

ERODABILIDAD DE SUELOS DEL SUR DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA ARGENTINA

NORA E ECHEVERRÍA; ADRIÁN G VALLEJOS & JUAN C SILENZI

Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur
Altos del Palihue, 8000 Bahía Blanca. Email: echeverr@criba.edu.ar

Recibido: 00/00/00

Aceptado: 00/00/00

RESUMEN

La erodabilidad de los suelos se puede medir a campo mediante simuladores de lluvia o predecir mediante modelos matemáticos como USLE y WEPP.

El objetivo del trabajo fue medir la erodabilidad de tres suelos representativos del Sur de la Región semiárida argentina y compararla con la estimada por los modelos WEPP y USLE.

En los suelos Bahía Blanca (SBB) y Cabildo (SC) -*Paleustoles Petrocálcicos*- y Villarino (SV) -*Calciustol Petrocálcico*- se aplicaron, mediante un simulador portátil, dos lluvias consecutivas de 32 mm en 30 minutos. Las pérdidas de suelo debido a la 1° y 2° lluvia indicaron: SV 3,26 y 5,86 Mg ha⁻¹ h⁻¹; SC 2,04 y 5,53 Mg ha⁻¹ h⁻¹; SBB 0,75 y 2,66 Mg ha⁻¹ h⁻¹, respectivamente. La resistencia del suelo a la erosión correlacionó con la relación limo: arcilla (r:0,60), CO (r:0,55) y estabilidad estructural (r:0,56). Las tasas de escurrimiento y sedimentación promedio fueron para SV: 12,4 10⁻⁶ m s⁻¹ y 15,6 10⁻⁵ kg s⁻¹ m⁻²; para SC: 9,9 10⁻⁶ m s⁻¹ y 13,5 10⁻⁵ kg s⁻¹ m⁻² y para SBB: 9,6 10⁻⁶ m s⁻¹ y 6,1 10⁻⁵ kg s⁻¹ m⁻², respectivamente. El comportamiento de SV se debió al rápido sellado del horizonte superficial, mientras que el de SBB y el SC se relacionó con la estabilidad estructural.

En el modelo WEPP, la erodabilidad medida entre surcos (*Ki*) fue, para SV: 2,5; SC: 1,89 y SBB: 1,39 (10⁶ kg s m⁻⁴); mientras que la estimada (*Kib*) fue significativamente más alta, SV: 6,26; SC: 10,2 y SBB: 10,2 (10⁶ kg s m⁻⁴). Los índices de erosión (*IE*) fueron, SV: 0,30; SC: 0,21 y SBB: 0,10 Mg MJ⁻¹ y discreparon significativamente de los valores K estimados a partir del nomograma, confirmando que las predicciones del mismo resultan poco confiables en suelos con el 65% o más de arenas.

Palabras clave. Erosión hídrica, simulador de lluvia, pérdida de suelo, escurrimiento, erodabilidad.

ERODIBILITY OF SOILS IN THE SOUTH OF THE SEMIARID REGION OF ARGENTINA

ABSTRACT

Water erodibility of soils can be measured in the field using rainfall simulators or be predicted with mathematical models as USLE and WEPP.

The objective of our research was to determine water erodibility of three representative soils in the southern semiarid region of Argentina, aiming to a comparison with the estimated by the WEPP and USLE models.

In Bahía Blanca (SBB) and Cabildo (SC) soils -*Petrocalcic Paleustolls*- and Villarino (SV) soil -*Petrocalcic Calciustoll*, two consecutive rainfalls of 32 mm during 30 minutes were applied by a rainfall simulator. Soil loss owed to first and second rain indicated: SV 3,26 and 5,86 Mg ha⁻¹ h⁻¹; SC 2,04 and 5,53 Mg ha⁻¹ h⁻¹; SBB 0,75 and 2,66 Mg ha⁻¹ h⁻¹. Soil resistance to water erosion correlated to silt/clay ratio (r: 0,60); OC (r: 0,55) and structural stability (r: 0,56). Average runoff and sedimentation were: SV 12,4 10⁻⁶ m s⁻¹ and 15,6 10⁻⁵ kg s⁻¹ m⁻²; SC 9,9 10⁻⁶ m s⁻¹ and 13,5 10⁻⁵ kg s⁻¹ m⁻²; SBB 9,6 10⁻⁶ m s⁻¹ and 6,1 10⁻⁵ kg s⁻¹ m⁻². Behavior of SV soils is explained by a fast top sealing whilst SBB and SC is related to structural stability.

In accord to WEPP the measured interill erodibility (*Ki*) was SV 2,5; SC 1,89 and SBB 1,39 (10⁶ kg s m⁻⁴) whereas the estimated value was significantly higher, being SV 6,26; SC 10,2 and SBB 10,2 (10⁶ kg s m⁻⁴). Erosion indexes (*IE*) were SV 0,30; SC 0,21 and SBB 0,10 Mg MJ⁻¹, highly differing from estimated K, which confirms that nomograph predicted values have low confidence in soils with a higher than 65% sand content in texture.

Key words. Water erosion, rainfall simulator, soil loss, runoff, erodibility.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica actual afecta más del 30% de la superficie del Sur de la Región semiárida argentina, nos referimos específicamente al sudoeste bonaerense. Como ejemplos, podemos citar los Partidos de Tornquist con el 35% y el de Bahía Blanca con el 57% de la superficie dañada (FECIC, 1988). A su vez, el sector Norte del Partido de Villarino presenta 50.000 ha con serio riesgo de erosión hídrica (Silenzi & Echeverría, 2001). Los efectos de este proceso comprometen la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios (Silenzi *et al.*, 1994) y provocan la eutrofización de las aguas del dique Paso Piedras (Marchena, 2002).

