

## Efecto de la cobertura de rastrojos y las propiedades edáficas superficiales sobre la erosión hídrica en monocultivo de soja

G. Agustín Sanzano\*, Miguel Morandini\*, Carlos F. Hernández\*, Hugo C. Rojas Quinteros\*, Francisco A. Sosa\*, Adrián J. Hasán Jalil\*, Guillermo S. Fadda\*\* y Mario R. Devani\*\*\*

### RESUMEN

En un ensayo de manejo de suelos conducido desde hace 23 años en la localidad de Monte Redondo, Tucumán, se evaluaron los coeficientes de escurrimiento e infiltración, las pérdidas de suelo, de carbono orgánico total (COT) y de fósforo extractable (Pe) utilizando un simulador de lluvias. Se evaluaron también las propiedades edáficas superficiales antes de la lluvia, tales como COT, la densidad aparente (DA), la estabilidad de agregados, la conductividad hidráulica (K) y la infiltración básica (Ib). Los tratamientos fueron: siembra directa con 0%, 40% y 80% de cobertura de rastrojos (SD<sub>0</sub>, SD<sub>1</sub>, y SD<sub>2</sub>, respectivamente); laboreo vertical con cincel previo a la siembra (LV) y monte natural como testigo (MN). El COT, la estabilidad de agregados y la Ib decrecieron significativamente desde MN a LV. En cambio, la DA y la K no fueron diferentes entre SD<sub>0</sub> y LV, pero sí con MN. Los coeficientes de escurrimiento (CE) fueron significativamente mayores en LV que en siembra directa, pero en esta no hubo diferencias entre los distintos grados de cobertura. En cambio, las pérdidas de suelo en SD<sub>1</sub> y SD<sub>2</sub> fueron menores que en SD<sub>0</sub> un 48% y 62%, respectivamente. La estabilidad de agregados fue la propiedad edáfica superficial que mejor explicó las pérdidas de suelo por escurrimiento en los suelos sin cobertura ( $R^2=0,92$ ). La infiltración acumulada después de una hora de lluvia fue 24,2 mm para SD<sub>0</sub> y 15,3 mm para LV, mientras que para MN fue 34,7 mm. En LV, el COT y Pe en el sedimento erodado fueron casi el doble que en SD<sub>0</sub>, mientras que SD<sub>1</sub> y SD<sub>2</sub> mostraron pérdidas hasta tres veces menores que SD<sub>0</sub>.

**Palabras clave:** escurrimiento, erosión, cobertura, estabilidad de agregados.

### ABSTRACT

#### Effect of crop residue and superficial soil properties on hidric erosion in soybean monoculture

In a soil management trial that conducted for 23 years in Monte Redondo, Tucumán, runoff and infiltration coefficients, soil losses, total organic carbon and available phosphorus were evaluated using a rainfall simulator. Before the rainfall simulations, some surface soil properties, such as organic carbon, bulk density, aggregate stability, hydraulic conductivity and basic infiltration were also evaluated. The treatments were: no-tillage cropping systems with 0%, 40% and 80% crop residues (SD<sub>0</sub>, SD<sub>1</sub> and SD<sub>2</sub> respectively); chisel plowing (LV) before sowing and natural vegetation (MN) as the blank treatment. Total organic carbon, aggregate stability and basic infiltration decreased significantly from MN to LV. Even though there were no differences in bulk density and hydraulic conductivity between LV and SD<sub>0</sub>, they differed significantly when compared with MN. Runoff coefficients were significantly higher in LV when compared with no-tillage systems; however, there were no differences between crop residue rates in the no-tillage treatments. Soil losses in SD<sub>1</sub> and SD<sub>2</sub> were 48% and 62% lower than in SD<sub>0</sub>. Aggregate stability was the surface soil property that had the highest relationship with soil losses in the treatments without crop residue ( $R^2=0.92$ ). Cumulative infiltration after an hour of rain was 24.2 mm in the SD<sub>0</sub> treatment, 15.3 mm in LV and 34.7 mm in MN. In the LV treatment total organic carbon and available phosphorus concentrations were almost twice higher than in SD<sub>0</sub>, while SD<sub>1</sub> and SD<sub>2</sub> showed soil losses even three times lower than SD<sub>0</sub>.

**Key words:** runoff, erosion, crop residues, aggregate stability.

\*Sección Suelos y Nutrición Vegetal, EEAOC. [asanzano@eeaoc.org.ar](mailto:asanzano@eeaoc.org.ar).

\*\*Consultor Externo, EEAOC.

\*\*\*Sección Granos, EEAOC.

## INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es una de las principales causas de degradación del suelo en todo el mundo. El término erosión hídrica comprende el desprendimiento de las partículas de la masa de suelo por impacto de las gotas de lluvia y el transporte por salpicadura y por flujo superficial (Meyer y Harmon, 1984). Donde las pendientes no son fuertes, como en el área en la que se realiza este estudio, estos procesos están dominados por el impacto de las gotas de lluvia y por un delgado flujo superficial, situación que corresponde a lo que se denomina erosión entresurcos (Nearing *et al.*, 1994).

