

EFFECTO DEL SISTEMA RADICAL DE CUATRO CULTIVOS EN LA EROSIÓN DEL SUELO

Effect of the Root System of Four Crops on Soil Erosion

José de Jesús Huerta Olague¹, José Donald Ríos Berber², José Luís Oropeza Mota²,
Mario Roberto Martínez Menes², Rubén Darío Guevara Gutiérrez^{1‡},
Carlos Ramírez Ayala² y Juan Velázquez Mendoza²

RESUMEN

La pérdida de suelo por el impacto de las gotas de lluvia asociada a los cultivos agrícolas, se reduce por el efecto combinado del sistema raíces-cobertura vegetal. En el presente estudio se evaluó de julio a septiembre de 2006, el efecto del sistema radical de cuatro cultivos, tres de escarda (*Zea mays* L., *Phaseolus vulgaris* L. y *Cucurbita pepo* L.) y uno tupido (*Avena sativa* L.), en la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial. Se establecieron 16 lotes de escurrimiento de 1 m² en el campo experimental Lomas de San Juan, de la Universidad Autónoma de Chapingo, en Chapingo, Estado de México, en un suelo Entisol migajón-arenoso de 40 cm de profundidad, con una pendiente de 2%. La densidad de siembra fue en maíz y frijol de 10 matas m⁻² (dos plantas por mata), en calabacita 4 plantas m⁻² y en avena 1964 tallos m⁻². Se midió la densidad longitudinal de raíces mediante la relación longitud radical y volumen de suelo, las mediciones se realizaron a los 15, 30, 50 y 65 días de desarrollo de las plantas. Después de cada evento de simulación de lluvia se cuantificó el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo. Los resultados mostraron relaciones negativas entre la densidad longitudinal de raíces (DLR) y la pérdida de suelo. No así entre la DLR y el escurrimiento superficial. Se concluye que el sistema radical de los cultivos considerados tiene mayor efecto sobre la reducción de la pérdida de suelo que sobre el escurrimiento superficial. Pero no se detectaron resultados significativamente

disímiles entre los sistemas radicales de los diferentes cultivos.

Palabras clave: Pérdida de suelo, escurrimiento superficial.

SUMMARY

Soil loss resulting from the impact of the rain drops is reduced by the combined effect of root systems and plant cover and is associated with crop cultivation. With this in mind, the present study was conducted from July to September, 2006, to evaluate the effect of the root system of four crops, three row crops (*Zea mays* L., *Phaseolus vulgaris* L. y *Cucurbita pepo* L.) and a broadcast crop (*Avena sativa* L.), on soil loss and surface runoff. Sixteen 1 m² runoff plots were established on a 40 cm deep sandy-loam Entisol with a 2% slope. The sowing rate for maize and beans was 10 hills m² (two plants per hill), 4 plants m² for squash, and 1964 stems m² for oats. The measurements were conducted after 15, 30, 50, 65 days of crop development. The root length density (RLD) was obtained as a ratio between root length and soil volume. After each rainfall simulation event, runoff and soil loss were quantified. The results show negative relationships between the RLD and soil loss, but not between RLD and runoff. It is concluded that the root system of the crops considered has greater effect on the reduction of soil loss than on runoff. There are no results, however, regarding the differences among the root systems of the different crops.

Index word: soil loss, surface runoff.

INTRODUCCIÓN

En el mundo hay alrededor de 305 millones de hectáreas con un alto grado de degradación, debido principalmente a las altas tasas de deforestación anual

¹ Centro Universitario de la Costa Sur. Universidad de Guadalajara. Avenida Independencia Nacional 151. 48900 Autlán de Navarro, Jalisco, México.

[‡] Autor responsable (rguevara@cucsur.udg.mx)

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

(más de 12.3 millones ha) (Faminow, 1998). En México, la erosión hídrica es la que más afecta los suelos, existen más de 50 millones de ha con alta degradación, acelerada por el cambio de uso del suelo, algunos de los manejos que más afectan son: la agricultura de ladera y la deforestación (aproximadamente más de 600 000 ha año⁻¹) (Lal, 2000).