Para estimar tasas de sedimentación en reservorios de agua y para definir estrategias de control de erosión hídrica, se pueden utilizar distintos modelos de predicción. Entre ellos, el más utilizado fue la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), de Wischmeier & Smith (1978); actualmente se destaca el Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (WEPP), de Flanagan & Nearing (1995).

La erosión hídrica es un proceso complejo, comprende la desagregación del suelo por impacto de la gota de lluvia, el desprendimiento por el flujo superficial de agua, y el transporte por salpicado o por escurrimiento (Meyer & Harmon, 1984). La resistencia del suelo a este proceso se relaciona con la textura, la estabilidad de agregados, la cohesividad, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos. Los suelos de textura fina generalmente son más resistentes a la desagregación, pero sus sedimentos son fácilmente transportables; mientras, que los suelos de textura gruesa son desagregados rápidamente, pero sus sedimentos son dificultosos de transportar. Los suelos francos y franco-limosos son fácilmente desagregados y transportados, por eso se los considera muy erodibles (Wischmeier & Mannering, 1969).

La susceptibilidad de un suelo a la erosión se denomina erodabilidad, y es uno de los factores más importantes en los modelos de erosión, junto con la erosividad de las tormentas, la topografía, la cobertura superficial y el manejo del suelo. La medición directa de la erodabilidad de un suelo requiere una cantidad elevada de tiempo, costosos equipos y considerable mano de obra. Por estos motivos, se busca modelar la erodabilidad a partir de relaciones estadísticas entre resultados experimentales y propiedades del suelo fácilmente medibles. En la USLE, la erodabilidad del suelo (factor K) se estima a partir de la textura, materia orgánica, estructura y permeabilidad del perfil (Wischmeier & Smith, 1978). El factor K representa la pérdida anual media de suelo por unidad del factor R , en las condiciones normalizadas para las parcelas estándar (22,13 m de longitud y 9% de pendiente) (Wischmeier, WH *et al.*, 1971).

El modelo WEPP trabaja con una ecuación de continuidad para determinar el desprendimiento, transporte y deposición de partículas, y utiliza parámetros de erodabilidad independientes para evaluar erosión laminar (K_l) y en surcos (K_r). En este modelo, K_i se puede estimar a partir de la textura (Alberts *et al.*, 1995).

En nuestro país se han realizado algunas experiencias para estimar el factor K . La más importante fue realizada en EERA, INTA Paraná donde se obtuvieron valores del factor K a partir de parcelas experimentales estándar, estos datos permiten suponer aceptable el uso del nomograma. Otros autores trataron de establecer mediante el uso de lluvia artificial estimadores de la susceptibilidad del suelo a la erosión. Para la Serie Marcos Juárez, utilizando un simulador rotativo en parcelas de campo, Marelli *et al.* (1984) obtuvieron un K promedio de 0,22; mientras que para la misma Serie, Da Veiga & Noailles Bosch (1993) estimaron a partir del nomograma de Wischmeier & Smith (1978), un K de 0,52. Irurtia & Mon (1993), trabajando con un micro simulador, en la Serie Pergamino encontraron valores de K de 0,68; mientras que los estimados con el nomograma oscilaron en 0,58.

En el Sur de la Región semiárida argentina no se conoce la erodabilidad de los suelos a la lluvia. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue determinar, mediante un simulador portátil de lluvia y parcelas de campo, la susceptibilidad a la erosión de tres suelos representativos de la región y comparar el comportamiento de los suelos con los factores K estimados a partir de la ecuación USLE y la del modelo WEPP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área y de los suelos

Se seleccionaron tres ambientes comunes del Sur de la Región semiárida pampeana argentina caracterizados por sufrir erosión hídrica. El Sitio 1 se ubica al NE de la localidad de Cabildo, cerca del dique Paso Piedras, corresponde a las tierras agrícolas del pedemonte ondulado de la Sierra de la Ventana. El Sitio 2 se encuentra en la periferia de la ciudad de Bahía Blanca, es una planicie suavemente ondulada de los planos interfluviales finales del pedemonte. El Sitio 3, se localiza en las pendientes que separan las planicies arenosas del SO de la provincia de Buenos Aires y SE de la provincia de La Pampa.

En cada Sitio se identificaron los suelos dominantes, se describieron los perfiles (Soil Survey Staff, 1991) y se tomaron muestras para analizar en el laboratorio. La clasificación taxonómica (Soil Survey Staff, 1999) indicó que los suelos más representativos del Sitio 1 son los *Paleustoles Petrocálculos*, designados en este trabajo Suelo Cabildo (SC) con una secuencia de horizontes Ap-A2-AC-C1-Ck-2Ckm. El Sitio 2 también está dominado por *Paleustoles Petrocálculos*, Suelo Bahía Blanca (SBB) con similar disposición de horizontes, Ap-A2-AC-Ck-2Ckm; mientras que

Tabla 1. Características de los suelos (horizonte superficial).

Table 1. Soil characteristics (topsoil).