Los suelos zonales de la Llanura Chacopampeana están desarrollados sobre materiales de origen eólico y se clasifican como Haplustoles típicos y énticos (Zuccardi y Fadda, 1985). El comportamiento mecánico de estos suelos está determinado por la presencia dominante de la fracción limo fino (de 2 a 20 micrones) en su composición granulométrica. Figueroa y García (1982) señalaron una fuerte tendencia de los suelos del área a formar costras superficiales. Los suelos limosos tienden a ser muy erodables porque sus partículas son fácilmente desprendibles y transportables. A menudo, la erosión hídrica se asocia entonces con áreas de suelos loésicos de textura limosa (Wischmeier y Mannering, 1969).

Por otra parte, los sedimentos erodados están cargados de nutrientes (Sharpley, 1985), y el análisis de los mismos permite cuantificar el enriquecimiento en carbono orgánico, nitrógeno total y fósforo de los sedimentos en comparación con la matriz del suelo (Wan y El-Swaify, 1998). La tasa de enriquecimiento se define como la relación de la concentración de un componente determinado en el sedimento erodado y la concentración de ese mismo componente en la matriz del suelo (Sharpley, 1985).

La respuesta de un suelo a los procesos de erosión es compleja y está influenciada por propiedades del suelo tales como la textura, la estabilidad de agregados, el contenido de materia orgánica, los constituyentes químicos, la cobertura vegetal, etc. Algunas de esas propiedades pueden ser alteradas por las prácticas de manejo y/o los sistemas de producción, cuyos resultados están fuertemente condicionados por factores climáticos y edáficos. Consecuentemente, la susceptibilidad a la erosión de un suelo determinado puede cambiar en el tiempo (Lal y Elliott, 1994).

En la provincia de Tucumán, se destinan actualmente 280.000 hectáreas al cultivo de soja, en su mayor parte en áreas subhúmedas secas y semiáridas marginales. La fuerte expansión de la frontera agrícola que se produjo en los últimos 30 años aceleró los procesos de degradación física, química y biológica de los suelos de la región (Zuccardi *et al.*, 1988 y Sanzano *et al.*, 2005). Los productores de la región, buscando atenuar la disminución de rendimientos de los cultivos como consecuencia de la

pérdida de productividad de los suelos, cambiaron gradualmente los sistemas productivos, generalizándose primero el laboreo mínimo y más tarde la siembra directa. Este último sistema ocupa actualmente más del 95% de la superficie cultivada con granos en la provincia de Tucumán.

Para Marelli (1998), sólo la siembra directa que permita una cobertura de rastrojos de por lo menos el 60% puede ser considerada una efectiva práctica conservacionista. La cobertura vegetal disminuye la energía de impacto de la gota de lluvia, y reduce también el escurrimiento por retardo del tiempo de inicio del mismo (Alberts y Neibling, 1994). Cogo *et al.* (1984) compararon el efecto de la cobertura de soja en siembra directa vs. labranza convencional sobre las pérdidas de suelo utilizando un simulador de lluvias. Los autores concluyeron que en general, el residuo de cultivo fue más efectivo que la rugosidad superficial para reducir la erosión. Amado *et al.* (1989) evaluaron el efecto de la aplicación y el manejo de residuos de soja sobre las pérdidas de suelo, y encontraron que estas disminuyeron no sólo con el aumento del porcentaje de cobertura, sino también cuando este residuo estuvo uniformemente distribuido sobre la superficie.

En las regiones semiáridas, los grados de cobertura alcanzados suelen ser bastante menores que en las regiones húmedas. Aún cuando la cobertura de residuos dejada en superficie por la siembra directa se descompone más lentamente que en un sistema convencional (Corbella *et al.*, 2000), la tasa de descomposición del rastrojo de soja en la región de la Llanura Chacopampeana de Tucumán puede ser lo suficientemente elevada como para dejar el suelo con poca cobertura al momento de la siembra de la campaña siguiente. Esto se debe a la baja relación carbono/nitrogeno (C/N) de los residuos de soja y a su gran riqueza en compuestos solubles.

La hipótesis de trabajo fue que la siembra directa puede mejorar varias propiedades del suelo en comparación con sistemas que utilizan el laboreo, pero el grado de cobertura logrado con monocultivo de soja en la región no permite controlar eficazmente la erosión hídrica.

El objetivo del trabajo fue cuantificar las pérdidas de suelo, nutrientes y agua generadas con lluvia simulada, comparando dos sistemas de manejo: siembra directa con distintos grados de cobertura y labranza vertical. Un objetivo secundario fue evaluar los cambios producidos en las propiedades edáficas superficiales después de un largo período de tiempo con ambos sistemas de manejo de suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo es un Haplustol típico de textura franco limosa, ubicado en la subestación experimental de Monte Redondo, perteneciente a la Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Columbres", Tucumán, Argentina. El sitio de estudio fue seleccionado teniendo en cuenta tres

aspectos: a) el suelo es representativo de la región; b) los tratamientos de labranza con monocultivo de soja tienen 23 años de antigüedad, y c) las situaciones son representativas de distintos niveles de degradación. Las parcelas tienen un tamaño de 20 x 70 m en diseño de bloques al azar con tres repeticiones.

