

Modelización de la emisión de sedimentos en una cuenca con forestaciones del Noreste Pampeano

Modelization of the sediments emission in a watershed with forestations of Northeast Pampean

Sebastián Ignacio Besteiro ^{1,2}

Fernanda Julia Gaspari ²

Originales: Recepción: 27/06/2011 - Aceptación: 05/05/2012

RESUMEN

En el ámbito de la llanura pampeana tienen lugar procesos degradativos que condicionan la actividad agrícola ganadera, vinculados con la erosión de tipo hídrica superficial. El presente trabajo busca modelar la emisión de sedimentos en una cuenca hidrográfica con forestaciones del Noreste Pampeano. La metodología implementada consiste en aplicar un modelo cartográfico cuantitativo desarrollado en base geoespacial con Sistema de Información Geográfica, apoyado en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE). Se realizó un análisis de validación estadística con ensayos de microsimulador de lluvias a campo, para una lluvia de 30 mm.h⁻¹ de dos años de retorno. Los resultados obtenidos fueron mapas georreferenciados de cada factor de la MUSLE valorizados por color-intensidad, que alcanzan un valor de 33,77 Mg de sedimentos emitidos a la salida de la cuenca, con un coeficiente de correlación de 0,94 y un grado de ajuste de Nash-Sutcliffe de 0,82. Se concluye que el modelo cartográfico generó información espacial precisa de los componentes de la MUSLE para un evento de lluvia concreto. La aplicación del microsimulador de lluvias permitió la obtención de valores reales de emisión de sedimentos, lográndose un alto grado de ajuste. La emisión de sedimentos en la cuenca resultó ser leve a nula.

ABSTRACT

In the context of the pampean plain occur degradative processes related to hydric superficial erosion that affect livestock farming activities. The present contribution aims to model the sediment emission in Northeast Pampean with forestation watershed. The methodology used consist in applying a quantitative cartographic model developed on geospatial bases with an Informative Geographic System, supported in the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE). An analysis of statistic validation was performed with a rain microsimulator in the field, for a rain of 30 mm.h⁻¹ of two years of return. The results are georeferenced maps of each MUSLE factor, valorized by color-intensity, that reaches values of 33.77 Mg of emitted sediments at the end of the watershed, with a correlation coefficient of 0.94 and an adjustment of Nash-Sutcliffe of 0.82. The cartographic model developed gives precise information of the MUSLE components for a concrete rain event. The application of the rain microsimulator allowed obtaining real values of the sediment emission with a high level of adjustment. The sediment emission in the watershed was proved to be scarce or nule.

1 Becario del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) CCT La Plata.
2 Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales. Univ. Nac. de La Plata. Diagonal 113, N° 469. (1900) La Plata. Buenos Aires. sebabesteiro@gmail.com

Palabras clave

MUSLE • SIG • microsimulador de lluvias

Keywords

MUSLE • GIS • rain microsimulator

INTRODUCCIÓN

Una herramienta universalmente utilizada para la estimación de la tasa de pérdida de suelo anual es la establecida por Wischmeier y Smith (36), denominada USLE (Universal Soil Loss Equation). Esta engloba, dentro de los cinco factores intervinientes, todas las características de la cuenca, incluyendo tanto aspectos físicos como características edáficas, geológicas y geomorfológicas, sin olvidar las relacionadas con el clima, y el tipo de manejo y uso del suelo (6). Sin embargo, en este modelo no hay ninguna consideración directa de la escorrentía, aunque la erosión depende del sedimento que es descargado con el flujo y varía con el escurrimiento y concentración de sedimentos (20).

Se ha observado, además, que las tasas de entrega para determinar producción de sedimentos en la USLE se pueden estimar de forma precisa, pero varían considerablemente de un año a otro por efecto de los cambios en la distribución de las precipitaciones (28). Esta incertidumbre se resuelve con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE), propuesta por Williams y Berndt (34), en la cual el factor de la lluvia (R) es reemplazado por un factor de escurrimiento. En particular, este modelo tiene por objeto estimar la producción de sedimentos que genera una tormenta a la salida de una cuenca hidrográfica, concentrándose en las características de escorrentía como el mejor indicador para la predicción de producción de sedimentos (2, 13, 32). La MUSLE aumenta la exactitud de la predicción en la producción de sedimentos (28) y, además, elimina la necesidad de realizar complejos procesos para calcular la energía cinética y la intensidad de las tormentas, de forma aislada durante una serie larga de años (8).

El ámbito de la llanura Chaco Pampeana, considerada como una de las áreas sedimentarias de clima subhúmedo a semiárido más planas del planeta, posee una fracción muy grande del territorio con pendientes suaves e inferiores al 0,1% (19, 30), la vegetación nativa es la pradera y predomina la actividad agrícola ganadera (31), relegando la forestación a ocasionales montes de reparo y cortinas rompevientos. Carlevari y Carlevari (4) consideran que las tierras de la subregión húmeda pampeana son las más aptas del país para un uso agrícola ganadero, debido a sus condiciones ecológicas e hidrológicas. Estas ventajas muchas veces se encuentran condicionadas por procesos degradativos resultantes de malos manejos productivos, incorrectas políticas nacionales y por el avance de la urbanización e industrialización a lo largo de los años (3).

Los procesos degradativos se encuentran relacionados íntimamente con los hidrológicos, que se desarrollan a nivel de cuenca hidrográfica y pueden ser controlados o morigerados gracias al efecto regulador de masas forestales, las cuales permiten amortiguar problemas de erosión hídrica superficial, como también períodos de

inundación, provocando una disminución de la erosión del suelo por intercepción de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial, mejorando la estructura del suelo, la infiltración y acumulación de agua en el mismo (1, 24, 29).

Bajo la hipótesis de que los suelos vinculados con una intensa actividad agrícola ganadera son sensibles a la degradación por erosión hídrica, y manifiestan una disminución de la emisión de sedimentos cuando se encuentran asociados a una cobertura forestal, se plantea el objetivo de modelizar la emisión de sedimentos por erosión hídrica superficial en una cuenca hidrográfica parcialmente forestada del Noroeste Pampeano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio corresponde a la microcuenca del Arroyo La Paloma (MALP), tributaria del Arroyo El Pescado, situada al noreste de la llanura Pampeana. La MALP se ubica dentro del partido de La Plata, provincia de Buenos Aires, 20 km al Sur de dicha ciudad (figura 1). Presenta una cobertura forestal del 5,88 % del total de la cuenca (2141 ha) igual a 126 ha, con especies de Pino y Eucalipto.