Suelo	Arcilla < 0,002 mm	Limo 0,002- 0,05	Amf 0,05-0,1	Af 0,1-0,25	Am 0,25-0,50	Ag 0,5-1,0	Amg 1,0-2,0 mm	CO	CDMP
	(g kg ⁻¹)							(g kg ⁻¹)	(mm)
SC	163 c	233 b	454 b	136	7	5	3	13,0 b	0,77 b
SBB	117 b	183 a	408 b	237	52	17	8	13,4 b	0,49 a
SV	89 a	232 b	181 a	343	129	15	11	8,5 a	1,32 c

Ref: Amf: arena muy fina; Af: arena fina; Am: arena media; Ag: arena gruesa; Amg: arena muy gruesa;

CO: Carbono Orgánico; CDMP: Cambio en el Diámetro Medio Ponderado.

el Sitio 3 responde a los *Calciustoles Típicos menos evolucionados con perfil A-AC-C-2Ckm*, nominado Suelo Villarino (SV). El tipo de utilización de las tierras es ganadero agrícola en los tres sitios, pero con diferente historia y manejo. El Sitio 1 corresponde a un manejo de agricultura continua, donde se hace trigo un año y verdeo de invierno al otro, con labranza convencional (2 o 3 operaciones con arado rastra), barbechos cortos y pastoreo continuo. Los suelos correspondientes al Sitio 2 se encontraban como campo natural hasta dos años atrás, actualmente se cultivan cereales de invierno para cosecha, con labranza convencional (2 operaciones con rastra de discos) y pastoreo ocasional de baja carga. En el Sitio 3 se hace trigo o verdeo de invierno y al otro año se deja como campo natural, con labranza convencional (1 o 2 operaciones con arado rastra), barbechos cortos y pastoreo continuo.

Previo a las lluvias, alrededor de las parcelas, se tomaron muestras de suelo para medir: la humedad antecedente (Gardner, 1986); la estabilidad de agregados (Método de De Leenher & De Boodt, 1958 y procedimiento de cálculo analítico de Santanatoglia & Fernández, 1982); la distribución de tamaño de partículas (método de la pipeta de Gee & Bauder, 1986); el Carbono orgánico (micrométodo de Richter & Von Wistinghausen (1981), basado en el procedimiento de Walkley & Black).

Ensayos de simulación de lluvia

Para evaluar el escurrimiento y la pérdida de suelo en cada parcela experimental se utilizó un simulador de lluvia portátil,

diseñado por Marelli *et al.* (1986), basado en el construido originalmente por Meyer & Harmon (1979). El equipo consta de un marco de hierro de 2 m por 1 m, este se eleva a 3 m de altura del suelo mediante cuatro soportes de caños telescópicos. Sobre el marco de hierro se dispone una barra oscilante donde se coloca el pico aspersor. El pico aspersor Veejet 80.150 trabajó a una presión de 41,4 kPa, generando lluvias con un diámetro volumétrico medio de 2,5 mm y una energía de 275 kJ ha⁻¹ mm⁻¹. El equipo se completa con una bomba, un motor a explosión, un tanque de agua y dos cortinas rompevientos para lograr una buena distribución de la lluvia.

Las parcelas de escurrimiento fueron de 1 por 1 m de lado (1 m²), con una zona de borde de 0,50 m de cada lado. Se simuló una condición de barbecho desnudo invirtiendo el suelo con pala hasta una profundidad de 12 cm, rastrillándolo posteriormente para romper los terrones más grandes y alisar la superficie. El escurrimiento y el sedimento se midió a intervalos de 5 minutos. Las muestras de escurrimiento se trataron con Calcio para flocular los sólidos, luego se eliminó el agua sobrenadante, se secó a 60 °C y se pesaron los sedimentos.

Procedimiento de operación del equipo: en cada parcela se aplicaron dos lluvias consecutivas en 24 horas de 32 mm en 30 minutos cada una. La intensidad seleccionada respondió a la lluvia máxima registrada para la región en un período de retorno de 10 años. La cantidad de réplicas fueron 7 para SC y 3 para SV y SBB, totalizando 26 lluvias. Previo a las lluvias se midió la humedad antecedente (Tabla 2).

Tabla 2 Humedad antecedente y pérdida de suelo debido a la 1° y 2° lluvia.

Table 2 Antecedent water content and soil loss during the first and the second rain.

Suelo	Humedad inicial		Pérdida suelo ^a		Pérdida total ^a
	1° Lluvia	2° Lluvia	1° Lluvia	2° Lluvia	
	(g g ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹ h ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹ h ⁻¹)
SC	0,17 b (0,04)	0,22 b (0,02)	2,04 ab (0,15)	5,53 a (0,45)	7,57
SBB	0,15 b (0,06)	0,21 b (0,02)	0,75 a (0,46)	2,66 a (0,82)	3,41
SV	0,04 a (0,01)	0,14 a (0,01)	3,26 b (0,19)	5,86 a (0,23)	9,12

^aEn cada columna letras distintas indican diferencia significativa entre los suelos para cada lluvia (Tukey, P<0,05). Valores entre paréntesis indican el desvío estándar (en %) de la media del tratamiento inmediatamente superior.

