

Ajuste del modelo de erosión WEPP para un Argisol Subéutrico y un Brunosol Éutrico en el Uruguay

Jorge Gabriella¹, Pérez Bidegain Mario^{1*}, Terra Jose², Sawchik Jorge²

¹ Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. *Correo electrónico: mperezb@fagro.edu.uy

² Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA-Uruguay

Recibido: 27/8/14 Aceptado: 5/5/15

Resumen

Los modelos de estimación de erosión son herramientas útiles para la planificación de sistemas productivos sustentables. El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) estima erosión laminar y en canalículos, así como la carga y deposición del sedimento, con distribución temporal y espacial. Esto permite estimar no sólo los efectos *in situ* sino también los efectos fuera del sitio, como ser deposición en cauces de agua, pudiéndose aplicar en estudios ambientales. Si bien este modelo está basado en los procesos físicos que ocurren en el suelo, es preciso realizar ajustes sitio-específicos. El objetivo de este estudio fue ajustar el modelo WEPP, para suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste y lomadas del este del Uruguay. Se utilizaron datos de parcelas experimentales de escurrimiento de INIA La Estanzuela y Palo a Pique, y se compararon los valores de erosión estimados por WEPP y USLE/RUSLE con los medidos en términos de promedios anuales. Además se contrastó la erosión estimada con WEPP con la medida a escala anual. WEPP estimó la erosión de ambos sitios con alto nivel de precisión, comparable al de USLE ($R^2=0,97$ y $0,98$ respectivamente). El índice Nash-Sutcliffe de $0,92$ indica que su desempeño es muy bueno. Para continuar esta línea de investigación resulta necesario realizar medidas de variables físicas del suelo o desarrollar ecuaciones de pedotransferencia alternativas.

Palabras clave: simulación, erosión, modelos, ajuste de parámetros sensibles

Summary

WEPP Soil Erosion Model Adjustment for an Abruptic Argiudoll and a Vertic Argiudoll in Uruguay

Erosion estimation models are helpful tools for planning sustainable agriculture systems. The model Water Erosion Prediction Project (WEPP) estimates rill and interrill erosion, as well as sediment load and deposition, including temporal and spatial distribution. This enables the estimation of both in-site and off-site effects such as deposition in water bodies, making it useful for environmental studies. Although this model is based on the physical processes that occur in the soil, site-specific adjustments are needed. The aim of this study was to adjust the WEPP model for the representative Uruguayan agriculture soils of the West coast and East rolling plains. We used the data base of the runoff plots from INIA La Estanzuela y Palo a Pique, and we compared erosion values estimated with WEPP and those estimated with USLE/RUSLE, in terms of annual means. In addition, erosion estimated with WEPP was compared with the data measured at an annual scale. WEPP estimated erosion with high precision in both sites, comparable to USLE ($R^2=0.97$ and 0.98 respectively). A Nash-Sutcliffe value of 0.92 indicates a very good performance. To continue this research line, measures of local soil physical variables or the development of alternative pedotransfer equations will be needed.

Keywords: simulation, erosion, models, calibration of sensitive parameters

Introducción

La erosión es uno de los principales problemas ambientales en Uruguay y el mundo. El suelo es un recurso no renovable y la erosión tiene impactos negativos sobre la seguridad alimentaria, los recursos energéticos y los ambientes biofísicos en lo que respecta a la biodiversidad, el efecto invernadero y la calidad de agua (Lal, 1999). El riesgo de erosión es mayor en suelos pobres o ya degradados, con horizontes A poco profundos, y puede implicar el aumento del uso de insumos para mantener la productividad y por tanto de los costos de producción (Pierce, 1991).

Dado el impacto ambiental y económico que genera la erosión, resulta importante contar con herramientas objetivas de predicción para la planificación de uso y manejo del suelo tendiente a su conservación. El modelo más utilizado históricamente en Uruguay ha sido la Ecuación Universal de Pérdida de suelo (USLE por su sigla en inglés) y su versión revisada (RUSLE). USLE es un modelo empírico para el cual se calcularon relaciones entre las variables y las pérdidas de suelo por erosión por medio de análisis de regresión múltiple a partir de resultados de miles de experimentos (Durán y García-Préchac, 2007). Si bien es simple de usar, presenta ciertas limitantes: requiere experimentación previa para cada clima, suelo y manejo, y sus resultados no pueden ser extrapolados a sitios con otras características. Además, permite estimar tasas de erosión promedio anual pero no erosión de eventos individuales. Tampoco puede utilizarse para estimar erosión a nivel de cuenca, ya que la estima sólo a nivel de ladera. Finalmente, no toma en cuenta la erosión encauzada en pequeños canalículos ni la sedimentación (Tiwari *et al.*, 2000).