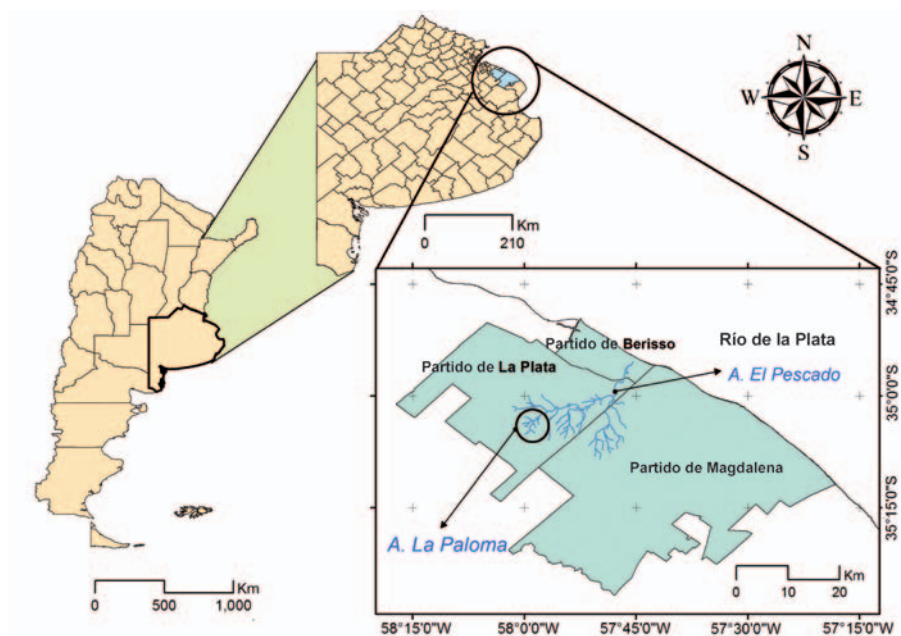


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio, Buenos Aires, Argentina.
Figure 1. Location of the area of study, Buenos Aires, Argentina.

Hurtado *et al.* (15) realizaron una caracterización climática general, en el Centro de Investigaciones de Suelos y Aguas de Uso Agropecuario (CISAUA), para el Partido de La Plata, que indica para el período 1909-2005, una precipitación media anual de 1040 mm, con marzo como el mes más lluvioso (111 mm) y junio el menos lluvioso (63 mm). La temperatura media anual alcanza los 16,2°C, con enero como el mes más cálido (22,8°C de media) y julio el más frío (9,9°C de media). Los vientos predominantes son los del Este, con velocidades medias anuales de 12 km.h⁻¹. Un balance hídrico medio mensual muestra un leve déficit de agua para los meses de verano (7 mm) y un exceso entre fines de otoño y principios de primavera de 241 mm, con una capacidad hídrica del suelo de 200 mm.

El estudio de la emisión de sedimentos espacio temporal por erosión hídrica, para la MALP, se realizó mediante la implementación de un modelo cartográfico cuantitativo desarrollado en base geoespacial con Sistema de Información Geográfica (SIG) y bajo la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE).

La MUSLE es una metodología establecida por Onstad y Foster (27) y Williams (33), con el objetivo de predecir la tasa de erosión hídrica para una cuenca determinada y para un evento pluviométrico específico. En este modelo, el factor **R** utilizado en la USLE es reemplazado por el efecto del flujo de escurrimiento en el proceso erosivo, a través del volumen total escurrido (**Q**) y el caudal pico (**q**) (8).

Los factores que integran este modelo se muestran en la ecuación 1. Corresponden a parámetros hidrológicos, de suelo, relieve, cobertura del suelo y prácticas conservacionistas.

$$Y = 11,8 * (Q * q)^{0,56} * K * LS * C * P \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

Y = representa los sedimentos emitidos por una tormenta aislada en la cuenca (Mg)

Q = volumen de escurrimiento (m³)

q = caudal máximo instantáneo o caudal pico (m³.s⁻¹)

K = factor de susceptibilidad del suelo (Mg.m².h.ha⁻¹.J⁻¹.cm⁻¹)

LS = factor topográfico (adimensional)

L = longitud de pendiente

S = factor de gradiente de pendiente

C = factor de cultivo o cobertura del suelo (adimensional)

P = factor de práctica conservacionista (adimensional)

Cada uno de los factores fue trabajado geoespacialmente en entorno SIG para la conformación del modelo cartográfico. La resolución espacial general de trabajo fue de 30 m, definida por la capa de información de menor resolución utilizada, correspondiente a imágenes Landsat. El detalle descriptivo de cada factor se muestra a continuación:

1) Para el cálculo de los factores **Q** y **q** (volumen total escurrido y caudal al pico), se recurrió a la utilización del modelo HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center (HEC), Hydrologic Modeling System (HMS), caracterizado por ser un modelo hidrológico de

eventos desarrollado por el US Army Corp of Engineers de los Estados Unidos (12), que ha sido diseñado para simular el proceso de precipitación escorrentía de cuencas con drenaje dendrítico y concebido para ser aplicada a un gran rango de situaciones geográficas (7). Los datos de entrada utilizados fueron:

- Superficie de la MALP (km²). Determinada de forma automática en base SIG. Esta determinación requirió el trazado del perímetro de la MALP. El mismo fue realizado en pantalla respetando las divisorias de agua del Arroyo La Paloma, sobre la base de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y la red hidrográfica, ambas en formato digital y georreferenciadas. El cálculo automático en SIG utiliza algoritmos específicos que determinan la superficie encerrada por el polígono en función de su posición geográfica, lo cual es aceptable dado el relieve prácticamente llano de la MALP.
- Tiempo de retraso (T_{lag}). Estimado como $0,6 * Tc$, con Tc como el tiempo de concentración o tiempo que toma la partícula, hidráulicamente más lejana, en viajar hasta la salida de la microcuenca. Existen muchas fórmulas empíricas para estimar el tiempo de concentración de la cuenca (8). La fórmula aplicada en este trabajo se muestra en la ecuación 2:

$$Tc = 0,3 * \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

Tc = tiempo de concentración (hs)