Cálculo y estimación de los parámetros de erodabilidad según los modelos USLE y WEPP

Para el cálculo de la erodabilidad entre surcos (K_i) del modelo WEPP se utilizó la ecuación (1)

$$D_i = K_{iadj} * I_e * \sigma_{ir} \quad (1),$$

donde:

D_i es la tasa de sedimentos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)

K_{iadj} es la erodabilidad ajustada por pendiente

$$(K_{iadj} = K_i * [1,05 - 0,85 e^{-(4\text{sen}\Omega)}])$$

Ω es el ángulo de la pendiente (grados)

K_i es la erodabilidad ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-4}$)

I_e es la intensidad de lluvia efectiva (m s^{-1})

σ_{ir} es la tasa de escurrimiento (m s^{-1})

La intensidad de lluvia efectiva, I_e , es igual a la precipitación acumulada en el período del ensayo en relación con el tiempo total durante el cual la tasa de lluvia excede a la tasa de infiltración.

Las tasas de escurrimientos y sedimentos fueron calculadas a partir de los últimos tres periodos de 5 minutos de cada evento de simulación de lluvia, momento que dichas tasas tienden a estabilizarse (Elliot *et al.*, 1989; Foster *et al.*, 1995).

Se estimó la erodabilidad base (K_{ib}) a partir de la textura, según la ecuación (2) (Alberts *et al.*, 1995), para suelos que contienen más del 30% de arena:

$$K_{ib} = 2.728.000 + 192.100 * \text{amf} \quad (2),$$

donde, K_{ib} es la erodabilidad base ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-4}$) y amf es el porcentaje de arena muy fina.

A partir de los registros de sedimentos y energía de las lluvias, se determinó un estimador de la susceptibilidad del suelo a erosionarse que Irurtia *et al.* (1994) denominaron Índice de Erosión (IE) definido como «la tasa de erosión por unidad de energía» (ecuación 3):

$$(\text{IE}) = \frac{\text{Pérdida de suelo (Mg ha}^{-1} \text{h}^{-1})}{\text{Energía de la tormenta (MJ ha}^{-1} \text{h}^{-1})} \quad (3)$$

El factor de erodabilidad (K) de la USLE fue estimado a partir de la ecuación (4) en el SI de unidades (Loch & Pocknee, 1995):

$$K = \frac{2,77 M^{1,14} (10^{-7}) (12 - a) + 4,28 (10^{-3}) (b-2)}{+ 3,29 (10^{-3}) (c-3)} \quad (4);$$

donde:

M es el (% Limo + Arena muy fina)*(100 - % Arcilla):

a es el porcentaje de Materia Orgánica;

b es el código de la estructura del suelo;

c es la clase de la permeabilidad del perfil del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de los suelos

En la Tabla 1 se muestran parámetros edáficos relevantes para esta investigación. El horizonte superficial de los suelos presenta diferencias en la fracción arcilla, limo y arenas muy fina y fina. El SC y SV tienen similar contenido de limo, este último con menor proporción de arcilla y una relación limo/arcilla elevada. El CO fue similar para los SC y SBB, pero significativamente menor para el SV. En cuanto a la estabilidad estructural los tres suelos difieren significativamente ($p < 0,05$), el valor más alto en el CDMP del SV lo adjudicamos al bajo contenido de CO y arcilla. La influencia positiva de estos parámetros sobre la estabilidad de los agregados ha sido descrita para otros suelos (Tisdall & Oades, 1982; Buschiazzo *et al.*, 1995). El SC, a pesar de tener mayor contenido de arcilla y similar tenor de CO, resultó con menor estabilidad que el SBB. Este comportamiento podría deberse al manejo precedente, el SC provenía de 10 años de labranza continúa, mientras que SBB tuvo una reciente incorporación a la agricultura. La influencia del manejo sobre la estabilidad de los agregados a sido mencionada por diferentes autores (Tisdall & Oades, 1982; Santanatoglia & Fernández, 1983; Buschiazzo *et al.*, 1995; Silenzi *et al.*, 2000).

Pérdida de suelo

De acuerdo con las características del procedimiento experimental, principalmente el tamaño de la parcela, creemos que, los sedimentos medidos provengan en gran parte del golpeteo de la lluvia y el humedecimiento explosivo de los agregados, y que el escurrimiento tenga escasas posibilidades de desprendimiento de partículas de los mismos.

A partir de los resultados obtenidos se observa que la 2ª lluvia siempre resultó más erosiva que la 1ª, para todos los suelos. Para ambas lluvias, la pérdida de suelo mostró un orden jerárquico mayor en SV, intermedio en SC y menor en SBB (Tabla 2), presentando solo diferencias significativas entre SV y SBB para la 1ª lluvia. A pesar de que no existe diferencia estadística entre SBB y SC, el orden de magnitud de pérdida de suelo fue siempre mayor en SC. Esto podría deberse a la mayor proporción de partículas finas (arcilla y limo) y a la menor estabilidad estructural que presentó SC.

En la primer lluvia el SV presentó mayor pérdida de suelo que los restantes. En este suelo se evidenció una rápida dispersión de los agregados, sellando el suelo a pocos minutos del inicio de la lluvia, provocando mayores tasas de escurrimiento y sedimentos (Tabla 3). Por su alta proporción de arenas finas, su alta relación limo:

Tabla 3. Parámetros de la lluvia artificial y tasas de escurrimiento y sedimentos.

Table 3. Rain simulation date, runoff and soil loss rates.

