. Is there a critical level of soil organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil Tillage Res.* 70: 1-18.
- Montgomery, D. C. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D. F.
- Mwendera, E. J. y J. Feyen. 1993. Predicting tillage effects on infiltration. *Soil Sci.* 155: 229-235.
- Potter, K. N., H. A. Torbert y J. E. Morrison Jr. 1995. Tillage and residue effects on infiltration and sediment losses on vertisols. *Trans. ASAE.* 38: 1413-1419.
- Rhoton, F. E., M. J. Shipitalo y D. L. Lindbo. 2002. Runoff and soil loss from midwestern and south eastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil Tillage Res.* 66: 1-11.

- Risse, L. M., M. A. Nearing y X. C. Zhang. 1995. Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions. *J. Hydrol.* 169: 1-24.
- Santanatoglia, O. J. y N. Fernandez. 1982. Modificación del método de De Leenheer y De Boodt para el análisis de la distribución de agregados y efecto del tipo de embalaje y acondicionamiento de la muestra sobre la estabilidad estructural. *Rev. Inv. Agrop.* XVII: 23-31.
- Sharma, M. L., G. A. Gander y C. G. Hunt. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *J. Hydrol.* 45: 101-122.
- Shaver, T. M., G. A. Peterson y L. A. Sherrod. 2003. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: regression relations. *Geoderma* 116: 149-164.
- Soane, B. D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil Tillage Res.* 16: 179-201.
- Sullivan, M., J. J. Warwick y S. W. Tyler. 1996. Quantifying and delineating spatial variations of surface infiltration in a small watershed. *J. Hydrol.* 181: 149-168.
- Thomas, G. W., G. R. Haszler y R. L. Blevins. 1996. The effects of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the Proctor test. *Soil Sci.* 161: 502-508.
- Walkley, A. y C. A. Black. 1965. Organic carbon. pp. 1372-1375. *In:* C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Monogr. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Wangemann, S. G., R. A. Kohl y P. A. Molumeli. 2000. Infiltration and percolation influenced by antecedent soil water content and air entrapment. *Trans. ASAE* 43: 1517-1523.