L = longitud de cauce (km)

J = pendiente media del cauce (%)

- Intensidad máxima promedio para un período de retorno de 2 años. Determinada por la metodología de Gumbel, en función de los registros de precipitación diaria de la Estación Experimental J. Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata, correspondientes al período 1998-2009 (Lat. 34° 52' S - Long. 57° 58' W).
- Curva de masa de lluvia. Confeccionada para ese período de retorno (2 años) e igual a 30 mm.h⁻¹, con una duración unitaria de 15 minutos representada de la siguiente forma: 0; 7,5; 15; 22,5; 30 mm.
- Número de curva (NC). Surge de la metodología desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (25), para estimar el escurrimiento superficial a partir de un complejo suelo - vegetación (8). Para su cálculo fue necesario la determinación del grupo hidrológico (GH) y del uso del suelo. El GH se procesó mediante información de suelos y geología de la MALP. El uso del suelo se determinó a través de la interpretación de imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM, de fotos aéreas y su corroboración a campo. Esta cartografía, junto con herramientas SIG, permitió la obtención de un mapa de valores de NC para la MALP y posteriormente, el valor de NC ponderado para la cuenca.

2) El factor K (erosionabilidad del suelo) representa la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado y está relacionado con la textura y estabilidad estructural del mismo (18). Para su cálculo se tomaron los valores granulométricos de Hurtado *et al.* (15) para el partido de La Plata, y se aplicó la ecuación de K simplificada presentada por Mintegui Aguirre y López Unzu (25), ecuaciones 3 y 4:

$$K = 10^{-6} * 2,71 * M^{1,14} * (12 - a) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$M = [(\% \text{ limo} + \text{arena muy fina}) * (100 - \% \text{ arcilla})] \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

M = indica la textura

a = representa el porcentaje de materia orgánica y es igual al % de carbono * 1,724

La elaboración de esta cartografía, en entorno SIG, consistió en la digitalización en pantalla y homologación de cartas de suelos e información digital proveniente de distintas fuentes: Análisis ambiental del partido de La Plata (15), GeoINTA (9), Atlas de suelos de la República Argentina (23) y observaciones a campo.

Esto permitió obtener un mapa de suelos, georreferenciado, en el cual se volcaron los datos granulométricos necesarios para la obtención de los valores K (ecuaciones 3 y 4), y de esta manera su representación geoespacial en forma de mapa digital.

3) El factor LS (factor topográfico) establece el aporte e influencia del relieve a la erosión hídrica superficial (18). Su valor se obtuvo de aplicar la ecuación de LS para pendientes menores al 9% presentada por Wischmeier y Smith (37) y modificada por López Cadenas del Llano (22) (ecuación 5).

El valor de λ proviene de la ecuación propuesta por Williams y Berndt (35) (ecuación 6) y el valor de pendiente (s) fue obtenido de forma automática en entorno SIG a través de curvas topográficas digitalizadas de las cartas 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Estas cartas corresponden a la denominación Gómez (3557-19-2) e Ignacio Correa (3557-20-1), y poseen una equidistancia de 1,25 m.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{0,3} * \left(\frac{0,43 + 0,30 * s + 0,043 * s^2}{6,613} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\lambda = 0,5 * \frac{\Omega}{\Sigma L} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

λ = longitud de la pendiente

s = porcentaje de pendiente

Ω = superficie de la cuenca en km²

L = sumatoria de la longitud total de los cauces expresada en km

El valor de L surge del mapa de la red hidrográfica que se determinó por digitalización en pantalla sobre imágenes de Google Earth®. Fue constatada y corregida en función de puntos de control tomados a campo con un GPS Garmin eTrex Legend H, logrando así un mapa de la situación hídrica muy satisfactorio, del cual se obtuvo el dato de la longitud total de los cauces en km. El valor de α surge automáticamente del SIG, como fue explicado anteriormente, de lo que se desprende un valor de λ único para toda la cuenca. El cálculo de s , es también automático, y se realizó a través de un modelo digital del terreno (MDT) obtenido del mapa de curvas topográficas digitalizado, como se mencionó.

En forma general, se tomaron puntos de control con valores altimétricos dentro de las forestaciones, lográndose una discretización del porcentaje de pendiente a nivel de pixel (resolución espacial de 30 m). A través de la ecuación 5 (página 116) se integran, en forma de mapas, el valor calculado de λ , constante para toda la cuenca, y el mapa obtenido de s , en el cual cada pixel posee un valor. Esto da como resultado la distribución espacial de LS .

4) El factor C (ordenación de cultivos) se describe como la relación entre el valor de pérdidas del suelo en un campo con vegetación o cultivos y las pérdidas ocurridas en un suelo en barbecho, con el resto de las condiciones iguales en ambos casos (18). El factor C surge de valores tabulados para los distintos tipos de cultivo, para lo cual fue necesario consultar tablas publicadas por distintos autores (10, 21, 22, 25, 37) con el fin de obtener los valores más satisfactorios y poder representarlos en el espacio en forma de mapa. Este mapa de C se obtuvo a partir de la definición de los tipos de uso del suelo, inicialmente, para luego asociar estos a los valores tabulados. La definición de los distintos usos del suelo surgen de la observación a campo y su extrapolación a un mapa digital georreferenciado, en el cual se usaron como referencia distintas capas de información tales como: imágenes Google Earth®, fotos aéreas 1:20000 correspondientes al Censo Agropecuario de 1996 e imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM de la página del INPE (16).

5) El factor P (control de erosión mediante prácticas de conservación) considera las distintas prácticas de cultivo y su efecto en la reducción de la erosión (18). Su valor en la MALP se definió como 1, debido a que en el sitio de estudio no se aplican prácticas de conservación.