Los efectos benéficos al incrementar la cobertura vegetal sobre las pérdidas de suelo está ampliamente documentado (Hartwig y Ammon, 2002; Gómez *et al.*, 2004), ésta protege al suelo contra la erosión producida por el impacto de las gotas de lluvia contra el suelo, mientras que las raíces incrementan su resistencia contra la capacidad de remoción y transporte del flujo superficial (De Baets *et al.*, 2006). Otros beneficios de las raíces son el incremento del contenido de materia orgánica, el mejoramiento de la estructura del suelo, la estabilidad de agregados, el aumento en la infiltración y la capacidad de retención del agua en el suelo; así mismo, la reducción de la cantidad y velocidad del escurrimiento que se refleja en una menor pérdida del suelo por erosión hídrica (Durán-Zuazo *et al.*, 2004; Fiener y Auerswald, 2005). Según Gyssels y Poesen (2003), afirman que la reducción en la pérdida del suelo es resultado del efecto combinado del sistema raíces-biomasa aérea.

En áreas agrícolas, sobre todo en aquellas con fuertes pendientes, el sistema radical de los cultivos propicia mayor estabilidad en el suelo, al descomponerse crea cavidades tubulares que mejoran el movimiento del aire y agua, incrementa la rugosidad hidráulica del flujo superficial, lo que disminuye la velocidad del flujo y favorece la infiltración, reduciendo las pérdidas de suelo (McIvor *et al.*, 1995; Carroll *et al.*, 1997; Loch, 2000). Existen diversos estudios sobre la función de las raíces, sin embargo, su función para reducir la erosión no se ha considerado plenamente (Gyssels *et al.*, 2005). Las raíces tienen un efecto mecánico sobre el suelo aumentando su resistencia a ser erosionado; al penetrarlo lo refuerzan y aumentan así su resistencia al esfuerzo cortante. Las raíces sujetan al suelo y aumentan la rugosidad superficial de éste, reduciendo la susceptibilidad a la erosión en canales y cárcavas. Debido a este incremento en la rugosidad y en la permeabilidad, se incrementa la capacidad de infiltración (De Baets *et al.*, 2006).

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del sistema radical de los cultivos de escarda maíz, frijol, calabacita y de avena como cultivo tupido, en

la reducción de la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Campo Experimental Lomas de San Juan, de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, Estado de México, a una altitud de 2300 m a 19° 29' 52.21" N y 98° 51' 08.95" O. El suelo es Lithic Ustorthent, de acuerdo a la clasificación Soil Taxonomy (2006), con una profundidad de 25 a 40 cm, textura migajón arenoso, pH de 7.25 y pendiente natural de 2%. Las condiciones climáticas fueron precipitación media anual de 596.4 mm, abundantes en verano y temperatura media anual de 18 °C con oscilación térmica de ± 3 °C.

Se consideró la evaluación de sistemas radicales de cuatro cultivos (sin diseño experimental): maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), calabacita (*Cucurbita pepo* L.) y avena (*Avena sativa*). La unidad experimental para cada tratamiento fue una parcela de escurrimiento de 4 m², subdividida en cuatro subparcelas de 1 m² para cada cultivo, modificándose la pendiente natural a 10%.

La densidad de siembra fue de 10 matas m⁻² (dos plantas por mata) para maíz y frijol, 4 plantas m⁻² para calabacita y 1964 tallos m⁻² para avena. Para evaluar el impacto del sistema radical en el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo, se cortó la totalidad de la cobertura vegetal (a nivel del suelo) de las subparcelas experimentales con tijeras el último día de las fechas consideradas (15, 30, 50 y 65 d de desarrollo de la planta), aplicándose lluvia simulada al suelo desnudo con las raíces del cultivo de referencia. Para relacionar el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo con el sistema radical, se utilizó el parámetro densidad longitudinal de raíces (DLR) o longitud total de raíces por unidad de volumen, cuantificado en los primeros 10 cm de profundidad del suelo en los días establecidos de desarrollo del cultivo. La intensidad de lluvia simulada fue de 80 mm h⁻¹ con un simulador tipo Purdue (Alcalá-de Jesús *et al.*, 1998), se midió el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo. En total se realizaron 16 pruebas de simulación de lluvia (cuatro para cada tratamiento). El tiempo de cada simulación fue de 1 hora.

Para obtener el volumen escurrido y la producción de sedimentos, las subparcelas se delimitaron con láminas de fierro, enterradas 5 cm y sobresaliendo 5 cm. En la parte baja de la subparcela se adaptó un colector

metálico para recoger el escurrimiento superficial en cubetas de 8 litros de capacidad, a intervalos de tiempo de 5 min durante una hora, cada 15 días durante 65 días.