Los tratamientos fueron: siembra directa (SD) con 0%, 40% y 80% de cobertura de rastrojos ( $SD_0$ ,  $SD_1$ , y  $SD_2$  respectivamente); LV: laboreo vertical con cincel previo a la siembra y MN: monte natural, de vegetación xerófila, bastante degradado por la explotación forestal, que fue tomado como testigo. Se tomaron muestras no perturbadas de los 10 centímetros superficiales para evaluar las siguientes propiedades edáficas antes de la lluvia simulada: estabilidad estructural a través del cambio en el diámetro medio ponderado (CDMP), y por el método de la gota (IE); densidad aparente (cilindro) y conductividad hidráulica (K sat) (carga hidráulica constante). Un muestreo compuesto de 10 submuestras por parcela se utilizó para la determinación de carbono orgánico total (combustión) y fósforo extractable (Bray I). La infiltración básica (Ibas) se determinó con doble anillo infiltrómetro y ecuación de Kostiakov. Todas las variables edáficas superficiales se evaluaron sobre los tratamientos  $SD_0$ , LV y MN (suelos sin cobertura de rastrojos).

Se evaluaron pérdidas de suelo y coeficientes de escurrimiento usando un simulador de lluvias, con una intensidad de 50 mm h<sup>-1</sup> y una hora de duración sobre parcelas de 2500 cm<sup>2</sup>, con una pendiente de 0,7%. La intensidad de la lluvia se logró por variación de la carga hidráulica sobre los picos. El material erodado fue recolectado a intervalos de cinco minutos y secado en estufa hasta peso constante para determinar la cantidad de sedimentos transportada por el agua de escurrimiento. En el sedimento se evaluó carbono orgánico total (COT) y fósforo extractable.

La velocidad de infiltración y la infiltración acumulada durante la lluvia se calcularon como la diferencia entre la lluvia y el escurrimiento.

Para cuantificar la variabilidad causada por los tratamientos se realizaron análisis de la varianza, mientras que la comparación de medias entre tratamientos se realizó a través del test de Tukey y el análisis de regresión múltiple con el método Stepwise.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades edáficas

Hubo diferencias significativas entre los tratamientos en las siguientes propiedades de suelo: carbono orgánico total; estabilidad de agregados e infiltración básica. En cambio, la densidad aparente y la conductividad hidráulica no se diferenciaron entre  $SD_0$  y LV, pero sí con MN (Tabla 1).

El mayor contenido de carbono orgánico total en suelos bajo siembra directa comparados con suelos bajo laboreo convencional ya había sido señalada en la región por Sánchez *et al.* (1998). La disminución de los valores de COT en suelos agrícolas con respecto a situaciones prístinas también fue observada por Dantur *et al.* (1989) y García *et al.* (1993). Para regiones subhúmedas y semiáridas de la Pampa Argentina, Buschiazzo *et al.* (1998) reportaron acumulaciones de materia orgánica en la capa superficial de los suelos cuando compararon sistemas conservacionistas con respecto a sistemas convencionales. Resultados similares obtuvieron Abril *et al.* (2005) para la región semiárida central de Córdoba, al comparar siembra directa con laboreo con cincel.

La densidad aparente superficial (0-10 cm) no difirió significativamente entre  $SD_0$  y LV. El efecto que la siembra directa tiene sobre la densidad aparente superficial es discutido. Hay autores que no encontraron diferencias entre sistemas con y sin laboreo (Buschiazzo *et al.*, 1998). Hay reportes en la región que encontraron una mayor densidad aparente en siembra directa por acomodamiento natural del suelo (Sánchez *et al.*, 1998). Como consecuencia de la mayor actividad biológica generada por el sistema conservacionista, Lal (1976) señala densidades aparentes menores en siembra directa que en laboreo convencional.

La estabilidad estructural determinada por ambos métodos fue más alta en MN, intermedia en  $SD_0$ , y más baja en LV. Las diferencias en la estabilidad entre sistemas conservacionistas y convencionales pueden atribuirse al contenido de carbono orgánico y a la baja relación C/N de los residuos de soja, que permiten un incremento en la agregación, aunque este último es un efecto de corta dura-

Tabla 1. Variables edáficas superficiales antes de la lluvia simulada.

Variable edáfica	MN	$SD_0$	Laboreo vertical
COT (%)	2,61 a	1,92 b	1,49 c
DA (gr.cm-3)	1,02 a	1,12 b	1,14 b
CDMP (mm)	0,39 a	0,75 b	1,24 c
IE (%)	100 a	49 b	27 c
I bas (cm.h-1)	14,3 a	5,4 b	3 c
K sat (cm.h-1)	10,2 a	3,1 b	2,8 b

\* Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ).

ción debido a la gran tasa de mineralización del rastrojo (Boyle *et al.*, 1989). Lal *et al.* (1994) encontraron que la siembra directa mejoró la agregación y aumentó la cantidad de macroporos continuos, mientras que el residuo superficial fue un importante factor en el incremento del carbono orgánico y la capacidad de intercambio de cationes en los primeros centímetros del suelo. Este aumento en los poros grandes implica una mejor infiltración y un menor escurrimiento superficial, lo que genera una mejor captación de agua en siembra directa con respecto al laboreo convencional (Dardanelli, 1998).