Microsimulador de llluvias

Para la cuantificación a campo de los sedimentos emitidos para una tormenta de $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, se realizaron un total de 12 ensayos con microsimulador de lluvia en sitios representativos, para su posterior extrapolación espacial a nivel de la microcuenca.

Los sitios representativos corresponden a las diferentes situaciones que expresan la susceptibilidad del suelo a la erosión superficial y usos del mismo, dados por el cruzamiento, en entorno SIG, de los mapas de los factores K y C (figura 2a -pág. 120- y figura 2c -pág. 121). Este cruce determinó 7 áreas de susceptibilidad-uso del suelo, agrupadas según el número de curva (25) en 4 regiones. En cada una de estas y de forma aleatoria, se realizó un ensayo con el microsimulador y dos repeticiones, totalizando los 12 ensayos mencionados.

Las condiciones de humedad antecedentes del suelo al momento de los ensayos con el microsimulador de lluvias corresponden a la categoría II de suelo medio, establecida por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), definida como aquellos en los que el agua de lluvia caída en los 5 a 10 días previos se encuentra en el rango de 12,7 a 38,1 mm (8).

El microsimulador de lluvias ha sido utilizado durante los últimos años para realizar investigaciones sobre erosión y escurrimiento, tanto a campo como en laboratorio (5). Hudson (14) caracteriza los microsimuladores de lluvias como instrumentos de suma utilidad en estudios de infiltración-escurrimiento; además, indica que los microsimuladores resultan idóneos para estudios de erosionabilidad relativa. Irurtia y Mon (17), por su parte, mencionan que los resultados obtenidos con el microsimulador de lluvias son muy satisfactorios.

El microsimulador utilizado, bajo una intensidad de lluvia de 30 mm.h^{-1} , fue desarrollado en el Instituto de Suelos de Castelar - Centro de Investigaciones de Recursos Naturales (CIRN) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Consiste en una estructura de hierro de sección cuadrangular de 50 cm x 50 cm y 1,5 m de altura provista de una base de hierro reforzada de 25 cm, que conforma la microparcela de medición, que se entierra en el suelo a modo de límite de escurrimiento e infiltración.

En la parte superior de esta estructura se coloca una placa con goteros de 0,5 mm de diámetro, alimentada a través de un depósito de agua, que permite la simulación de lluvias con intensidades de 0 a 300 mm.h^{-1} y con una energía cinética de lluvia de $13 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{m}$ (13 kilojoules por m^2 de superficie por metro de lluvia).

Los laterales de la estructura son protegidos con polietileno transparente. Por último, en la base posee un colector de escurrimiento superficial (17), el cual permite, además, estimar la emisión de sedimentos.

El agua colectada de cada ensayo de muestreo fue filtrada en laboratorio para cuantificar el material en suspensión y sedimentos precipitados. Posteriormente, se secó al aire libre y se pesó en una balanza analítica. Los valores de sedimentos medidos para cada una de las 4 condiciones ensayadas se volcaron en el mapa de números de curva y finalmente se obtuvieron las medias ponderadas de sedimentos emitidos para cada condición en la MALP.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis estadístico por medio del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (**E**) (11, 26). **E** es un medio para medir el ajuste entre el valor estimado y el valor medido.

El cálculo de **E**, esencialmente, es la suma de las desviaciones de las observaciones para una regresión lineal cuya pendiente es igual a 1. Si el valor medido es el mismo que el estimado, **E** es igual a 1. Si el **E** está entre 0-1, indica desviaciones entre el valor medido y el estimado. Si es negativo, las estimaciones son muy pobres, y el valor medio de la salida es el mejor estimador que el estimado por el modelo (11, 26).

El coeficiente de eficiencia (E) para los valores estimados y los medidos pueden ser calculados según se muestra en la ecuación 7:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{mea_avg})^2 - \sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{mea_avg})^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ecuación 7}$$

donde:

E = coeficiente de eficiencia (Coeficiente de Nash-Sutcliffe)

Q_m = valor medido

Q_p = valor estimado

Q_{mea_avg} = valor de la media aritmética

RESULTADOS

La cuantificación de los factores de la MUSLE se han desarrollado geográficamente a nivel de la MALP. Para cuantificar la incidencia del caudal líquido en la MUSLE, se alcanzó el resultado parcial de $11,8*(Q*q)^{0,56} = 6760,36$ donde $Q = 44300 \text{ m}^3$ y $q = 1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

En la figura 2 se muestran los mapas generados en SIG. En el mapa del factor K (figura 2a, pág. 120), se representan los valores de erodabilidad del suelo en $\text{Mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ correspondientes a las distintas unidades cartográficas.

Los interfluvios planos con drenaje moderadamente bueno se expresan en color verde con un valor de 0,290; los suelos ubicados en cubetas y áreas plano-cóncavas alcanzan un valor de 0,361 (amarillo); las franjas ligeramente deprimidas con suelos erosionados adquieren un valor de 0,422 (marrón) y los suelos sobre la planicie de inundación presentan un valor de 0,661 (rojo).

El mapa del factor LS (figura 2b, pág. 120), se expresa en una gama de color-intensidad que representa un rango de valores en función de su magnitud. El color rojo, constituye las intensidades máximas (0,082) y el verde, las mínimas (0,032). El factor C (figura 2c, pág. 121) está representado por dos tipos de usos de suelo en la MALP, pastizal natural modificado (0,36) y forestación (0,03).

El factor P se consideró igual a 1 para toda la cuenca y representa la ausencia de prácticas conservacionistas. Todos los coeficientes mencionados fueron considerados al momento de integrar el modelo SIG que expresa el cálculo de la emisión de sedimentos (Y).