La cuantificación del escurrimiento superficial en la subparcela se obtuvo con la Ecuación 1:

$$Es = \frac{10 \left(\frac{Psh - Pss}{\rho_a} \right)}{A_{sub}} \quad (1)$$

donde: Es = escurrimiento superficial en mm, Psh = volumen escurrido y el sedimento colectados en g, Pss = peso seco del sedimento en g, ρ_a = densidad del agua $1g\ cm^{-3}$, A_{sub} = área de la subparcela cm^2 , 10 = factor de conversión a mm.

La pérdida de suelo en cada subparcela Psh y Pss se expreso en $kg\ m^{-2}$ ya que cada subparcela fue de $1\ m^2$.

Para cuantificar la densidad longitudinal de raíces (DLR) se midió la longitud de raíces en los primeros 10 cm de profundidad del suelo, dado que en esta capa superficial es donde se da principalmente la erosión. Para ello se diseñaron cubetas muestreadoras con un diámetro interno de 29 y 35 cm de altura, y se enterraron en el suelo. Estas cubetas se dividieron en cuatro capas: tres de 10 cm y una de 5 cm, cada capa se delimitó con una malla de acero con cuadrículas de 1 cm por lado (Figura 1).

La obtención y cuantificación de las raíces fue en las siguientes etapas: 1) extracción de raíces del suelo de las cubetas previamente enterradas; 2) lavado de las raíces de acuerdo al Método de Böhm (1979); 3) medición de la longitud de raíces (LR) por el método

de intercepción lineal modificado por Tennant (1975) expresada en km; 4) la LR se multiplicó por el número de matas de las plantas existentes en el área de lote ($1\ m^2$) muestreado por la cubeta, para el maíz y frijol fueron 10 matas y para la calabacita 4. En el caso de la avena, la LR fue multiplicada por el número de tallos contabilizados en la subparcela que fueron en promedio 1964; 5) a partir de la LR se obtuvo la DLR utilizando la siguiente Ecuación 2 (Teo *et al.*, 1995):

$$DLR = \frac{LR}{V} \quad (2)$$

donde: LR = longitud de raíces, V = volumen de suelo ocupado por las raíces en los primeros 10 cm de profundidad para el área de cada lote ($1\ m^2$), DLR = densidad longitudinal de raíces está expresado en $km\ m^{-3}$ (Teo *et al.*, 1995).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo de las Raíces

En los primeros 15 días de desarrollo, el incremento de la densidad longitudinal de raíces (DLR) en los cultivos de escarda (maíz, frijol y calabacita) fue en promedio $0.96\ km\ m^{-3}$, dando una tasa de crecimiento diaria de $0.06\ km\ m^{-3}$. El cultivo tupido (avena) tuvo una tasa de crecimiento diaria en este periodo de $0.44\ km\ m^{-3}$, obteniendo una DLR de $6.6\ km\ m^{-3}$. A partir de ese periodo los cultivos de escarda y el cultivo tupido mantuvieron una tendencia positiva en su tasa de crecimiento. Los cultivos de escarda crecieron a una tasa diaria promedio de $0.09\ km\ m^{-3}$; de los 15 a los 30 días de desarrollo, a una tasa diaria de $0.11\ km\ m^{-3}$, de los 30 a los 50 días y en el último periodo alcanzaron la mayor tasa de crecimiento diaria de $0.87\ km\ m^{-3}$. El cultivo tupido tuvo la mayor tasa de crecimiento diaria de $4.40\ km\ m^{-3}$ en el periodo de 15 a 30 días; de $1.33\ km\ m^{-3}$ de los 30 a los 50 días y de $2.47\ km\ m^{-3}$ en el último periodo analizado (Cuadro 1). Los valores de DLR encontrados en los cultivos bajo estudio están dentro de los intervalos reportados por De Willigen y Van Noordwijk, citados por De Baets *et al.* (2006) y con Mamo y Bubenzer (2001b), quienes reportaron para cultivos agrícolas una DLR que varía de 0 a $200\ km\ m^{-3}$ y en gramíneas $>250\ km\ m^{-3}$, respectivamente. Esta información contrasta con la reportada por De Baets

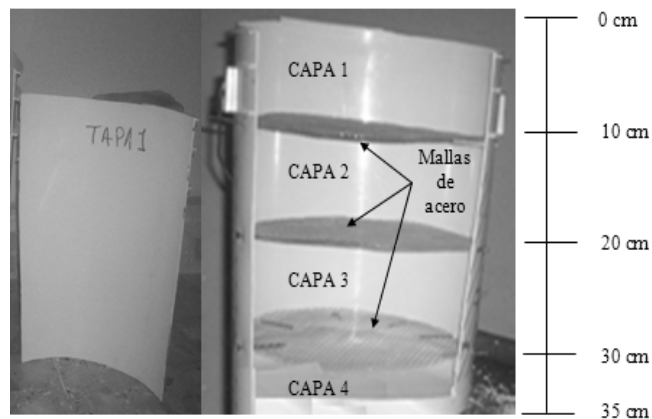


Figura 1. Estructura de la cubeta muestreadora de raíces.