Chagas *et al.* (1995) señalaron que la estabilidad estructural fue pobre en laboreo convencional, muy buena en siembra directa cuando el cultivo fue soja y excelente cuando el cultivo fue maíz. Según Sánchez *et al.* (1998), seis años de siembra directa en suelos de la Llanura Chacopampeana de Tucumán se tradujeron en un aumento de la estabilidad estructural, comparados a suelos bajo laboreo convencional.

La infiltración básica fue un 80% mayor en SD<sub>0</sub> que en LV, aun cuando fue aproximadamente la tercera parte comparada con el suelo de MN. El aumento de la infiltración en sistemas de siembra directa vs. laboreos convencionales se debe a la reconstitución del espacio poroso del suelo (Bradford y Huang, 1994). Esto permite una mayor captación de agua, lo cual es muy importante en una región de lluvias concentradas en el período estival. El laboreo continuo del suelo en el este tucumano degradó la estructura superficial y generó capas subsuperficiales compactadas que constituyen un impedimento para el movimiento de agua (García *et al.*, 1996).

En cambio, la conductividad hidráulica no fue afectada por el laboreo en forma significativa en comparación al sistema conservacionista, aunque ambos sistemas mostraron valores de Ksat muy inferiores al suelo virgen. La diferencia en los valores de Ksat entre suelos agrícolas y no cultivados fue reportada también por Aoki y Sereno (2000) en Haplustoles típicos de textura franco limosa.

**Coefficientes de escurrimiento**

Los coeficientes de escurrimiento (CE) (relación entre mm escurridos/ mm lluvia) fueron significativamente mayores en LV con respecto a todos los grados de cobertura de la siembra directa (Tabla 2). A su vez, en el suelo

**Tabla 2. Coeficientes de escurrimiento (CE) después de la lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup>.**

Tratamientos	CE
MN	0,31 a *
SD <sub>0</sub>	0,52 b
SD <sub>1</sub>	0,48 b
SD <sub>2</sub>	0,44 b
LV	0,69 c

\* Letras distintas indican diferencias significativas (P<0,05).

virgen (MN) se determinó un menor coeficiente de escurrimiento que en todos los demás tratamientos. La diferencia entre SD<sub>0</sub> y LV, ambos sin cobertura de residuos, se atribuye a la mayor infiltración generada en el suelo de siembra directa, probablemente debido a la mayor continuidad y menor tortuosidad de los poros no perturbados por el laboreo. La sola modificación de las propiedades superficiales del suelo en los sistemas de siembra directa es suficiente para disminuir el escurrimiento superficial en forma significativa, con respecto a sistemas con algún laboreo (Esteban, 1996).

El aumento del grado de cobertura en siembra directa mostró CE cada vez menores, aún cuando estas diferencias no fueron significativas estadísticamente. Coeficientes de escurrimiento similares fueron encontrados para un Haplustol típico de la misma textura en la provincia de Córdoba (Bricchi *et al.*, 1999).

**Pérdidas de suelo**

Aunque el aumento del grado de cobertura no se tradujo en disminución significativa del escurrimiento, sí lo hizo en relación a las pérdidas de suelo, lo que hace suponer que el residuo actuó como filtro para el transporte de las partículas de suelo. La evolución temporal de las pérdidas de suelo durante la lluvia (Figura 1) y las pérdidas totales fueron cada vez menores con el aumento del grado de cobertura (Tabla 3).

Las pérdidas de suelo en SD<sub>1</sub> y SD<sub>2</sub> fueron 48% y 62% respectivamente menores que en SD<sub>0</sub>. Además, la cobertura superficial logró retrasar el tiempo de inicio del escurrimiento; es decir que el efecto de la cobertura fue más efectivo durante los primeros minutos de la lluvia.

La cobertura disminuye las pérdidas de suelo por escurrimiento por dos causas: el residuo reduce la fuerza del flujo para desprender y transportar partículas de suelo, produciendo además pequeños reservorios que causan la deposición del sedimento (Brenneman y Laflen, 1982).

En LV, las pérdidas de suelo fueron de magnitudes superiores a todos los grados de cobertura de la siembra directa, incluso a SD<sub>0</sub>, probablemente debido a la menor estabilidad de los agregados del suelo ocasionada por el laboreo y por su menor contenido de materia orgánica. El suelo virgen tuvo valores menores de pérdida de suelo con respecto a los demás tratamientos, con excepción de SD<sub>2</sub>.

**Tabla 3. Pérdidas de suelo totales después de la lluvia de 60 mm h<sup>-1</sup>.**

Tratamientos	Pérdidas de suelo totales (g m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )
MN	35,42 a *
SD <sub>0</sub>	217,85 c
SD <sub>1</sub>	114,36 b
SD <sub>2</sub>	83,46 ab
LV	366,79 d

\* Letras distintas indican diferencias significativas (P<0,05).