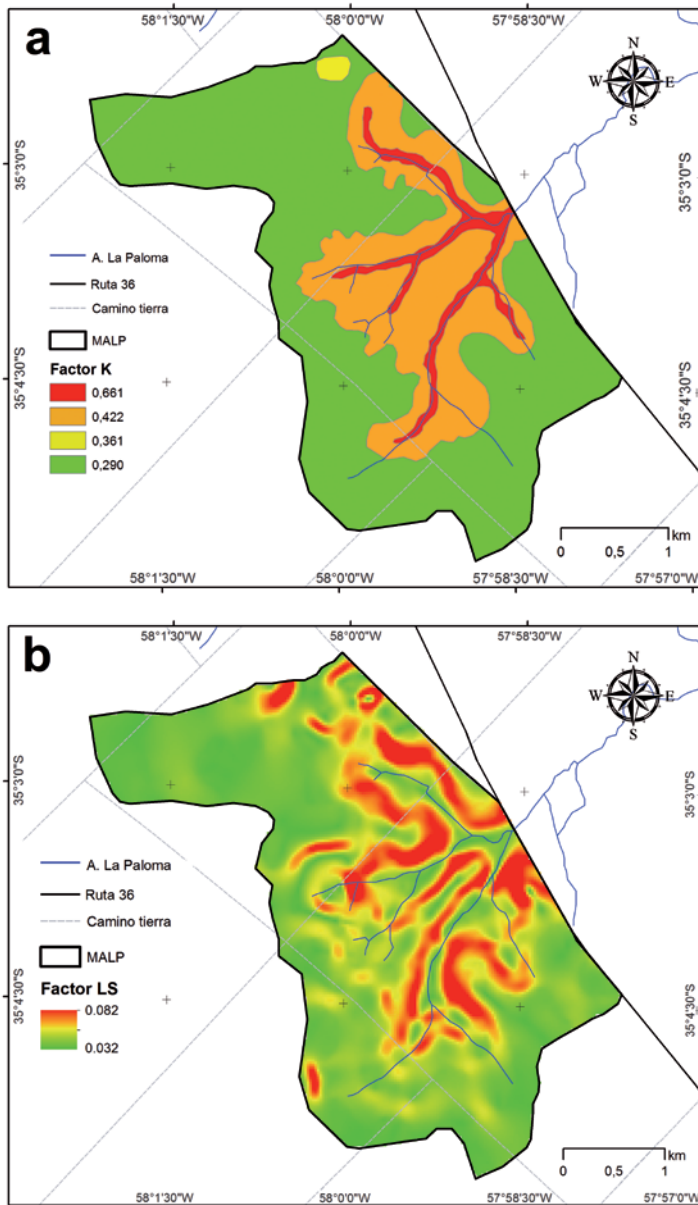


Figura 2. Representación geográfica de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Modificada (MUSLE) en la MALP. **a:** Factor de erodabilidad del suelo (**K**) ($\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$); **b:** factor topográfico (**LS**) (adimensional) y **c:** factor de ordenación de cultivos (**C**) (adimensional).

Figure 2. Geographical representation of the factors of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) in the MALP. **a:** soil erodibility factor (**K**) ($\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), **b:** topographic factor (**LS**) (dimensionless) and **c:** crop management factor (**C**) (dimensionless).

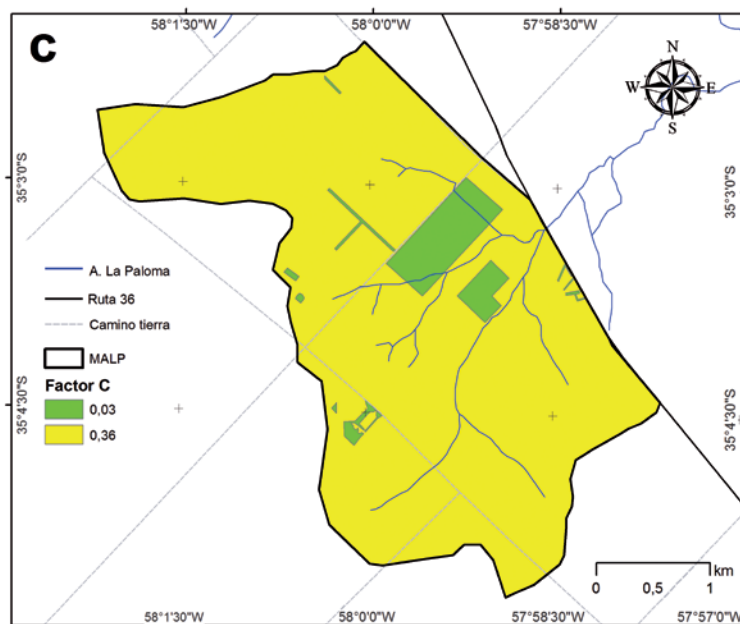


Figura 2 (cont.). Representación geográfica de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo Modificada (MUSLE) en la MALP. **a:** Factor de erodabilidad del suelo (K) ($\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$); **b:** factor topográfico (LS) (adimensional) y **c:** factor de ordenación de cultivos (C) (adimensional).

Figure 2 (cont.). Geographical representation of the factors of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) in the MALP. **a:** soil erodibility factor (K) ($\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), **b:** topographic factor (LS) (dimensionless) and **c:** crop management factor (C) (dimensionless).

En la figura 3 (pág. 122) se muestran los porcentajes de ocupación y valores absolutos de los factores K , LS y C correspondientes a la MALP, interpretando la figura 2 (págs. 120, 121).

Como resultado de la integración de los factores de la MUSLE en entorno SIG y su ponderación por el grado de ocupación espacial, para la Microcuenca La Paloma, se obtuvo un valor de 33,77 Mg de material sólido emitido por erosión hídrica superficial a la salida de la cuenca (Y), correspondiente a una lluvia de 30 mm.h^{-1} , con un período de retorno de 2 años.

Gaspari *et al.* (8) indican la conveniencia de contar con tablas de clasificación en rangos de pérdida de suelo, particulares para cada región. En la MALP actualmente no se dispone de dicha información; sin embargo, con la metodología planteada en este trabajo, es posible estimar la emisión de sedimentos para un evento de lluvia extremo de 2 años de recurrencia, en $0,0082 \text{ Mg.ha}^{-1}$ para la condición de uso de pastizal modificado (94,12 % de ocupación) y de $0,0053 \text{ Mg.ha}^{-1}$ para la forestación (5,88 % de ocupación). Estos valores, si bien son bajos, dejan de manifiesto el efecto de las forestaciones en la disminución de la erosión de tipo laminar, lo cual corrobora lo expuesto por Ameghino (1); Mármol (24) y Pritchett (29).