Suelo	Intensidad lluvia (mm h ⁻¹)	Intensidad lluvia Efectiva (m s ⁻¹)	Tasa escurri- miento (m s ⁻¹)	Tasa sedimentos (kg s ⁻¹ m ⁻²)
Lluvia 1 ^a				
SC	63	2,36 * 10 ⁻⁵	7,23 * 10 ⁻⁶ ab	9,36 * 10 ⁻⁵ ab
SBB	67	2,26 * 10 ⁻⁵	4,75 * 10 ⁻⁶ a	3,54 * 10 ⁻⁵ a
SV	61	1,94 * 10 ⁻⁵	10,9 * 10 ⁻⁶ b	11,0 * 10 ⁻⁵ b
Lluvia 2 ^a				
SC	67	1,99 * 10 ⁻⁵	1,26 * 10 ⁻⁵ a	17,7 * 10 ⁻⁵ ab
SBB	65	1,98 * 10 ⁻⁵	1,45 * 10 ⁻⁵ a	8,64 * 10 ⁻⁵ a
SV	60	1,74 * 10 ⁻⁵	1,38 * 10 ⁻⁵ a	20,2 * 10 ⁻⁵ b

arcilla y su condición de suelo seco, se constituyó en un suelo muy susceptible al desprendimiento de partículas tanto por impacto de la gota de lluvia como por el estallido de agregados por humedecimiento rápido. En el SC y SBB el proceso fue similar pero se necesitó más energía para desagregar las partículas y sellar el suelo debido a que tienen mayor contenido de arcilla y CO y mejor estabilidad de agregados

El incremento de la erosión en los tres suelos, de la 1° a la 2° lluvia, podría deberse a la disminución de la cohesión y a un aumento progresivo de partículas finas -no coherentes- en el flujo de escurrimiento a medida que continuó la lluvia.

Las pérdidas de suelo que medimos en este trabajo (Tabla 2) aparecen como bajas comparadas con los resultados de Meyer & Harmon (1984) en suelos de EE.UU., pero resultan similares a las publicadas por Marelli *et al.* (1984) y Adema *et al.* (2001) para suelos de la Argentina, y por Díaz Fierro *et al.* (1987) y Duiker *et al.* (2001) en otras latitudes. Meyer & Harmon (1984) obtuvieron valores de pérdida de suelo que varían entre 5,70 a 70,00 Mg ha⁻¹ h⁻¹ con un simulador (Meyer & Harmon, 1979) de características equivalentes al del presente trabajo pero con parcelas con mayor pendiente. En nuestro país, Marelli *et al.* (1984), en suelos franco limosos, obtuvo valores que varían entre 0,42 a 2,63 Mg ha⁻¹ h⁻¹ con un equipo rotativo [diseñado por Swanson (1979)], mientras que, Adema *et al.* (2001) en suelos de pastizales con un simulador portátil con aspersor de cono lleno, evaluado por Rostagno y Garayzar (1995) midieron pérdidas entre 0,63 a 2,47 Mg ha⁻¹ h⁻¹. Duiker *et al.* (2001) evaluó distintos tipos de suelos al sur de España mediante un simulador con un aspersor colocado a 2,60 m de altura, trabajando con una presión de 50 kPa y lluvias de 60 mm h⁻¹ y obtuvo valores de pérdidas entre 4 y 15 Mg ha⁻¹ h⁻¹.

En cuanto a las tasas de escurrimiento y sedimento, el análisis interpretativo de la conducta de los suelos durante las lluvias indicaría que, el SV registró las mayores tasas de escurrimiento y sedimento en ambas lluvias (Tabla 3). Entendemos que, inicialmente, el suelo seco recibió la lluvia, los agregados se rompieron rápidamente por impacto de las gotas y estallido, posteriormente las partículas desprendidas sellaron el suelo inmediatamente. Esta ruptura se produce por compresión del aire por el frente húmedo (Le Bissonnais, 1990). La velocidad de infiltración se redujo rápidamente y presentó un escurrimiento constante durante el ensayo. Al iniciarse la 2° lluvia el suelo estaba prácticamente en capacidad de campo, por lo tanto, se entiende que la velocidad de infiltración dependió de la Conductividad Hidráulica de los primeros centímetros del suelo sellado provocando un aumento de un 26% en la tasa de escurrimiento y de 84% en la tasa de sedimento.

En el SC aumentó la tasa de escurrimiento y de sedimento de la 1° a la 2° lluvia en un 74 y 112%, respectivamente. Interpretamos que, a medida que el suelo se fue humedeciendo y perdiendo cohesión, la energía cinética por golpeteo fue incrementando su incidencia sobre la desagregación. También es posible que, al disminuir la infiltración por progresivo sellado de los poros superficiales del perfil, la lámina de agua resultante haya contribuido en el aumento de la erosión por salpicadura. Atribuido a la turbulencia que imprime el agua a la gota impactante (Palmer, 1964 citado en Morgan, 1997).

En el SBB las tasas de escurrimiento y de sedimento de una lluvia a la otra aumentaron en un 205 y 144%, respectivamente. Si bien la tasa de escurrimiento en la 2° lluvia es similar a la de los otros suelos, el aumento generado es debido a las buenas condiciones de infiltración que mantuvo SBB durante el primer evento. Durante la

2° lluvia, en condiciones de suelo húmedo, se produce la mayor desagregación y sellado del suelo, esto más la disminución del gradiente hidráulico produce una caída en la infiltración que explica el incremento en la tasa de escurrimiento. En cuanto a la tasa de sedimento, el aumento de la primera lluvia a la otra es similar al SC, pero las tasas son menores debido a que hubo menor cantidad de partículas desagregadas. Razonamos que en este suelo juega un rol fundamental la resistencia de los agregados al impacto de la lluvia, evidenciada por la mayor estabilidad de los agregados al tamizado en agua.