Cuadro 1. Evolución de la densidad longitudinal de raíces (DLR) en la capa 0-10 cm, en diferentes etapas de desarrollo.

Días de desarrollo	Densidad longitudinal de raíces en los cultivos				Tupido Avena
	De escarda			Promedio	
	Maíz	Frijol	Calabacita		
	----- km m ⁻³ -----				
15	2.4	0.3	0.2	0.96	6.6
30	4.6	1.6	0.8	2.3	72.7
50	5.1	4.3	4.4	4.6	99.2
65	37.5	8.6	6.8	17.65	136.2

et al. (2006), quienes en pastos en 15 cm de suelo encontraron una DLR entre 0 y 6,200 km m⁻³, lo que se explica por una alta densidad de siembra (10 000 semillas por metro cuadrado).

Escurrimiento Superficial en las Sub-parcelas sin Cobertura (raíces)

Los datos de escurrimiento superficial obtenidos en las subparcelas sin cobertura (con raíces) y la DLR de cada uno de los cultivos en las diferentes etapas de medición se muestran en el Cuadro 2.

El escurrimiento superficial en las sub-parcelas sin cobertura (con raíces) del cultivo de maíz, en las cuatro fechas de medición tuvo una ligera reducción ya que el coeficiente de escurrimiento fue de 0.56 a los 15 días y de 0.47 a los 65 días de desarrollo, situación que podría explicarse porque el sistema radical del maíz creció en la última etapa aumentando la capacidad de infiltración del agua en el suelo y de esta manera se redujo ligeramente el escurrimiento superficial.

Cuadro 2. Escurrimiento superficial y densidad longitudinal de raíces (DLR) en sub-parcelas sin cobertura, en diferentes etapas de desarrollo.

Cultivo		Días de desarrollo del cultivo			
		15	30	50	65
Maíz	Escurrimiento (mm)	44.7	47.7	34.3	37.4
	DLR (km m ⁻³)	2.4	4.6	5.1	37.5
Frijol	Escurrimiento (mm)	37.7	42.6	36.8	42.5
	DLR (km m ⁻³)	0.3	1.6	4.3	8.6
Calabacita	Escurrimiento (mm)	44.0	41.9	35.1	40.6
	DLR (km m ⁻³)	0.2	0.8	4.4	6.8
Avena	Escurrimiento (mm)	44.9	42.5	42.9	43.8
	DLR (km m ⁻³)	6.6	72.7	99.2	136.2

En las sub-parcelas de frijol y calabacita el escurrimiento superficial fue similar en las cuatro fechas de medición, con un coeficiente promedio de escurrimiento de 0.50. Esto indica que a pesar de que la DLR estuvo creciendo en el tiempo de desarrollo del cultivo, no afectó el escurrimiento superficial y los cambios a la baja y alza del escurrimiento superficial medido en las sub-parcelas solo podrían explicarse por la metodología de investigación más que por el efecto de las raíces para reducir el escurrimiento superficial en estos cultivos de escarda. Por lo que las raíces, aún a altas DLR, no son un factor que determine una reducción sobre el escurrimiento superficial como lo sugieren Bui y Box (1993).

En las sub-parcelas de avena se tuvieron coeficientes de escurrimiento muy similares durante todo el periodo experimental, con un promedio de 0.54, lo que muestra claramente el poco efecto del crecimiento de las raíces sobre el escurrimiento superficial (Cuadro 2). Este comportamiento se atribuye a que las raíces en crecimiento ocupan el espacio que estuvo ocupado por el espacio poroso y partículas del suelo. Dado que el diámetro de raíz es usualmente más grande que el diámetro de poros, las partículas de suelo son empujadas hacia un lado y la densidad aparente del suelo aumenta cerca de donde crece la raíz (Glinski y Lipiec, 1990) provocando que la cantidad de escurrimiento superficial se mantenga igual o tienda a aumentar.