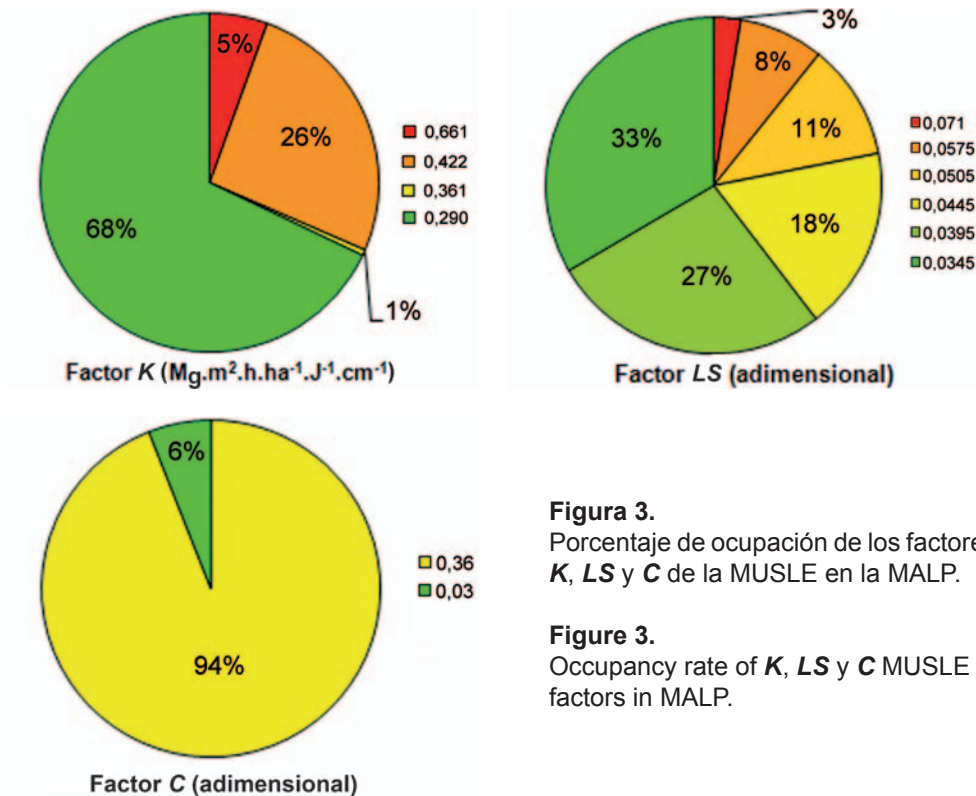


Figura 3. Porcentaje de ocupación de los factores *K*, *LS* y *C* de la MUSLE en la MALP.

Figure 3. Occupancy rate of *K*, *LS* and *C* MUSLE factors in MALP.

Microsimulador de llluvias

La implementación de este instrumental refleja el modo en que las características del complejo suelo-cobertura inciden sobre el efecto de las gotas de lluvia, la infiltración y el transporte de material sólido y líquido sobre el terreno, tratándose además, de una determinación rápida y sencilla que puede repetirse en el campo varias veces y a un bajo costo relativo. Los ensayos fueron desarrollados de forma aleatoria en las 4 regiones seleccionadas como áreas representativas de susceptibilidad-usos del suelo o complejos suelo cobertura y representados a través de los números de curva (NC) (figura 4b, pág. 123).

El mapa de grupos hidrológicos (figura 4a, pág. 123) vislumbra una situación hidrológica comprometida para la actividad agrícola ganadera, dado su deficiente capacidad de infiltración que, potenciado por un paisaje de escasas pendientes, facilita situaciones de anegamientos prolongados. El grupo hidrológico C incluye los suelos poco profundos que presentan escasa permeabilidad al estar saturados. El grupo D está caracterizado como arcilloso profundo, con una capa de arcilla muy cerca de la superficie, donde el escurrimiento superficial es máximo. Los NC, representados en la figura 4b (pág. 123), surgen de la metodología desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (25), en la cual los valores 73 y 79 consignados en verde y violeta, respectivamente, se asocian a forestaciones concentradas a la salida de la microcuenca, caracterizada en gran parte por poseer los mayores problemas de impermeabilidad del suelo, asociados al grupo hidrológico D (figura 4a).