La Tabla 4 muestra las correlaciones simples entre la pérdida de suelo y las propiedades estudiadas. Para la 1° lluvia existe una correlación altamente significativa para la relación limo/arcilla y Carbono orgánico y significativa para la estabilidad estructural y el contenido de arena muy fina. En la 2° lluvia sólo es significativa la relación con la estabilidad de agregados. En este sentido, Meyer & Harmon (1984) también encuentran una buena correlación con el contenido de arcilla y CO del suelo; mientras que Duiker *et al.* (2001) lo hicieron con la suma de las fracciones limo y arena muy fina. Barthés & Roose (2002), reportaron una estrecha relación entre la pérdida de sedimentos y la estabilidad de agregados del horizonte superficial.

Parámetros de erodabilidad

En la Tabla 5 se muestran los valores de la erodabilidad entre surcos (K_i) del modelo WEPP, calculados con la ec (1) a partir de los registros de intensidad de lluvia, escurrimiento y pérdida de suelo de las parcelas experimentales (Tabla 3).

Tabla 4. Coeficientes de correlación simple entre pérdida de suelo y propiedades edáficas evaluadas.

Table 4. Simple linear correlation coefficients among soil loss and soil properties.

Propiedades	Coeficientes de correlación (r)	
	Erosión Lluvia 1	Erosión Lluvia 2
% de arcilla	-0,21	0,14
Limo	0,40	0,55*
R: Limo/arcilla	0,78**	0,41
Arena muy fina,	-0,62*	0,22
Limo + Amf	-0,32	0,05
CO	-0,72**	-0,40
CDMP	0,65*	0,58*

Propiedades del suelo con $r > |0,55|$ son significativas a un nivel del 5% (*), y $r > |0,68|$ a un nivel del 1% (**) (Steel and Torrie, 1960).

Los K_i para los tres tipos de suelos varían entre 1,39 10^6 a 3,08 $10^6 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Estos valores son similares a los obtenidos en ensayos de erodabilidad en el Projet NSERL (1989) y por Duiker *et al.* (2001). Los K_i medidos para la 1° lluvia no presentaron diferencias entre suelos. Para la 2° lluvia el SV fue significativamente mayor que el SBB, y el SC presentó un comportamiento intermedio entre estos dos suelos.

Los K_i medidos en la 1° lluvia respecto de los medidos en la 2° lluvia aumentaron para SV y SC, mientras que el SBB mantuvo la misma erodabilidad. El comportamiento de SBB se debe a que, a medida que se fue saturando, el escurrimiento aumentó proporcionalmente más que la pérdida de suelo.

Los K_{ib} calculados por la ecuación (2) presentaron diferencias muy altas con los K_i medidos, tanto para la 1° y 2° lluvia. Los K_{ib} calculados por la ecuación (2) son de 2,5 a 7 veces más altos que los K_i medidos a campo; por lo tanto, de acuerdo a estos resultados, podemos pensar que la ecuación del modelo sobre estima la susceptibilidad a la erosión de estos suelos. En este sentido, Duiker *et al.* (2001), trabajando con suelos de España, encontraron que el factor de erodabilidad de la WEPP sobrestimaba de 2 a 4 veces la susceptibilidad a la erosión. Los autores adjudican este comportamiento a las altas tasas de infiltración y pérdidas de suelo bajas, condiciones similares a las del presente trabajo. También llama la atención que el K_{ib} del SV fue el más bajo, cuando en la práctica fue el más alto; encontramos una explicación posible en el hecho que el modelo WEPP, para estimar el K_{ib} , sólo tiene en cuenta la arena muy fina, y si bien el SV tiene alto contenido de arenas y especialmente de arena fina, tiene baja proporción de arenas muy finas, mientras que SC y SBB tienen mayor proporción de arenas muy finas. Este comportamiento nos hace pensar que, en situaciones de suelos muy arenosos nos hace pensar que, en situaciones de suelos muy arenosos las estimaciones del K_{ib} no son confiables.

Tabla 5. Valores de erodabilidad del suelo medidos y calculados según el modelo WEPP.

Table 5. Measured and calculated WEPP interrill erodibility.

Suelo	WEPP- k_i (de ec, (1))		K_{ib} [de ec, (2)],
	$(10^6 \text{ kg s m}^{-4})$		
	1° Lluvia	2° Lluvia	
SC	1,62 a	2,16 ab	10,2 b
SBB	1,39 a	1,39 a	10,2 b
SV	1,91 a	3,08 b	6,2 a

En cada columna letras distintas indican diferencia significativa entre los suelos (Tukey, $P < 0,05$).

En la Tabla 6 se muestran los IE, calculados con datos de las parcelas experimentales y empleando la ecuación (3), y en la Tabla 7 los K estimados según la ecuación (4) mediante parámetros generales de los tres suelos.

Los valores de IE, para ambas lluvias, fueron significativamente más altos para el SV que para SC y SBB; estos últimos no difirieron entre sí. Para los tres suelos el IE fue siempre más alto en la 2° lluvia.