Pérdida de Suelo en Sub-parcelas sin Cobertura (con raíces)

El desarrollo radical de los diferentes cultivos, en toda el perfil del suelo muestreado (0-35 cm), durante

el desarrollo de los mismos (hasta 65 días) muestra un crecimiento hacia las capas inferiores, en los primeros 10 cm se concentra el 44% del sistema radical en promedio para todos los cultivos.

Para comparar el impacto del sistema radical de todas las capas (DLR total) con la DLR de la capa de 0-10 cm de suelo, se correlacionó la DLR total con la pérdida de suelo encontrándose relaciones exponenciales decrecientes, todas similares a las encontradas en la capa de 0-10 cm (Figuras 2, 3, 4 y 5b), lo que confirma que las raíces de dicha capa, la cual esta expuesta a los procesos de remoción y transporte causados por los agentes erosivos (precipitación y escurrimiento), reducen la erosión del suelo en mayor proporción en comparación a la protección que da todo el sistema radical de las plantas al suelo.

En el análisis de la primera capa de raíces (0-10 cm) para el caso del maíz (Figura 2a), puede verse una relación proporcional negativa entre la DLR con el escurrimiento superficial y con la pérdida de suelo; esto es, a mayor densidad longitudinal de raíces del cultivo (DLR), se reduce el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo. Lo anterior, indica que no sólo la cobertura vegetal protege al suelo contra la erosión, sino que también el sistema radical retiene el suelo en contra de la capacidad de transporte del flujo superficial.

Estos resultados coinciden con los de Mamo y Bubenzer (2001b) quienes mencionan que la pérdida de suelo en maíz se reduce en forma exponencial a medida que existe un incremento en la densidad longitudinal de raíces (DLR). Una relación similar fue observada en estudios de laboratorio realizados con pasto Ryegrass (*Lolium perenne*) (Mamo y Bubenzer, 2001a). Por su

parte Ghidey y Alberts (1997), también encontraron una relación exponencial entre la pérdida de suelo y dos parámetros de las raíces (masa y longitud de raíces muertas).

El modelo exponencial ajustó los datos de DLR y pérdida de suelo con un buen coeficiente de determinación ($R^2 = 0.73$), que indica que las raíces del maíz por sí solas ayudan a reducir el proceso erosivo del suelo (Figura 2b).

En el cultivo de frijol los resultados obtenidos no manifiestan una relación clara entre la DLR, el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo (Figura 3a). En la primera etapa de medición, con una escasa DLR (0.3 km m^{-3}) hubo un escurrimiento superficial y pérdida de suelo similar a los encontrados a los 50 días, cuando se presentó una mayor DLR (8.6 km m^{-3}). Lo anterior indica que el sistema radicular del frijol no tuvo efecto en la retención del suelo ya que no tuvo impacto en la reducción del escurrimiento superficial, que es uno de los factores causales de la pérdida de suelo.

El análisis de regresión exponencial entre el DLR y la pérdida de suelo muestra un bajo ajuste ($R^2 = 0.07$) lo que indica que los cambios en el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo medidos en forma multitemporal, responden al método experimental más que al efecto del sistema radical para reducir estos efectos (Figura 3b).

En las sub-parcelas con raíces de calabacita (Figura 4a), se observa que el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo presentaron una relación proporcional negativa con tendencia a disminuir conforme aumentaba la DLR, aunque a los 65 días de desarrollo, con la mayor DLR (6.8 km m^{-3}), se encontró