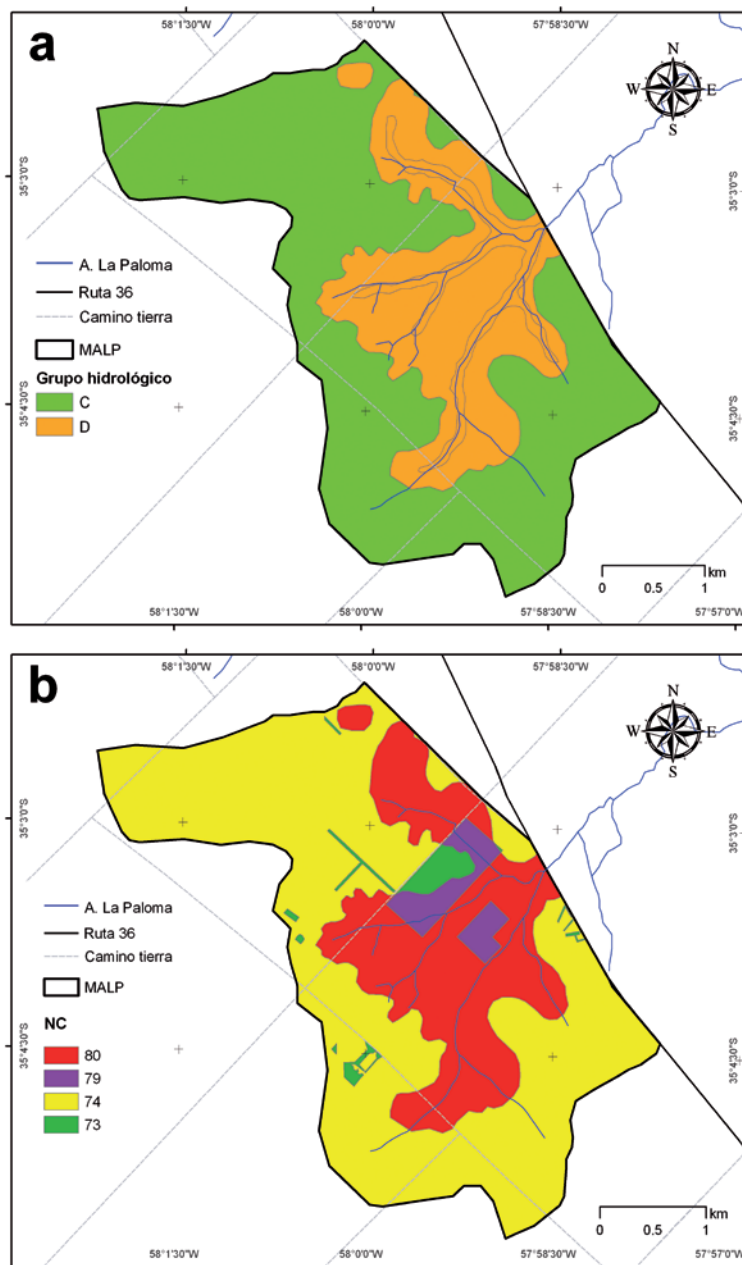


Figura 4. a: Grupos hidrológicos asociados al mapa de NC; **b:** Representación geográfica de las 4 regiones ensayadas con el microsimulador de lluvia, mostrando el valor de CN correspondiente.

Figure 4.a: Groups associated to the hydrological map of NC; **b:** Geographical representation of the 4 regions tested with microsimulador rain, showing corresponding CN value.

Los NC de 74 y 80 indicados en amarillo y rojo, respectivamente, abarcan zonas de alta productividad en las que la agricultura cubre la mayor cantidad de superficie, y es frenada por zonas de baja productividad asociadas al pastizal natural modificado con ganadería extensiva como única actividad (grupo hidrológico C) (figura 4a, pág. 123).

La emisión de sedimentos obtenida de las simulaciones para los dos casos contemplados es de $0,0057 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para la forestación y $0,0093 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para el pastizal natural modificado. Estos valores son muy bajos y representan una erosión hídrica de tipo laminar despreciable.

Análisis estadístico

Los sedimentos modelizados por la metodología MUSLE fueron validados a campo con la aplicación del microsimulador de lluvia con un grado de ajuste expresado por un coeficiente de correlación igual a 0,94 y el coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,82 (figura 5), indicando que el modelo MUSLE estima satisfactoriamente la emisión de sedimentos en la MALP, para un evento hidrológico determinado.

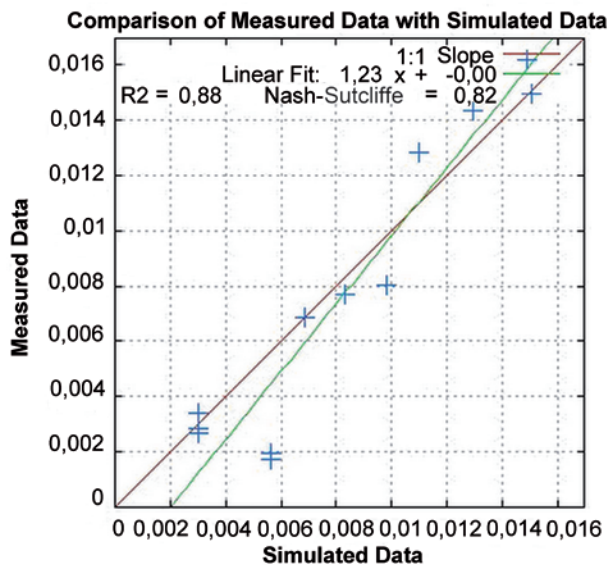


Figura 5. Suma de desviaciones de las observaciones para una regresión lineal de pendiente 1. Medida del ajuste entre 12 valores estimados y 12 medidos (<https://engineering.purdue.edu/~what/>).

Figure 5. Sum of deviations from the observations to a linear regression slope equal to 1. Measure of the fit between 12 simulated data and 12 measured (<https://engineering.purdue.edu/~what/>).

Es necesario tener en cuenta, sin embargo, que en el caso de suelos frágiles con pendientes más elevadas, se deben esperar valores de erosión más altos y con una pobre correlación entre el modelo y el simulador.

Esto responde a que los ensayos con microsimulador de lluvias son de tipo puntual, donde no actúa el factor de longitud de pendiente, y no siempre se obtiene una correspondencia adecuada con el comportamiento general del terreno.

Es necesario, por este motivo, incrementar en lo posible el número de ensayos realizados a campo y así obtener una caracterización convenientemente de toda la variabilidad del área de estudio.

Además, debe tenerse en cuenta que la discretización de los datos de emisión de sedimentos, modelados a nivel de pixel para su representación geoespacial, constituye una generalización del dato de emisión de sedimentos a la salida de la cuenca. Esto permite su comparación frente a los datos medidos y su utilización para la zonificación de áreas según potenciales erosivos.

CONCLUSIONES

La implementación de un modelo cartográfico cuantitativo desarrollado en base SIG permitió la generación de información digital que compone la base de datos georreferenciada de la microcuenca. La misma facilitó, además, una identificación precisa de los componentes de la MUSLE en el espacio y para un evento de lluvia concreto, lo que hace posible implementar futuros análisis multitemporales incorporando todos los eventos hidrológicos de una serie larga de años.

La aplicación del microsimulador de lluvias permitió obtener valores reales de emisión de sedimentos por erosión hídrica superficial en la MALP, para validar a campo los datos estimados a través del modelo MUSLE, aplicado en gabinete.

El contraste de los resultados modelizados de erosión hídrica, frente a los obtenidos con el microsimulador de lluvias, muestra un alto grado de ajuste, lo cual faculta a esta metodología de trabajo como una sólida herramienta para su utilización a nivel diagnóstico en la llanura Chaco Pampeana, donde las pendientes son muy suaves y los procesos de erosión de tipo laminar reducidos.

