

EFFECTO DEL TRÁFICO CONTROLADO SOBRE LA INFILTRACIÓN DEL AGUA Y LA EROSIÓN DEL SUELO EN UN SISTEMA DE CULTIVOS ANUALES EN LOMOS PERMANENTES EN EL SUR DE ESPAÑA

H. Boulal^{1,2}, T. Alves Sobrinho^{1,3}, H. Gómez-Macpherson¹, J.A. Gómez¹

¹ Instituto de Agricultura Sostenible, C.S.I.C. Alameda del Obispo S/N. Apartado 4084. 14080 Córdoba.

* email: hakboulal@yahoo.fr

² Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba.

³ UFMS, Cidade Universitária, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil.

RESUMEN. Este estudio se realizó en una explotación comercial (Fuente Palmera, Córdoba) en la que durante 4 años se ha estado practicando siembra directa y tráfico controlado en una rotación algodón/maíz sobre lomos permanentes distanciados 0.95 m. Usando un simulador de lluvia portátil se estimaron la velocidad de infiltración, el volumen de escorrentía y las pérdidas de suelo en surcos, con tráfico y sin tráfico de maquinaria, y con y sin residuos sobre la superficie del suelo. El simulador produjo una lluvia constante y homogénea de 60 mm h⁻¹ sobre una parcela cuadrada de 0.9 m de lado. Las medidas se realizaron en cuatro puntos en dos surcos representativos con pendiente constante (9%). Las medidas se repitieron tras retirar los residuos superficiales. Los resultados muestran que el tráfico de maquinaria redujo a la mitad la velocidad final de infiltración en comparación con la zona sin tráfico. Sin embargo, la pérdida de suelo estuvo condicionada por la presencia de residuos y la cobertura del suelo (cien por cien en ese momento). Los problemas de compactación normalmente asociados al tráfico de maquinaria en un sistema de no-laboreo pueden reducirse manteniendo los residuos en la superficie del suelo y con tráfico controlado.

ABSTRACT. This study was carried out in a commercial farm (Fuente Palmera, Córdoba) where direct sowing and controlled traffic had been practised during 4 years. The rotation cotton/maize is grown on permanent beds separated 0.95 m. A portable rainfall simulator was used to estimate the water infiltration rate, the runoff volume and the soil loss in furrows with and without wheels traffic and with and without residues. The simulator provided a constant and homogenous rain of 60 mm h⁻¹ on a 0.9 m x 0.9 m plot. Measurements took place in four points in two adjacent representative furrows. Measurements were repeated after removing the residues. The results show that the wheels traffic reduced to half the infiltration rate in comparison to no wheel traffic. On the other hand, soil loss is more influenced by the presence of residues and soil cover (full cover at that time). Compaction problems normally associated to wheel traffic in a no tillage system can be reduced significantly with controlled traffic and maintenance of residues on the surface.

1.- Introducción

La erosión hídrica causada por las lluvias intensas y erráticas típicas del otoño - invierno mediterráneo es uno de los problemas ambientales más graves relacionados con la agricultura en el valle del Guadalquivir. Afortunadamente, el riesgo de erosión hídrica se puede reducir gracias al laboreo de conservación, entendiéndose éste como los métodos de laboreo mínimo y siembra directa que van acompañados del mantenimiento de residuos de los cultivos (Blevins y Frye, 1993; Holland, 2004). En términos generales, los residuos ayudan a proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia (Ruan et al. 2001), mejoran la agregación de las partículas del suelo (Singh et al. 1994), incrementan la infiltración del agua (Baumhardt y Lascano, 1996) y reducen y ralentizan la escorrentía (Gilley, 1995). El laboreo de conservación entraña también algunos inconvenientes, entre ellos, un posible aumento de la compactación asociado al paso de maquinaria cuando el suelo está húmedo (Blevins y Frye, 1993).