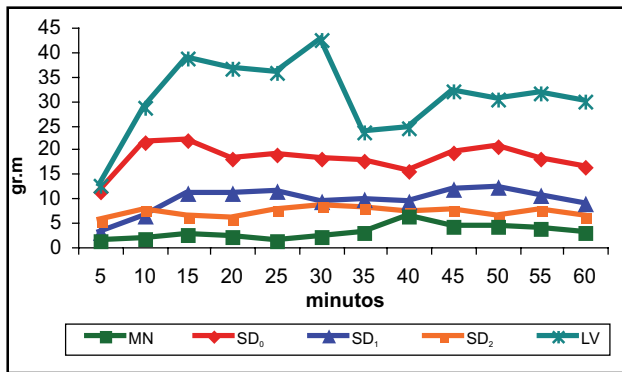


Figura 1. Pérdidas de suelo (gr/m) durante la lluvia simulada de 60 mmh<sup>-1</sup> en situación de monte natural (MN); siembra directa (SD) y laboreo vertical (LV).

El análisis de regresión permitió seleccionar una ecuación en la cual la estabilidad estructural medida por ambos métodos (tamizado en seco y húmedo y resistencia al impacto de la gota) fue la propiedad edáfica que mejor explicó las pérdidas de suelo por escurrimiento superficial en los suelos sin cobertura ( $R^2=0,92$ ).

$$E = 217.15 + 157.37 \times \text{CDMP} - 254 \times \text{IE}$$

**E:** pérdida de suelo por escurrimiento (g. m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

**CDMP:** cambio en el diámetro medio ponderado (mm).

**IE:** índice de estabilidad del agregado frente al impacto de la gota.

Cuando se comparó SD<sub>0</sub> con LV, ambos sin cobertura de rastrojos, se observó una reducción de 41% en la pérdida de suelo por erosión, lo que solo puede atribuirse al efecto de las mejores propiedades edáficas superficiales en SD<sub>0</sub>, en especial la mayor estabilidad de agregados del suelo. La sola modificación de las propiedades superficiales del suelo en siembra directa con respecto al suelo laboreado fue efectiva para disminuir la erosión, aún cuando los valores de pérdida de suelo todavía fueron muy altos en comparación con el suelo virgen de monte natural. En cambio SD<sub>2</sub> (80% de cobertura) consiguió disminuir tales pérdidas un 78% con respecto a LV, lo cual debe ser atribuido en forma ponderada al efecto de ambos: estabilidad de agregados y cobertura de residuos.

Los sistemas de producción que dejan residuos de cultivo continuamente sobre la superficie pueden sufrir pérdidas de suelo relativamente menores que aquellos que tienen cubierta vegetal sólo una parte del año. En cambio, los sistemas convencionales producen las mejores camas de siembra, pero disminuyen drásticamente la cantidad de residuos superficiales, lo que acelera su degradación (Alberts y Neibling, 1994).

Debido a la naturaleza del residuo (de rápida descomposición) y a las características edafo-climáticas de la región, es muy difícil llegar con altos niveles de cobertura a la siembra del cultivo en la campaña siguiente. Por lo tanto, debería considerarse la implementación de sistemas de rotación que mantengan la superficie del suelo cubierta y sean compatibles con una producción sustentable.

### Infiltración durante la lluvia

La Figura 2 muestra la tasa de infiltración durante la lluvia. La forma de las curvas manifiesta claramente la relación entre la rapidez con que se alcanzó el sellado superficial y la disminución de la velocidad de infiltración. La estabilidad de los agregados permite mantener por más tiempo los valores iniciales de infiltración (Le Bissonnais y Singer, 1993).

Al final de la lluvia se produjo una reducción de la tasa de infiltración con respecto al valor inicial de 68% en MN, 77% en SD<sub>2</sub>, 82% en SD<sub>1</sub>, 87% en SD<sub>0</sub> y 89% en LV.

Rienzi (1994), trabajando con lluvia simulada, encontró una disminución del 35% en la velocidad de infiltración para un suelo de pradera, mientras que para suelos más degradados esta reducción fue del 76%.

La infiltración acumulada después de una hora de lluvia fue significativamente diferente entre los dos suelos agrícolas, con un valor de 24,2 mm para SD<sub>0</sub> y 15,3 mm para LV, mientras que para MN fue 34,7 mm. La infiltración estuvo gobernada por las características intrínsecas del suelo, más que por el grado de cobertura superficial, ya que no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos bajo siembra directa con distintos grados de cobertura (Figura 3).

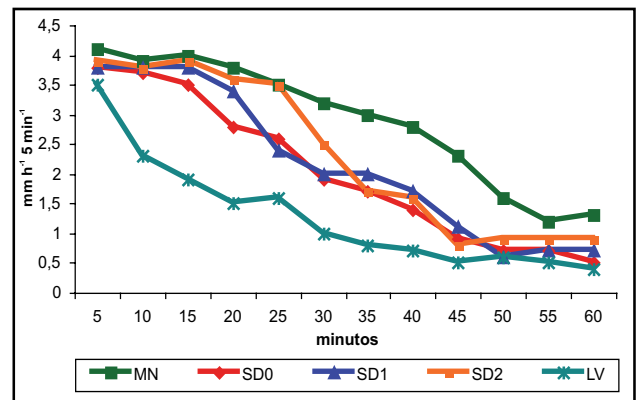


Figura 2. Cambios en la velocidad de infiltración durante la lluvia simulada de 60 mmh<sup>-1</sup> en situación de monte natural (MN); siembra directa (SD) y laboreo vertical (LV).