Los valores de emisión de sedimentos en la MALP, resultaron ser leves a nulos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ameghino, F. 1884. Las secas y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires. Obras de retención y no obras de desagüe. Secretaría de Política Ambiental, Buenos Aires. 97 p.
2. American Society of Civil Engineers (ASCE). 1970. Sediment sources and sediment yields. J. Hydraul. Div. ASCE 96(HY6): 1283-1329.
3. Besteiro, S. I. 2010. Incidencia de la cobertura forestal sobre la dinámica del agua en la cuenca alta del Arroyo El Pescado, partido de La Plata. Tesis de Maestría, Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 125 p.
4. Carlevari, I. J. F.; Carlevari, R. D. 2007. 14° Ed. La Argentina, Geografía económica y humana. Buenos Aires, Argentina. Ed Alfaomega Grupo Editor Argentino S. A. 543 p.

5. Delgado, M. I. 2009. Estudio de la dinámica del ciclo hidrológico en sitios forestados, en el Sistema Serrano Bonaerense de Ventania, Argentina. Tesis de Maestría, Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Argentina. 180 p.
6. Delgado, M. I. 2010. Modelización de la pérdida de suelo en sierras del Sudeste de la Provincia de Buenos Aires. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 42(2): 1-14.
7. Feldman, A. D. 2000. Hydrologic Modeling System HEC - HMS Technical Reference Manual. US. Army Corps of Engineers R & D. 158 p.
8. Gaspari, F. J.; Senisterra, G. E.; Delgado, M. I.; Rodríguez Vagaría, A. M.; Besteiro, S. I. 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. La Plata. Ed. Gaspari. 321 p.
9. GeoINTA. © Copyright 2008. INTA. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://geointa.inta.gov.ar/03/11/2010>.
10. Gil Ribes, J. A.; Blanco Roldán, G. L.; Rodríguez Lizana, A. 2004. Técnicas de Agricultura de Conservación. España. Ed. Mundi-Prensa. 168 p.
11. Grunwald, S.; Frede, H. 1999. Using the Modified Agricultural Non-point Source Pollution Model in German Watershed. Catena, Vol. 37: 319-328.
12. HEC-HMS. 2011. Department of The Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic. Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/>. 25/04/2011.
13. Hrisanthou, V. 2005. Estimate of sediment yield in a basin without sediment data. Catena 64: 333-347.
14. Hudson, N. W. 1997. Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68). Ed Silsoe Associates, Ampthill, Bedford, Reino Unido. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s00.htm#Contents>.
15. Hurtado, M. A.; Giménez, J. E.; Cabral, M. G. 2006. Análisis ambiental del partido de La Plata: Aportes al ordenamiento territorial. Buenos Aires: Consejo Federal de Inversiones. 134 p.
16. INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2011. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponible en: http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/index_pt.php. 05/11/2010.
17. Irurtia, C. y R. Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Publicación N°. 176. Instituto de suelos. INTA Castelar. 19 p.
18. Irurtia, C.; Cruzate, G.; Gaspari, F. J. 2007. Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica: Guía de divulgación técnica. Buenos Aires. 25 p.
19. Jobbágy, G. E.; Santoni, S. C.; Baldi, G. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. Ecología Austral. Asociación Argentina de Ecología. Vol. 18: 305-322.
20. Kinnell, P. 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. Hydrological process DOI: 10.1002/hyp.5816. Vol. 19: 851-854.
21. Kirkby, M. J.; Morgan, R. P. C. 1994. Erosión de Suelos. México D.F. Ed. Limusa, Noriega Editores. 375 p.
22. López Cadenas del Llano, F. 1998. Restauración Hidrológico Forestal y control de la Erosión. Ingeniería Ambiental. Tragsa-Tragsatec, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España. Ediciones Mundiprensa. 945 p.
23. Maccarini, G. D.; Baleani, O.; Cruzate, G.; Puentes, M. I.; Chiavetta, C.; Aliaga, F.; Franzbaun, F.; Mobilia, N.; Alfieri, A.; Viale, J. C. 1995. Atlas de suelos de la República Argentina. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Aeroterra S.A., Convenio de vinculación tecnológica, Fundación ArgenINTA. Soporte digital.
24. Mármol, L. A. 2006. Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. 287 p.
25. Mintegui Aguirre, J. A.; López Unzú, F. 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 p.
26. Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
27. Onstad, C. A.; Foster, G. R. 1975. Erosion modeling on a watershed. Transactions of the A.S.A.E. Michigan. p. 288-292.
28. Pandey, A; Chowdary, V. M.; Mal, B. C. 2009. Sediment yield modeling of an agricultural watershed using MUSLE, remote sensing and GIS. Paddy Water Environ. DOI: 10.1007/s10333-009-0149-y. 7: 105-113.
29. Pritchett, W. L. 1991. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. México. DF. Ed. Limusa, S. A. 634 p.

30. Rojo, A.; Laurencena, P.; Kruse, E.; Deluchi, M. 2008. Particularidades de la relación aguas subterráneas-aguas superficiales en un sector del noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea y Expo Agua 2008. Quito, Ecuador. 7 p.
31. Viglizzo, E. F.; Frank, F. C.; Carreño, L. 2006. Situación Ambiental en las Ecorregiones Pampa y Campos y Malezales. La Situación Ambiental Argentina 2005. Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires. p. 263-269.
32. Williams, J. R. 1975a. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, ARS.S-40, U.S. Government Printing Office, Washington. p. 244-252.
33. Williams, J.R. 1975b. Sediment routing for agricultural watersheds. Water resources bulletin. American resources association.11(5): 965-974.
34. Williams, J. R.; Berndt, H. D. 1972. Sediment yield computed with universal equation. J. Hydraul. Div. Proc. Am. Soc. Civil Eng. 98: 2087-2098.
35. Williams, J. R.; Berndt, H. D. 1976. Determining the Universal Soil Loss Equations's length-slope factor for Watersheds. Soil Conservation Society of America, Iowa. p. 217-225.
36. Wischmeier, W.H.; Smith, D. D. 1965. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains Agriculture Handbook 282. USDA_ARS.
37. Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. 1978. Predictin rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 537. 58 p.