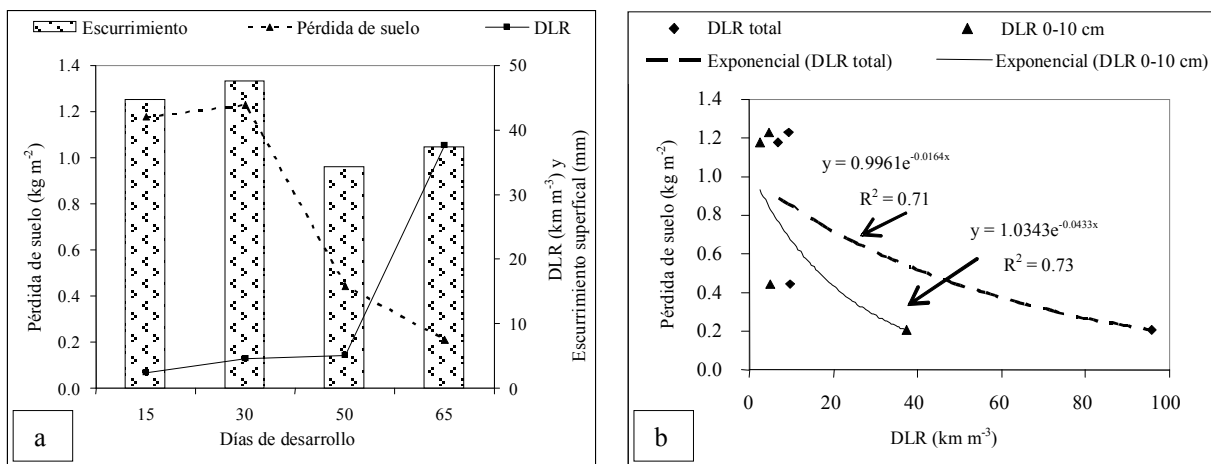


Figura 2. Pérdida de suelo y densidad longitudinal de raíces (DLR) en maíz.

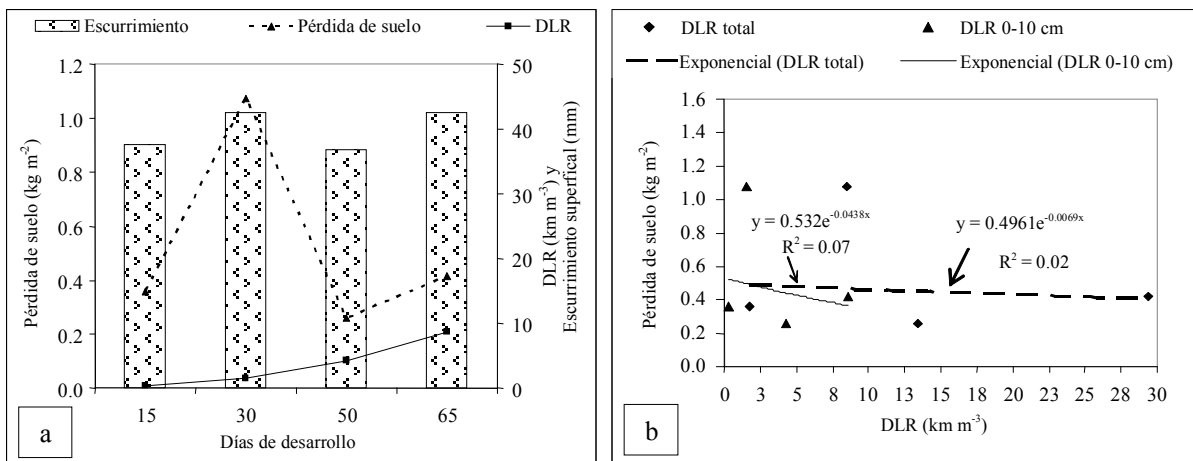


Figura 3. Pérdida de suelo y densidad longitudinal de raíces (DLR) en frijol.

que el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo aumentaron (de 35.1 mm a 40.6 mm y de 0.19 kg m⁻² a 0.62 kg m⁻², de los 50 a los 65 días de desarrollo respectivamente), con un R² bajo (0.26), el análisis de regresión exponencial muestra que la pérdida de suelo disminuye conforme aumenta la DLR (Figura 4b).

En el cultivo de la avena no se presentó un cambio significativo en el escurrimiento superficial conforme transcurrieron los días de desarrollo, pero sí aumentó la DLR (Figura 5a). En este cultivo se apreció una tendencia a disminuir la pérdida de suelo conforme aumenta la DLR, presentando una relación exponencial negativa con un coeficiente de determinación de 0.34 (Figura 5b).

En el análisis de la DLR y la pérdida de suelo de cada cultivo, se observó que las raíces tienen un efecto menor en la reducción de pérdida de suelo que

la cobertura vegetal. De acuerdo con Gyssels *et al.* (2006), bajo condiciones de campo, el efecto de las raíces sobre la pérdida de suelo puede ser menor al predicho, basado en las ecuaciones que se han generado a partir de experimentos en laboratorio donde se trabaja bajo condiciones controladas. Sin embargo, otros investigadores (Mamo y Bubenzer, 2001b; Mamo y Bubenzer, 2001a; De Baets *et al.*, 2006) encontraron que tanto en condiciones de campo como de laboratorio la pérdida de suelo se reduce con el aumento de la DLR.