La puesta en riego de terrenos en pendiente aumenta el riesgo de erosión hídrica al sumarse a la lluvia el agua de riego. Si el riego es mediante "pivot", la intensidad de precipitación en el extremo distal de la máquina ha de ser alta, uniéndose los efectos erosivos del impacto de la gota al de la escorrentía que se genera. Aunque la agricultura de conservación está más extendida en secano, existen también algunos métodos para regadío desarrollados en distintas regiones del mundo. En India, la productividad del agua del maíz cultivado en camas permanentes resultó un 42% mayor que en el sistema tradicional (Jat et al. 2006). En Turquía, un laboreo reducido (pase de chisel) combinado con alomado del terreno para el cultivo de algodón facilita la recolección mecánica y reduce los costes de producción (Ozpinar e Isik, 2004). En Méjico, el uso de camas permanentes permite ajustar mejor los ciclos del trigo y maíz en una campaña (Limón-Ortega et al. 2000) y ha mejorado la estructura del suelo (Govaerts et al. 2007).

En Córdoba, el agricultor e ingeniero, R. Calleja, ha desarrollado un sistema de lomos permanentes para la rotación maíz-algodón regada por pivot que le ha permitido mejorar el balance de agua y reducir significativamente la erosión (Sánchez-Domínguez, 2004). El sistema tiene como componentes claves el tráfico controlado y uso de ruedas de alta flotación, ambas para minimizar la compactación originada por la maquinaria, y un pase ligero de rastrillo

antes de sembrar para desplazar los residuos de los lomos a los surcos permitiendo aumentar la temperatura sobre el lomo durante la emergencia de plántulas mientras que los residuos protegen la base del surco.

La disposición del cultivo en lomos o en camas facilita el tráfico controlado pasando las ruedas de la maquinaria por surcos identificados. En ciertas condiciones, el tráfico controlado reduce el efecto negativo de la compactación (Unger, 1996) y mejora la infiltración del agua en el suelo (Li et al. 2001). La influencia de estas ventajas en campo se puede evaluar con el uso de simuladores de lluvia portátiles. Estos se han empleado satisfactoriamente para estimar la infiltración del agua en suelos manejados de forma diversa (Frasier et al. 1995; Mohanty y Singh 1996; Gómez et al. 1999). El presente trabajo expone los resultados iniciales de un estudio, aún en curso, sobre el efecto del tráfico de maquinaria y los residuos sobre la infiltración del agua en el suelo y la erosión usando un simulador de lluvia portátil.

2.- Materiales y métodos

El estudio se ha realizado en una parcela de 20 ha de una finca comercial (37°44' N, 5°09' O) en Fuente Palmera (Provincia de Córdoba, España). En esta parcela se ha estado practicando siembra directa y tráfico controlado durante 4 años en una rotación algodón/maíz sobre lomos permanentes separados 0.95 m. El estudio se realizó en noviembre de 2006 tras la cosecha de un cultivo de maíz (cuarto cultivo sucesivo).

En una zona de pendiente homogénea del 9% se seleccionaron dos surcos adyacentes: uno con tráfico de maquinaria (CT) y otro sin tráfico (ST). Las medidas se realizaron en cuatro puntos por surco con una distancia entre puntos de 15 m aproximadamente. Se hicieron dos simulaciones de lluvia por punto: una en presencia de residuos (CR) y otra sin residuos (SR). El suelo de la zona es arcilloso (55% arcilla, 19% arena y 26% limo). En el momento del ensayo, el contenido de materia orgánica era 2.9% en el horizonte 0-0.1 m y 1,8% en el horizonte 0.1-0.2 m y el de fósforo asimilable (Olsen) y nitrógeno orgánico para los 20 primeros cm fue 8 ppm y 0.12% respectivamente.

Para las simulaciones de lluvia se usó el simulador *InfiAsper2* (Alves Sobrinho et al. 2007). Con dicho simulador se consiguió una lluvia constante y homogénea de 60 mm h⁻¹ sobre una subparcela cuadrada de 0,9 m de lado manteniendo la presión en las boquillas a 35 kPa. La subparcela se delimita con una estructura cuadrangular de chapas de acero galvanizado de 2 mm de espesor que acaba en un embudo para facilitar la recogida de la escorrentía. Antes de empezar la simulación se tomaron muestras de suelo en un punto cercano al simulador para determinar el contenido de agua en los primeros 20 cm (secado en horno a 105°C). También se midió la rugosidad superficial del suelo utilizando el método de la cadena.