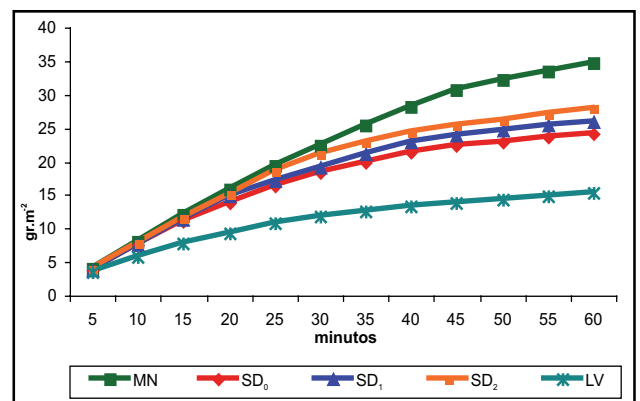


Figura 3. Infiltración acumulada durante la lluvia simulada de 60 mmh<sup>-1</sup> en situación de monte natural (MN); siembra directa (SD) y laboreo vertical (LV).

En la región de la Llanura Chacopampeana subhúmeda seca y semiárida la fuerte concentración de las lluvias en el período estival, sumada a la irregularidad de las mismas convierten a la infiltración en una variable de gran importancia para el desarrollo de los cultivos. La mayor infiltración del suelo bajo siembra directa genera menor pérdida de suelo por escurrimiento superficial y mayor almacenaje de agua, esencial para el desarrollo del cultivo.

**Pérdidas de carbono orgánico y fósforo extractable**

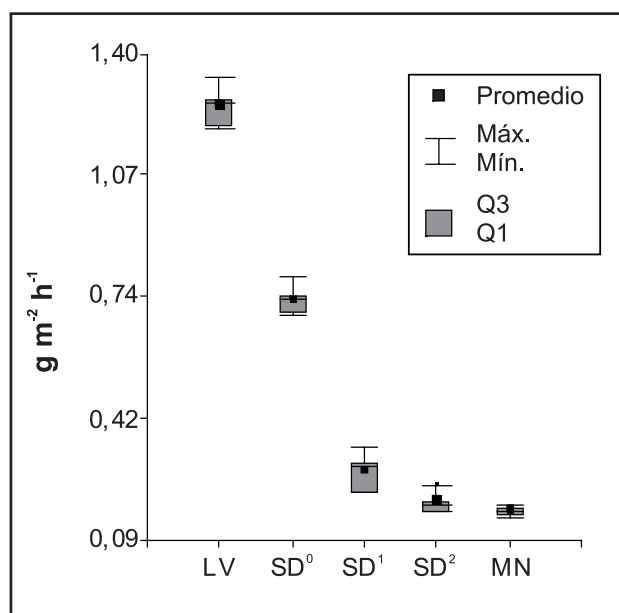
La Tabla 4 muestra la relación entre los valores de carbono orgánico total (COT) y fósforo extractable (Pe) determinados en el sedimento erodado en comparación con los que tenía el suelo previo a la lluvia (relación de enriquecimiento). Se puede observar que en todos los tratamientos la relación de enriquecimiento fue superior a 1, sin diferencias significativas entre ellos. Esto coincide con lo encontrado por Alberts y Moldenhauer (1981). El sedimento erodado estuvo compuesto principalmente por partículas finas (inferiores a 0,050 mm), es decir del tamaño del limo y la arcilla. La remoción preferencial de material fino produce una matriz de suelo más gruesa y pobre en nutrientes, lo que limita la productividad y resiliencia del suelo, debido a que es este material el que transporta en mayor medida la materia orgánica, los nutrientes y los agroquímicos (Sutherland *et al.*, 1996).

**Tabla 4. Relación de enriquecimiento en carbono orgánico total (COT) y fósforo extractable (Pe) entre el sedimento erodado y el suelo previo a la lluvia simulada.**

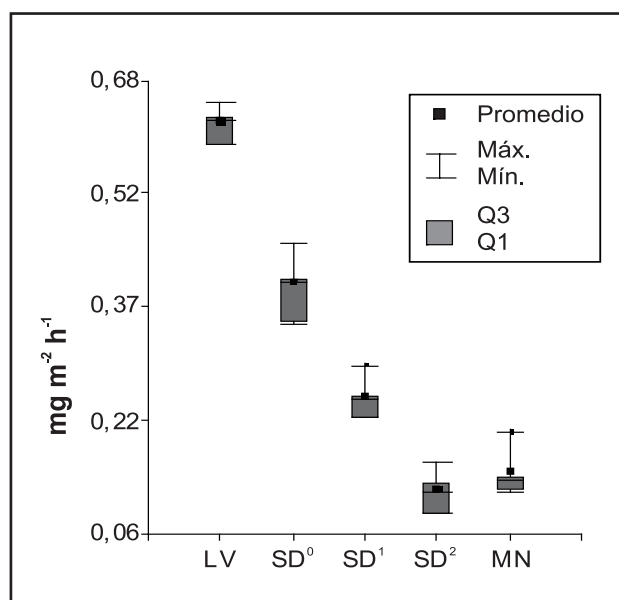
Tratamientos	COT	Pe
MN	1,15	1,12
SD <sub>0</sub>	1,17	1,19
SD <sub>1</sub>	1,14	1,12
SD <sub>2</sub>	1,12	1,12
LV	1,19	1,14

Aunque hubo enriquecimiento en nutrientes en el sedimento erodado, independientemente del manejo del suelo y del grado de cobertura, es importante recordar que los tratamientos sí difirieron significativamente entre ellos en los niveles de pérdida de suelo por erosión hídrica.