CONCLUSIONES

- Los resultados de este estudio, permiten identificar diferentes respuestas de pérdida de suelo, en subparcelas sin cobertura (con raíces) a causa del escurrimiento superficial en los cultivos de maíz, frijol,

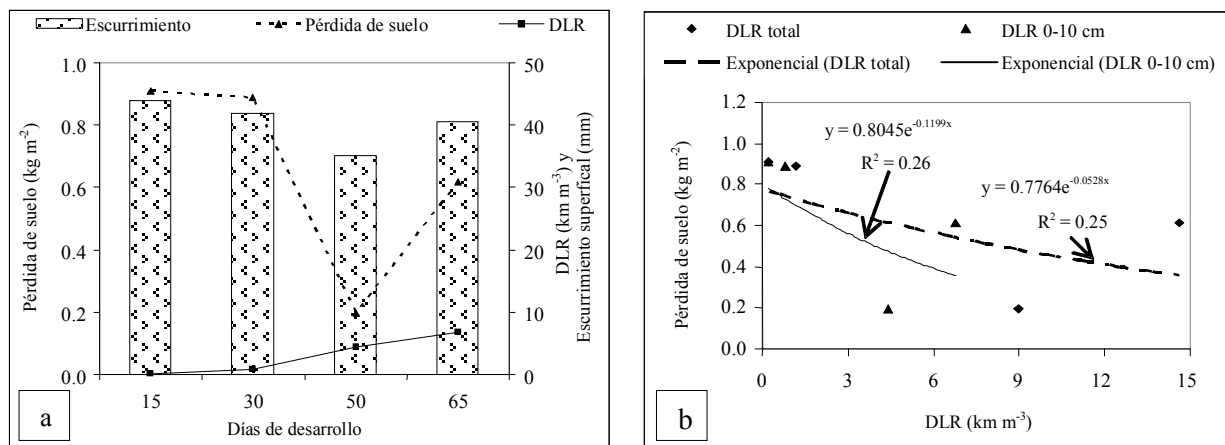


Figura 4. Pérdida de suelo y densidad longitudinal de raíces (DLR) en calabacita.

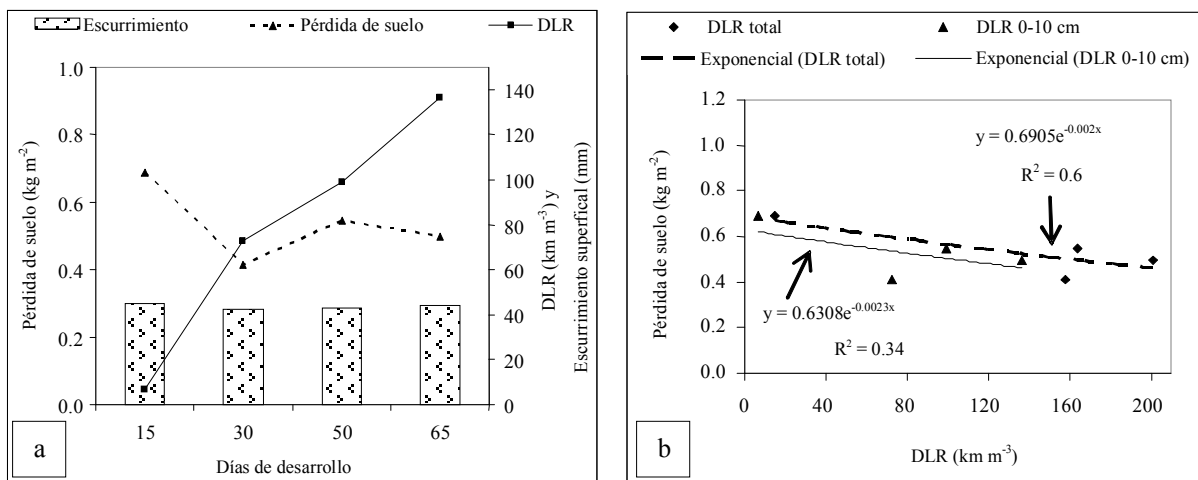


Figura 5. Pérdida de suelo y densidad longitudinal de raíces (DLR) en avena

calabacita y avena. Encontrándose en todas las subparcelas una relación exponencial negativa como efecto exclusivo de las raíces, estableciéndose que a mayor densidad longitudinal de raíces (DLR) menor pérdida de suelo.