Durante la simulación de la lluvia, la escorrentía se recogió y midió cada 2 minutos. Una de cada 3 muestras

(cada 6 minutos) se guardó en un recipiente para secar más tarde en una estufa a 105°C hasta peso constante y estimar la concentración de sedimentos. La infiltración se estimó a partir de la diferencia entre la cantidad de lluvia simulada y la escorrentía.

Cada simulación duró el tiempo de inicio de la escorrentía más 60 minutos. Al acabar la primera simulación en un punto se recogieron los residuos sobre la subparcela con cuidado, y, 60 minutos más tarde, recomenzaba la simulación sobre la subparcela que duraría otros 60 minutos a partir del inicio de la escorrentía. Los residuos se llevaron al laboratorio donde se lavaron y secaron en estufa a 70°C. A los 3 días se pesaron para estimar la cantidad de materia seca.

El grado de compactación del suelo en los surcos CT y ST se caracterizó midiendo la resistencia mecánica a la penetración con un penetrómetro de cono (Bradford, 1986) accionado de forma manual. Se hicieron cinco medidas en cada uno de los tipos de surcos. Para cada 0.05 m se obtuvo la resistencia a la penetración media, expresada en MPa, hasta una profundidad máxima de 0.6 m. Las medidas fueron realizadas semanas antes de la simulación de la lluvia en una zona adyacente y en ese día se tomaron muestras de suelo a cuatro profundidades (0-0.15; 0.15-0.3; 0.3-0.45 y 0.45-0.60 m) para determinar el contenido de agua.

3.- Resultados y discusión

3.1. Condiciones iniciales del suelo

Antes de usar el simulador de lluvia se analizaron las condiciones iniciales del suelo. En la Tabla 1 se observan las características del suelo en los surcos con y sin tráfico. Los suelos de ambos surcos presentaron características similares. La concentración de materia orgánica (MO) es elevada en la parte superior del perfil (0-0.1 m), lo que concuerda con otros resultados obtenidos en lomos permanentes (Govaerts et al. 2007), siendo, probablemente, consecuencia de la presencia de gran cantidad de residuos en la superficie del suelo (Wilhelm et al. 2004). En el momento del estudio se obtuvo una media de 1,38 kg m⁻² de residuos y una cobertura del suelo de 100% sin diferencias significativas entre los surcos ST y CT. Tampoco se encontraron diferencias en la humedad inicial del suelo antes de la primera simulación con residuos (0.30 m³m⁻³), ni en la rugosidad (3.5%).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas del suelo de la zona estudiada: fósforo asimilable, nitrógeno orgánico, materia orgánica (MO) y textura.

Surcos	Profundidad (m)	P asim. (ppm)	N org. (%)	MO (%)	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)
ST	0 - 0.1	12	0.13	2.09	53.0	21.5	25.6
	0.1 - 0.2	5	0.11	1.75	54.6	19.5	25.9
CT	0 - 0.1	11	0.13	2.08	55.0	16.6	28.4
	0.1 - 0.2	4	0.12	1.82	55.5	19.8	24.7

3.2. Resistencia del suelo a la penetración

En la Fig. 1 se observa que en los dos tipos de surcos estudiados (ST y CT) la compactación aumenta con la profundidad. Las medidas son muy similares los primeros 0.05 m pero luego se diferencian hasta una profundidad de 0.27 m. En esta franja, se detectó una compactación significativamente más alta en el caso de los surcos con tráfico. Estos resultados coinciden con los de Stenitzer y Murer (2003) que encontraron para los primeros 0.3 m una resistencia a la penetración muy alta en el suelo compactado comparado con el suelo sin tráfico. En la Fig. 1 puede apreciarse que la resistencia a la penetración a profundidades mayores de 0.27 m es similar en los dos casos y que el límite superior de la resistencia a la penetración es 2.5 MPa. Este último valor es considerado como el máximo a partir del cual las raíces no pueden penetrar más en el suelo (Taylor et al. 1966).