Por lo tanto, las cantidades absolutas de carbono y fósforo que fueron capaces de transportar las partículas del suelo también difirieron significativamente entre los tratamientos. En LV el carbono orgánico total (COT) detectado en el sedimento erodado fue casi el doble que en SD<sub>0</sub>. A su vez, SD<sub>1</sub> y SD<sub>2</sub> tuvieron pérdidas de hasta tres veces menores que SD<sub>0</sub> (Figura 4). Fue tan importante el efecto del grado de cobertura de SD<sub>2</sub>, que no difirió del suelo virgen (MN). En la Figura 5 se observan resultados muy similares en las pérdidas de fósforo extractable (Pe). Según Gadhiri y Rose (1991) esto se debe a que la gota de lluvia puede producir un descascarado de la capa química en-



**Figura 4. Pérdidas de carbono orgánico determinadas en el sedimento erodado.**



**Figura 5. Pérdidas de fósforo extractable determinadas en el sedimento erodado.**

quecida en los agregados finos, permitiendo su posterior transporte por el agua de escurrimiento.

**CONCLUSIÓN**

Hubo una secuencia significativamente decreciente desde el suelo virgen hasta el laboreado con cincel en los valores de carbono orgánico, estabilidad de agregados e infiltración básica. En cambio, la densidad aparente y la conductividad hidráulica no fueron diferentes entre los suelos agrícolas, pero sí en el suelo virgen.

El suelo de siembra directa tuvo menor escurrimiento superficial y menores pérdidas de suelo que el laboreo vertical a igual nivel de cobertura.

Entre las propiedades edáficas superficiales la estabilidad estructural fue la variable que mejor explicó ( $R^2=0,92$ ) las pérdidas de suelo por escurrimiento superficial.

Aunque el aumento del grado de cobertura en siembra directa no se tradujo en una disminución significativa de la cantidad de agua escurrida, los más altos niveles de cobertura lograron disminuir significativamente las pérdidas de suelo.

No hubo diferencias significativas entre los tratamientos en la relación de enriquecimiento en carbono orgánico y fósforo, pero las cantidades absolutas de nutrientes perdidos por erosión hídrica sí fueron diferentes, siguiendo la misma tendencia que las pérdidas de suelo.

La infiltración acumulada después de una hora de lluvia fue significativamente mayor en siembra directa que en laboreo vertical. En una región de características semiáridas el aumento de la infiltración tiene una doble importancia, ya que a la vez que genera volúmenes de escurrimiento menores con menores pérdidas de suelo, también aumenta el almacenaje de agua, que es esencial para el buen desarrollo del cultivo.

La siembra directa tiene sentido como práctica conservacionista sólo si se mantienen altos grados de cobertura, lo cual es muy difícil de lograr con monocultivo de soja, por la naturaleza del residuo y por las características ecológicas de la región.

#### BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abril, A.; P. Salas; E. Lovera; S. Kopp y N. Casado-Murillo. 2005.** Efecto acumulativo de la siembra directa sobre algunas características del suelo en la región semiárida central de la Argentina. *Cienc. Suelo* 23 (2) 179-188.
- Alberts, E. E. and W. C. Moldenhauer. 1981.** Nitrogen and phosphorus transported by eroded soil aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 391-396.
- Alberts, E. E. and W. H. Neibling. 1994.** Influence of crop residues on water erosion. En: Unger, P. (ed.), *Managing Agricultural Residues*, Lewis Publisher, Texas, pp.19-39.
- Amado, T. J. C.; N. P. Cogo e R. Levien. 1989.** Eficacia relativa do manejo do residuo cultural de soja na redução das perdas de solo por erosão hídrica. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 13: 251-257.
- Aoki, A. M. y R. Sereno. 2000.** Macro y mesoporosidad de un suelo Haplustol típico bajo diferente condición de manejo utilizando infiltrómetro de tensión. En: *Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 17, Mar del Plata, pp. 8.
- Boyle, M.; W. T. Frankberger and L. H. Stolzy. 1989.** The influence of organic matter on soil aggregation and water infiltration. *J. Prod. Agric.* 2: 290-298.
- Bradford, J. M. and C. Huang. 1994.** Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil Tillage Res.* 31: 353-361.
- Brenneman, L. G. and J. M. Laflen. 1982.** Modelling sediment deposition behind corn residue. *Trans. ASAE* 25: 1245-1250.
- Bricchi, E.; F. Formia; J. Cisneros y G. Cerioni. 1999.** Escurrimiento en un Haplustol típico con dos sistemas de labranzas. En: *Actas Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, 14, Pucón, Chile, pp. 20.
- Buschiazzo, D. E.; J. L. Panigatti and P. W. Unger. 1998.** Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 49 (1-2): 105-116.
- Chagas, C. I.; O. J. Santanatoglia; M. G. Castiglioni and H. J. Marelli. 1995.** Tillage and cropping effects on selected properties of an Argiudoll in Argentina. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26: 643-655.
- Cogo, N. P.; W. C. Moldenhauer and G. R. Foster. 1984.** Soil loss reductions from conservation tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 368-373.
- Corbella, R. D.; G. S. Fadda y J. R. García. 2000.** Pérdidas de residuos de soja y maíz en distintos sistemas de manejo en suelos de la provincia de Tucumán. En: *Proc. International Soil Conference Organization (ISCO)*, 11, Buenos Aires, Argentina, pp. 159.
- Dantur, N.; C. Hernández; M. Casanova; V. Bustos y L. Guzmán. 1989.** Evolución de las propiedades de los suelos en la región de la Llanura Chacopampeana de Tucumán, bajo diferentes alternativas de producción. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 66 (1): 32-60.
- Dardanelli, J. 1998.** Eficiencia en el uso del agua según sistemas de labranzas. En: Panigatti, J. L.; H. Marelli; D. Buzchiazzo y R. Gil (eds.), *Siembra Directa*. INTA, Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, pp.107-115.
- Esteban, S. 1996.** Efecto de la lluvia sobre la rugosidad superficial e infiltración del agua en el suelo bajo dos sistemas de labranza. *Agricultura Técnica en México* 22 (1): 3-19.
- Figueroa, L. R. y J. R. García. 1982.** El encostramiento superficial de los suelos. *Publicación especial N° 21*. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán.
- Gadhiri, H. and C. W. Rose. 1991.** Sorbed chemical transport in overland flow: II. Enrichment ratio variation with erosion processes. *J. Environ. Qual.* 20: 634-641.
- García, J. R.; C. Bleckwedel; D. Giménez; M. R. Cáceres y A. M. Pietroboni. 1993.** La degradación de los suelos agrícolas del Este Tucumano. En: *Actas del*

- Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 12, Salamanca, España, pp. 1280-1285.
- García, J. R.; R. Giménez; G. A. Sanzano y R. D. Corbella. 1996.** Influencia en la infiltración de diferentes capas de un suelo agrícola del este tucumano. *Avance Agroind.* 64: 12-13.
- Lal, R. 1976.** No-tillage effects on soil properties under different crops in western Nigeria. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 242-245.
- Lal, R. and W. Elliot. 1994.** Erodibility and erosivity. En: Lal, R. ed., *Soil Erosion, Soil and Water Conservation Society and St Lucie Press, Ankeny, Iowa, USA*, pp. 181-208.
- Lal, R.; A. A. Mahboubi and N. R. Fausey. 1994.** Long-term tillage and rotations effects on properties of a Central Ohio soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 517-522.
- Le Bissonnais, Y. and M. J. Singer. 1993.** Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 224-229.
- Marelli, H. 1998.** La siembra directa como práctica conservacionista. En: Panigatti, J. L.; H. Marelli; D. Buzchiazzo y R. Gil (eds.), *Siembra Directa*. INTA, Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, pp.127-139.
- Meyer, L. D. and W. C. Harmon. 1984.** Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1152-1157.
- Nearing, M. A.; L. J. Lane and V. L. Lopes. 1994.** Modeling soil erosion. En: Lal, R. (ed.), *Soil Erosion, Soil and Water Conservation Society and St Lucie Press, Ankeny, Iowa, USA*, pp. 127-155.
- Rienzi, E. A. 1994.** Influencia de algunos factores de agregación y las características del sellado y encostrado en un Argiudol típico. Tesis inédita de Magister Scientiae. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Sánchez, H. A.; J. R. García; M. R. Cáceres y R. D. Corbella. 1998.** Labranzas en la Región Chacopampeana Subhúmeda de Tucumán. En: Panigatti, J. L.; H. Marelli; D. Buzchiazzo y R. Gil (eds.), *Siembra Directa*, INTA, Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires, pp. 245-256.
- Sanzano, G. A.; R. D. Corbella; J. R. García y G. S. Fadda. 2005.** Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ci. Suelo (Argentina)* 23: 93-100.
- Sharpley, A. N. 1985.** The selective erosion of plant nutrients in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1527-1534.
- Sutherland, R. A.; Y. Wan; C. T. Lee and A. D. Ziegler. 1996.** Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an Oxisol. *Catena* 26: 3-4, 187-208.
- Wan, Y. and S. A. El-Swaify. 1998.** Sediment enrichment mechanisms of organic carbon and phosphorus in a web-aggregated Oxisol. *J. Environ. Qual.* 27: 132-138.
- Wischmeier, W. H. and J. V. Mannering. 1969.** Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33: 131-136.
- Zuccardi, R. B. y G. S. Fadda. 1985.** Bosquejo agrológico de la provincia de Tucumán. *Miscelánea 86*. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Univ. Nac. de Tucumán.
- Zuccardi, R. B.; J. R. García; C. Molina; M. Cáceres; C. Bleckwedel; D. Giménez y G. A. Sanzano. 1988.** La expansión de la frontera agropecuaria y los impactos sobre el ecosistema de la provincia de Tucumán. En: F.E.C.I.C. (ed.), *El Deterioro del Ambiente en la Argentina*, F.E.C.I.C editor, Buenos Aires, pp. 225-232.
-