- La mayor pérdida de suelo, en promedio, ocurrió en las subparcelas de maíz, no obstante que en éstas se mostró un ligero efecto al reducir el escurrimiento superficial, no así en el caso de los demás cultivos donde el desarrollo de las raíces no redujeron el escurrimiento superficial, pero sí la pérdida de suelo.

- Respecto al desarrollo de la DLR de cada cultivo, la eficiencia en la reducción de la pérdida de suelo de mayor a menor proporción fue: cultivo de avena, frijol, calabacita y maíz.

- Se recomienda el desarrollo de futuras investigaciones en función de la ocurrencia de los escurrimientos superficiales y la pérdida de suelo, considerando el impacto que tienen las raíces sobre la compactación del suelo y la estabilidad de los agregados; la respuesta de la cobertura vegetal y los sistemas de raíces con diferentes intensidades de lluvia simulada y natural, a fin de obtener modelos ajustados a la realidad, considerando la humedad antecedente. Finalmente promover técnicas productivo-conservacionistas entre los técnicos responsables y agricultores que establezcan cultivos de escarda.

LITERATURA CITADA

Alcalá-de Jesús, M., J. L. Oropeza-Mota y J. L. Tovar-Salinas. 1998. Producción de sedimentos en diferentes usos del suelo, en la cuenca del río los Sauces, Michoacán. *Agrociencia* 32: 225-231.

Böhm, W. 1979. *Methods of studying roots systems*. Springer-Verlag. Berlin.

Bui, E. N. and J. E. Box. 1993. Growing corn root effects on interrill soil erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1066-1070.

Carroll, C., M. Halpin, P. Burger, K. Bell, M. M. Sallaway, and D. F. Yule. 1997. The effect of crop type, crop rotation, and tillage practice on runoff and soil loss on a Vertisol in central Queensland. *Aust. J. Soil Res.* 35: 925-940.

De Baets, S., J. Poesen, G. Gyssels, and A. Knapen. 2006. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology* 76: 54-67.

Durán-Zuazo, V. H., J. R. Francia-Martínez, and A. Martínez-Raya. 2004. Impact of vegetative cover on runoff and soil erosion at hillslope scale in Lanjaron, Spain. *Environmentalist* 24: 39-48.

Faminow, M. D. 1998. *Cattle, deforestation, and development in the Amazon: An economic, agronomic and environmental perspective*. CAB International. Wallingford, CT, USA.

Fiener, P. and K. Auerswald. 2005. Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways. *J. Hidrol.* 301: 198-215.

Ghideo, F. and E. E. Alberts. 1997. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability. *Trans. ASAE* 40: 129-135.

Glinski, J. and J. Lipiec. 1990. *Soil physical conditions and plants roots*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.

Gómez, J. A., P. Romero, J. V. Giráldez, and E. Fereres. 2004. Experimental assessment of runoff and soil erosion in an olive grove on a Vertic soil in southern Spain as affected by soil management. *Soil Use Manage.* 20: 426-431.

Gyssels, G., J. Poesen, E. Bochet, and Y. Li. 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Prog. Physical Geogr.* 29: 189-217.

Gyssels, G., J. Poesen, G. Liu, W. van Dessel, A. Knapen, and S. de Baets. 2006. Effects of cereal roots on detachment rates of single- and double-drilled topsoils during concentrated flow. *Eur. J. Soil Sci.* 57: 381-391.

Gyssels, G. and J. Poesen. 2003. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surf. Processes Landforms* 28: 371-384.

- Hartwig, N. L. and H. U. Ammon. 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* 50: 688-699.
- Lal, R. 2000. *Integrated watershed management in the global ecosystem*. CRC Press. New York, NY, USA.
- Loch, R. J. 2000. Effects of vegetation cover on runoff erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland. *Aust. J. Soil Res.* 38: 299-312.
- Mamo, M. and G. D. Bubenzer. 2001a. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots. Part I: laboratory study. *Trans. ASAE* 44: 1167-1174.
- Mamo, M. and G. D. Bubenzer. 2001b. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots. Part II: field study. *Trans. ASAE* 44: 1175-1181.
- McIvor, J. G., J. Williams, and C. J. Gardener. 1995. Pasture management influences runoff and soil movement in the semi-arid tropics. *Aust. J. Exp. Agric.* 35: 55-65.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.* 63: 995-1101.
- Teo, Y. H., C. A. Beyrouy, R. J. Norman, and E. E. Gbur. 1995. Nutrient uptake relationship to root characteristics of rice. *Plant Soil* 171: 297-302.