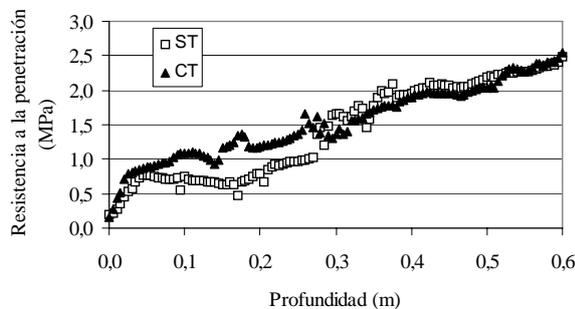


Fig. 1. Resistencia a la penetración en surcos sin tráfico (ST) y con tráfico (CT) en función de la profundidad del suelo (humedad del suelo: 0.32 m³m⁻³ en los primeros 30 cm y 0.24 m³m⁻³ de 30 a 60 cm).

3.3. Impacto del tráfico controlado y los residuos sobre la infiltración del agua

En la Fig. 2 se observa que desde los primeros minutos de la simulación la velocidad de infiltración del agua en el suelo es más alta en los casos del suelo sin tráfico que con tráfico. Esta diferencia se duplica después de 10 minutos y se mantiene hasta al final de la prueba (60 minutos). Estos resultados concuerdan con otros estudios que confirman que hay una mayor capacidad de infiltración en surcos sin tráfico (Basher y Ross, 2001; Raper, 2005). Benjamin et al. (1999) encontraron que la menor capacidad de infiltración en los suelos con tráfico se debe a una reducción de la porosidad total, y también al menor diámetro medio de los poros (Wilhelm et al. 2004).

Los datos de la Fig. 2 muestran que la velocidad de infiltración aumenta con la presencia de residuos y este efecto es mayor en el surco sin tráfico, aunque también es significativo con tráfico. Los residuos absorben el impacto de las gotas y protegen el suelo del sellado provocado por la lluvia (Ruan et al. 2001). Es posible que en los resultados de la Fig. 2 haya alguna influencia debido a las diferencias

en humedad inicial entre los ensayos con y sin residuos para cada tratamiento, especialmente durante los primeros minutos. No obstante, la elevada humedad inicial antes de la primera simulación con residuos (0.30 m³m⁻³) sugiere que esa influencia debe ser moderada. Baumhardt y Lascano (1996) también encontraron que la infiltración del agua en surcos aumentaba con la presencia de residuos hasta que estos llegaban a 0.24 kg m⁻², valor bastante menor que los 1.38 kg m⁻² de nuestro caso.

3.4. Efecto del tráfico controlado y los residuos sobre la erosión

La erosión del suelo se estimó a partir de la concentración de los sedimentos en la escorrentía. La Fig. 3 muestra el tiempo desde el inicio de la simulación al inicio de la escorrentía. La presencia de residuos retrasó la aparición de escorrentía, en conformidad con Gilley (1995), y este efecto fue mayor en el suelo sin tráfico (6 minutos menos) que con tráfico (3 minutos menos), aunque aquí es posible que haya un efecto importante de las diferencias en humedad inicial del suelo, no medidas al inicio de las simulaciones sin residuos.

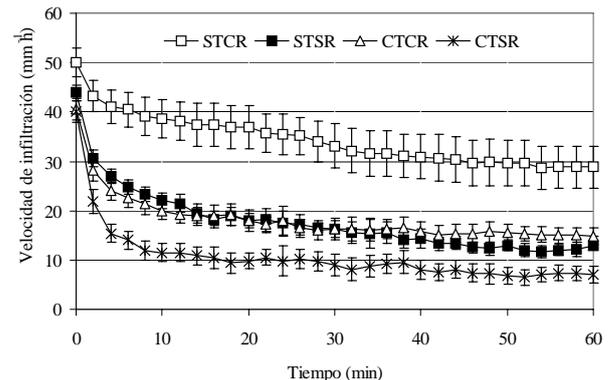


Fig. 2. Evolución de la velocidad de infiltración (\pm error estándar) en el tiempo (STCR: sin tráfico, con residuos; STSR: sin tráfico, sin residuos; CTCR: con tráfico, con residuos; CTSR: con tráfico, sin residuos).