El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) representa una tecnología de simulación de escurrimiento y erosión basada en los procesos físicos que ocurren en el suelo. Fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) a partir de 1985, con el objetivo de levantar algunas limitantes del modelo USLE, en particular la de poder extrapolar sus estimaciones a situaciones para las cuales no se cuenta con datos. Este modelo, de estudio incipiente en Uruguay (Jorge *et al.*, 2011; Jorge, 2012), estima la erosión laminar y en canalículos, así como la carga y deposición del sedimento, con su distribución temporal y espacial (Flanagan y Nearing, 1995). Su modo de funcionamiento básico es el siguiente: estima diariamente estado del suelo y de la vegetación; si hay precipitación (lluvia o riego), calcula infiltración y escurrimiento; y con ello, calcula desagregación, transporte y deposición del sedimento. En particular, estima el total de suelo desagre-

gado por la lluvia y por el escurrimiento y lo compara con la capacidad de transporte total de la lluvia y de la escorrentía, si la segunda supera el primero, habrá erosión, de lo contrario ocurrirá deposición (Flanagan y Nearing, 1995), siguiendo el esquema original de los procesos de erosión hídrica (Morgan, 2005). Los principales datos de entrada incluyen el clima, las precipitaciones, la topografía, el suelo y el manejo agronómico. Puede emplearse con datos climáticos observados o generados por el generador climático CLIGEN, desarrollado para este modelo. Algunos de los datos de suelo pueden ser estimados por el modelo empleando distintas funciones de pedotransferencia en base a otros datos del suelo y referidos a bases de datos compiladas por USDA.

Si bien WEPP se basa en los procesos que ocurren en el suelo, cada una de las ecuaciones que lo componen, las cuales representan estos procesos, incluyen componentes empíricos (Haan *et al.*, 1982). Una revisión de Jorge (2012) constata que numerosos autores recomiendan no extrapolar este modelo a otros sitios con tipos de suelos y climas diferentes sin previo ajuste, calibración o medición de los parámetros reportados como sensibles. Estos autores presentan una crítica a las ecuaciones de pedotransferencia utilizadas para el cálculo de estos parámetros sensibles en el entendido que estas pueden ser sitio específicas, pero no cuestionan aquellas ecuaciones con las cuales WEPP (utilizando estos parámetros) calcula el escurrimiento y la erosión (Jorge, 2012). Recientemente, Reichert y Norton (2013), trabajando con suelos tropicales de Australia, plantearon la necesidad de determinación a campo de los parámetros de erodabilidad para suelos fuera de los Estados Unidos. Destacan en particular el caso de suelos con arcillas esmectíticas, cuya expansión y contracción afectan el comportamiento del suelo de una manera diferencial, lo cual fue discutido a nivel teórico para nuestros suelos en el litoral sur (Jorge *et al.*, 2011).

Los parámetros de WEPP más sensibles son los valores base para la conductividad hidráulica efectiva (K_b), la erodabilidad en los surcos (K_{ib}) —que representa la erodabilidad de un suelo recién laboreado—, la erodabilidad entre surcos (K_{rb}) y el esfuerzo cortante crítico (TC_b), que es un valor umbral por debajo del cual no ocurre erosión del suelo (Nearing *et al.*, 1990; Tiscareno-López *et al.*, 1993). Si bien el modelo WEPP cuenta con ecuaciones para el cálculo de los mismos, en función de la textura, el contenido de C orgánico y la capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial, también es posible modificar el valor de estos parámetros ingresándolo manualmente. El rango de

valores sugeridos para estos parámetros es de 0,002 a 0,050 s.m⁻¹ para Krb; 0,5x106 a 12x106 kg.s.m⁻⁴ para Kib; y de 0,3 a 7,0 Pa en el caso de TCb (Alberts *et al.*, 1995).

Pese a que la necesidad de calibrar o ajustar le quita la ventaja de poder ser extrapolable a localidades sin datos experimentales, WEPP levanta otras limitantes de los modelos empíricos más utilizados (USLE y RUSLE). Por un lado, en lo que respecta al detalle en escala temporal y espacial de las variables de respuesta, y por otro lado en lo que respecta a la precisión de estimación. En el primer caso, considerando que existen pocos eventos de lluvia erosivos durante el año, resulta de interés poder estimar erosión a escalas menores a un año, llegando incluso a eventos individuales, como lo hace WEPP. En el segundo, se ha mostrado que estimaciones con WEPP aún sin calibrar estiman tan bien como USLE y RUSLE (Tiwari *et al.*, 2000; Laflen *et al.*, 2004; Amorim *et al.*, 2010); y calibrando, aún mejor (Stolpe, 2005). Otra ventaja de este modelo es que ofrece una mayor aplicabilidad ambiental, dado que estima también sedimentación y producción de sedimento, pudiendo obtener datos más certeros de aporte de sedimento a los cauces (regímenes de inundación, represas, dragado para navegación) y transporte de nutrientes y contaminantes. Esto implica que no sólo permite estudiar efectos de la erosión dentro del sitio, sino también fuera del mismo (Flanagan y Nearing, 1995; Tiwari *et al.*, 2000).