Respecto a la estimación del K, mediante la ecuación (4), indican Wischmeier & Mannering (1969) que sus resultados pueden ser imprecisos cuando los suelos tienen más del 65% de arenas o más del 35% de arcilla. En este caso, el SV y el SBB poseen más del 65% de arenas, mientras que el SC está en el límite. Por lo tanto creemos que, en suelos de textura franco arenosa, la ecuación (4) debería ajustarse a esas condiciones. También se debe destacar que el índice K tiene en cuenta la erosión anual laminar (interril erosion) y en surco (rill erosion), mientras que en nuestro experimento solo se midió erosión laminar de eventos aislados.

Tabla 6. Valores de Índice de erosión (IE).

Table 6. Erosion index (EI).

Suelo	(IE) [de ec. (3)] (Mg MJ ⁻¹)	
	1° Lluvia	2° Lluvia
SC	0,12 a	0,30 a
SBB	0,04 a	0,17 a
SV	0,28 b	0,50 b

En cada columna letras distintas indican diferencia significativa entre los suelos (Tukey, P<0,05).

Tabla 7. Parámetros edáficos utilizados para estimar el K (USLE),

Table 7. Soil parameters used to predict K (USLE).

Suelo	Características del horizonte superficial				Permeabilidad del perfil	K estimado Mg ha h ha MJ mm
	L+Amf ^a	Ar ^b	%MO ^c	Estructura ^d		
SC	68,7	15,1	2,24	Bls;m-fi;mo (Código 4)	Moder, Lenta (Código 4)	0,063
SBB	59,1	31,4	2,30	Bls;m-fi; d (Código 4)	Moderada (Código 3)	0,053
SV	41,3	49,8	1,46	Bls;m-fi;md (Código 4)	Moder, a rápida (Código 2)	0,040

Ref: ^a % Limo+% arena muy fina; ^b % arena de 0,10-2 mm; ^c MO: materia orgánica;

^d Bls: Bloques subangulares; m: medios, f: finos; mo: moderados, d: débiles, md: muy débiles.

CONCLUSIONES

Para las dos lluvias, la pérdida de suelo fue mayor en SV, luego en SC y menor en SBB.

Las propiedades del suelo CO, arena muy fina y la relación limo/arcilla correlacionaron con las pérdidas de suelo medidas en la 1° lluvia, mientras que la estabilidad estructural y el limo lo hicieron con los registros de erosión de la 2° lluvia.

Las tasas de escurrimiento y sedimento en la 1° lluvia fueron mayores en el SV, comportamiento atribuido al rápido sellado del horizonte superficial debido a su baja estabilidad. En la 2° lluvia los tres suelos presentaron similares tasas de escurrimiento, aunque los incrementos de una lluvia a la otra fueron de 26, 74 y 205% para SV, SC y SBB, respectivamente. Estas diferencias son debidas principalmente a que se demandó mas energía para dispersar los agregados del suelo y desarrollar el sellado superficial en SC y SBB consecuencia de la mejor estructura de estos suelos. En cuanto a los sedimentos el SBB registró las menores tasas en ambas lluvias consecuencia de la buena estabilidad estructural.

Los resultados de la erodabilidad entre surcos (K_i) del modelo WEPP obtenidos experimentalmente, coinciden con los encontrados por otros investigadores en situaciones similares. En nuestro caso, los K_i de los registros de la 1° lluvia no tuvieron diferencias significativas para los distintos suelos, pero sí los emergidos de la 2° lluvia para SV y SC respecto de SBB. Los índices de erodabilidad estimados (K_{ib}) para el modelo WEPP, a partir del porcentaje de arena muy fina, fueron 2,5 a 7 veces mayores que los K_i y sorpresivamente tuvieron el menor valor para el SV que fue el más erosionado experimentalmente.

En el marco de la USLE, los índices de erosión (IE), resultantes de las parcelas de escurrimiento, aumentaron significativamente de la 1° a la 2° lluvia. El factor de erodabilidad (*K*) promedio de la estimación discrepó de los valores IE, confirmando que la USLE tiene predicciones poco confiables en suelos con el 65% o más de arenas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Técnico superior en Suelos y Aguas Martín P. De Lucia por su activa colaboración en tareas de campo y laboratorio y a la Lic. María del Carmen Blanco por la traducción del resumen. Este trabajo fue financiado por los proyectos PICT No. 08-4003 y 24/A107 de la UNS.