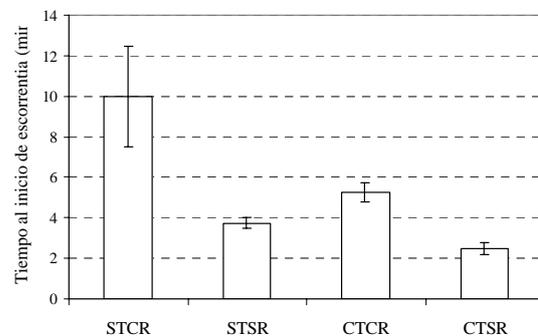


Fig. 3. Tiempo de inicio de la escorrentía (STCR: sin tráfico, con residuos; STSR: sin tráfico, sin residuos; CTCR: con tráfico, con residuos; CTSR: con tráfico, sin residuos). (\pm error estándar)

Como ya se ha discutido, los residuos absorben el impacto de las gotas y reducen el movimiento del agua sobre la superficie del suelo. La interceptación de los residuos es una función del tipo, la masa y la cobertura de los residuos y de la intensidad y duración de la lluvia o del riego (Kozak et al., 2007). En nuestras condiciones, todos los factores son similares con tráfico o sin tráfico.

En la Fig. 4 se presenta la pérdida de suelo acumulada durante la hora que duró la simulación de lluvia con formación de escorrentía. Se observa que la pérdida del suelo es más alta en los surcos con tráfico y sin residuos. Estos resultados coinciden con otros resultados sobre el efecto del tráfico controlado (Basher y Ross, 2001). La pérdida de suelo máxima acumulada alcanzó 0.053 kg m^{-2} en el caso del tráfico sin residuos mientras que sólo llegó a 0.008 kg m^{-2} en el caso del suelo sin tráfico con residuos. En los sistemas de lomo permanentes por tanto, la presencia de los residuos y el tráfico controlado son esenciales para reducir el riesgo de erosión del suelo. La necesidad de mantener residuos para reducir la escorrentía y la erosión del suelo en sistemas que practican agricultura de conservación ha sido señalada con anterioridad (Bradford y Huang, 1994; Smolikowski et al. 2001).

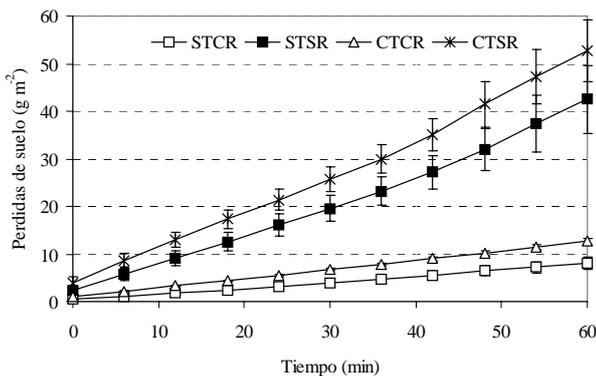


Fig. 4. Evolución de la pérdida del suelo (STCR: sin tráfico, con residuos; STSR: sin tráfico, sin residuos; CTCR: con tráfico, con residuos; CTSR: con tráfico, sin residuos). (± error estándar)

4.- Conclusiones

Los resultados iniciales del estudio del impacto de la compactación sobre la erosión del suelo en un sistema de lomos permanente indican que el tráfico controlado puede ser una alternativa para atenuar la pérdida de suelo y mejorar la infiltración. Sin embargo para obtener el máximo de beneficios es necesario el mantenimiento de una cobertura de residuos. Futuros trabajos son necesarios para caracterizar distintos aspectos de este sistema.

Agradecimientos. Los autores agradecen a M. Redondo y M. Salmoral el apoyo en el trabajo de campo. TAS agradece a la Universidad de Mato Grosso do Sul y al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Brasil el facilitar su estancia en el Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC). HB disfruta de una beca AEI. Este trabajo se ha realizado con fondos del proyecto CICYT AGL2005-05767.

Bibliografía

- Alves Sobrinho T., Gómez-Macpherson H. y Gómez J.A. 2007. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. *Soil Use Manag.* (enviado).
- Basher L.R. y Ross C.W. 2001. Role of wheel track in runoff generation and erosion under vegetable production on a clay loam soil at Pukekohe, New Zealand. *Soil Till. Res.* 62, 117-130.
- Baumhardt, R.L. y Lascano, R.J. 1996. Rain infiltration as affected by wheat residue amount and distribution in ridge tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1908-1913.
- Benjamin J.G., Blaylock A.D., Brown H.J. y Cruse R.M. 1999. Ridge tillage effects on simulated water and heat transport. *Soil Till. Res.* 18, 167-180.
- Bradford J.M. 1986. Penetrability. En: *Methods in soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*, 2nd edn. Ed. A. Klute., ASA Monog no. 9, SSSA & ASA Madison pp 463-478.
- Bradford J.M. y Huang C.H. 1994. Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Till. Res.* 31: 353-361
- Blevins R.L. y Frye W.W. 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management, *Adv. Agron.* 51: 33-78.
- Frasier G.W., Hart R.H. y Schuman G.E. 1995. Rainfall simulation to evaluate infiltration/runoff characteristics of a shortgrass prairie. *J. Soil Water Conserv.* 50, 460-463.
- Gilley J.E. 1995. Tillage effects on infiltration, surface storage, and overland flow. En: *Farming for a Better Environment*. SWCS Ankeny, pp. 46-47.
- Gómez J.A., Giráldez J.V., Pastor M. y Fereres E. 1999. Effects of tillage methods on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. *Soil Till. Res.* 52, 167-175.
- Govaerts B., Sayre K.D., Lichter K., Dendooven L. y Deckers J., 2007. Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain fed maize/wheat systems. *Pl. Soil.* 291, 39-54.
- Holland J.M. 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: a review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 103, 1-25.
- Jat M.L., Sharma S.K., Rai H.K., Srivastava A. y Gupta R.K. 2006. Effect of tillage on performance of winter maize in Northern India. En: *Maize Association of Australia 6th Triennial Conference*, Griffith NSW, Australia, February 21-23, 2006.
- Kozak J.A., Ahuja L.R., Green T.R. y Ma L. 2007. Modelling crop canopy and residue rainfall interception effects on soil hydrological components for semi-arid agriculture. *Hydrol. Proc.* 21, 229-241
- Li Y.X., Tullberg J.N. y Freebairn D.M. 2001. Traffic and residue cover effects on infiltration. *Aust. J. Soil Res.* 39, 239-247.
- Limón-Ortega A., Sayre K.D. y Francis C.A. 2000. Wheat and Maize Yields in Response to Straw Management and Nitrogen under a Bed Planting System. *Agron. J.* 92:295-302.
- Mohanty S. y Singh R. 1996. Determination of soil hydrologic properties under simulated rainfall conditions. *Agric. Water Manag.* 29, 267-281.
- Ozpinar S. y Isik A. 2004. Effects of tillage, ridging and row spacing on seedling emergence and yield of cotton. *Soil Till. Res.* 75:19-26.
- Raper R.L. 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramech.* 42, 259-280.
- Ruan H.X., Ahuja L.R., Green T.R. y Benjamin J.G. 2001. Residue cover and surface-sealing effects on infiltration: numerical simulations for field applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 853-861.
- Sánchez-Domínguez, M.A. 2004. *Efecto de la cubierta vegetal sobre la escorrentía, pérdida de suelo y fertilidad en la finca La Parrilla, Fuente Palmera (Córdoba)*. TPFC, Dpto. Ciencias y Recursos Naturales, Universidad de Córdoba.
- Singh B., Chanasyk D.S., McGill W.B. y Nybork M.P.K. 1994. Residue and tillage management effects on soil properties of a typical cryoboroll under continuous barley. *Soil Till. Res.* 32:117-133.
- Smolikowski B., Puig H. y Roose E. 2001. Influence of soil protection techniques on runoff, erosion and plant production on semi-arid hillsides of Cabo Verde. *Agric. Ecosyst. Environ.* 87, 67-80.
- Stenitzer E. y Murer E. 2003. Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model. *Soil Till. Res.* 73, 43-56.

- Taylor H.M., Roberson G.M. y Parker Jr J.J. 1966. Soil strength – root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102, 18–22.
- Unger, P.W. 1996. Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. *Soil Till. Res.* 37, 67-75.
- Wilhelm W.W., Johnson J.M. F., Hatfield J.L., Voorhees W.B. y Linden D.R. 2004. Crop and Soil Productivity Response to Corn Residue Removal: A Literature Review. *Agron. J.* 96, 1–17.