BIBLIOGRAFÍA

- Adema, EO; FJ Babinec & N Peinemann. 2001. Pérdida de nutrientes por erosión hídrica en dos suelos del Caldenal Pampeano. *Ciencia del Suelo* 19: 144-154.
- Alberts, EE; MA Nearing; MA Weltz; LM Risse; FB Piersin; XC Zhang; JM Laflen & JR Simanton. 1995. Soil Component Chapter 7. USDA-Water Erosion Prediction Project. NSERL Report N° 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana 47907.
- Barthés, B & E Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47: 133-149.
- Buschiazzi, DE; SB Aimar & K Stahr. 1995. Factores que afectan la estabilidad estructural de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central (Argentina). *Ciencia del Suelo* 13:66:69
- Da Veiga, A & EE Noailles Bosch. 1993. Susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica en la subregión Pampa Ondulada (Factor K). XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza. pag. 297-298.
- De Leenher, L & M De Boodt. 1958. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. Proceeding of the International Symposium on Soil Structure. Ghent, Belgica, pp 290-300.
- Díaz-Fierros, F; E Benito Rueda & R Perez Moreira. 1987. Evaluation of the USLE for the prediction of erosion in burnt forest areas in Galicia (NW Spain). *Catena* 14 189-199.
- Duiker, SW; DC Flanagan & R Lal. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. *Catena* 45, 103-121.
- Elliot, JW; AM Liebenow; JM Laflen & KD Kohl. 1989. A Compendium of Soil Erodibility Data from WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 and 1988. NSERL Report N° 3, The Ohio State University, and USDA Agricultural Research Service.
- FECIC. 1988. El deterioro del ambiente en La Argentina. Ed. FECIC.
- Flanagan, DC & MA Nearing. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project. NSERL Report N° 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana 47907.
- Foster, GR; DC Flanagan; MA Nearing; LJ Lane; LM Risse & SC Finkner. 1995. Chapter 11. Hillslope erosion component. USDA-Water Erosion Prediction.
- Gardner, WH. 1986. Water Content; *In: Methods of Soil Analysis, Part 1°, Physical and Mineralogical Methods* (Klute and Arnold ed.) pp 493-544. 2nd ed. Amer. Soc. Agr., Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wisconsin.
- Gee, GW & JW Bauder. 1986. Particle-size Analysis; *In: Methods of Soil Analysis, Part 1°, Physical and Mineralogical Methods* (Klute and Arnold ed.) pp. 2nd ed. Amer. Soc. Agr., Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wisconsin, USA.
- Irurtia, CB & R Mon. 1993. Medición de infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo con microsimulador de lluvia. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza. pp 37-38.
- Irurtia, CB; R Mon & RO Michelena. 1994. Utilización de un microsimulador de lluvia portátil para caracterizar erosionabilidad del suelo mediante un índice energético. *En: Actas de la Reunion Nacional del Comité de Física del suelo. AACS EEA INTA Paraná.* 12 y 13 de setiembre 1994.
- Le Bissonnais, Y. 1990. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. *In: RB Bryan* (Editor), Soil Erosion – Experiments and Models. *Catena Suppl.* 17 : 13-28.
- Loch, RJ & C Pocknee. 1995. Effects of aggregation on soil erodibility: Australian experience. *J. Soil and Water Cons.* 50(5) 504-506.
- Marchena, JA. 2002. Indicadores bióticos y abióticos del deterioro del recurso hídrico en la Cuenca Alta del Río Sauce Grande, Provincia de Buenos Aires, y su dinámica temporal y espacial. Tesis de Doctor en Agronomía. UNS.
- Marelli, HJ; BM de Mir; JM Arce & A Lattanzi. 1984. Evaluación de la erosión hídrica en suelo labrado. *Ciencia del Suelo* V:2 N°1:69-77.
- Marelli, HJ; JM Arce & B Masiero. 1986. Simulador de lluvias para investigación básica en conservación de suelos. Pub. Téc. N° 8, serie: Suelos y Agroclimatología, 15 pp.
- Meyer, LD & WC Harmon. 1979. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers.* 22 100-103.
- Meyer, LD & WC Harmon. 1984. Susceptibility of Agricultural Soils to Interrill Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol.48 1152-1157.
- Morgan, RPC. 1997. Erosión y Conservación del Suelo. Ed. Mundi-Prensa, 343 pp.
- Projet. NSERL Report N° 10. 1989 USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana 47907.
- Richter, M & E Von Wistinghausen. 1981. Unterscheidbarkeit von Humusfraktionen in Böden bei unterschiedlicher Bewirtschaftung. *Z. Pflanzenernaehr Bbodenk.* 144:395-406.
- Santanatoglia, OJ & N Fernández. 1982. Modificación de De Boodt y de Leenher para el análisis de la distribución de agregados y efecto del tipo de embalaje y acondicionamiento de la muestra, sobre la estabilidad estructural. *Rev. de Invest. Agrop.*, vol XVII N° 1 INTA República Argentina.

- Santanatoglia, OJ & N Fernández. 1983. Estabilidad estructural y contenido de gomas microbianas bajo distintos tipos de manejo, en un suelo de la Serie Ramallo (Argiudol Vértico). *Ciencia del Suelo* 1:43-49.
- Silenzi, JC & NE Echeverría. 2001. Superficie con riesgo de erosión hídrica en un sector del Sur bonaerense. I Reunión binacional de ecología. XX Reunión Argentina de Ecología. X Reunión de la Sociedad de Ecología de Chile. Bariloche.
- Silenzi, JC; NE Echeverría; T Grossi; CA Puricelli & G Marrón. 1994. Efectos de la Erosión Hídrica sobre la productividad de un suelo y sus consecuencias en el rendimiento de un cultivo de trigo. III Congreso Nacional de trigo en Bahía Blanca.
- Silenzi, JC; CA Puricelli; NE Echeverría; T Grossi & AG Vallejos. 2000. Degradación y recuperación de dos suelos de la Región Semiárida Pampeana Argentina como resultado de distintos usos y manejos. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Mar del Plata).
- Soil Survey Staff- USDA. 1991. Soil Survey Manual, Handbook 18, 437 p.
- Steel and Torrie. 1960 Principles and procedures of statistics. Tabla A 13.
- Soil Survey Staff- USDA. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System for Classifying Soils, Agriculture Handbook 436, 863 p.
- Tisdall, JM & JM Oades 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Wischmeier, WH & JV Mannering. 1969. Relation of Soil Properties to its Erodibility. *Soil Sci. Soc. Proc.*, Vol. 33, pag 131-136.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agr. Handbook, 537.