Actualmente, con el crecimiento de la actividad agrícola en nuestro país, en la que se ha vuelto a sistemas agrícolas continuos, y ahora, con predominio de la soja en la rotación, existe un aumento en la presión ejercida sobre el suelo. Si los fenómenos de escurrimiento y erosión se consideran como problemas ambientales complejos y que afectan al sistema en su conjunto, más allá de la degradación del suelo, que sería apenas uno de los efectos de la erosión (el efecto *in situ*), debe entenderse que este fenómeno no se traduce únicamente en mayores problemas de erosión sino también de contaminación de aguas con nutrientes y agroquímicos. El uso del modelo WEPP ajustado a nuestros suelos permitiría estudiar de forma más global este fenóme-

no, generando información útil para tomar decisiones ambientalmente sustentables en el desarrollo de la producción agrícola de nuestro país.

Nuestra hipótesis de trabajo fue que las estimaciones con WEPP para suelos uruguayos serán aceptables al nivel de las realizadas con USLE. Por lo tanto, nos planteamos como objetivo ajustar el modelo WEPP para suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste y lomadas del este del Uruguay empleando la base de datos nacional existente. El primer objetivo específico fue comparar los valores de erosión anual media estimados con WEPP con los medidos en parcelas experimentales de escurrimiento y con los estimados con USLE/RUSLE, en términos de promedios anuales. El segundo fue contrastar la erosión estimada con WEPP con la medida a escala anual.

Materiales y métodos

Sitios

Se trabajó con datos de escurrimiento y erosión generados en las parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural con diferentes manejos, ubicadas en la Unidad Experimental de INIA-Palo a Pique (PAP, Treinta y Tres; 33° 12' S 54° 22' W), en el período 1995-1997 y en la Estación Experimental de INIA-La Estanzuela (LE, Colonia; 34° 25' S 58° 0' W), en el período 1985-1988. Las características climáticas de ambos sitios se muestran en el Cuadro 1.

Las parcelas de escurrimiento de Palo a Pique estuvieron ubicadas sobre un suelo *Argisol Subéutrico* o *Abruptic Argiudoll*, de la unidad de suelos Alférez, con 3,5 % de pendiente y las parcelas de La Estanzuela sobre un *Brunosol Éutrico* o *Vertic Argiudoll*, de la unidad de suelos Ecilda Paulier-Las Brujas, de 3 % según la Clasificación de Suelos del Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976) y Soil Taxonomy (Durán *et al.*, 1999), respectivamente.

Las parcelas tuvieron 22,1 m de largo por 3,5 m de ancho, según el tipo estándar «Wischmeier» y fueron localizadas con su largo en el sentido de la máxima pendiente.

Cuadro 1. Variables meteorológicas anuales, calculadas a partir de una serie de 30 años, para los sitios experimentales. Fuente: Dirección Nacional de Meteorología.

Sitio	Temp. media anual (°C)	Temp. máx. y mín. absolutas (°C)	Precip. acum. anual (mm)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)
Treinta y Tres	16,8	40,2; -7,6	1292	75	3,2
Colonia	17,4	39,6; -0,7	1099	75	5,3

Los detalles de mediciones de escurrimiento y erosión en las mismas fueron descritas por Hill *et al.* (2008).

Sistemas de uso y manejo

Se contrastaron 10 parcelas en Palo a Pique (1994-1997) y ocho en La Estanzuela (1984-1988), con distintos tratamientos establecidos por diferentes combinaciones de rotaciones de cultivos y pasturas, unas con sistemas de siembra directa y otras con laboreo, incluyendo los controles (testigos) de suelo desnudo y campo natural (Hill *et al.*, 2008).

Preparación de bases de datos y simulación

Se compilaron bases de datos climáticos, topográficos, de suelo y de manejo con los datos disponibles para las parcelas de las estaciones experimentales (campo natural, suelo desnudo, cultivos continuos y rotaciones), correspondientes a los períodos de tiempo considerados, adaptando los archivos a un formato compatible con la versión WEPP 2010.1.¹

Procesamiento de datos de clima

Se emplearon datos climáticos diarios (temperatura del aire máxima y mínima, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, lámina de lluvia diaria e intensidad de lluvia cada diez minutos) para los años 1994 al 1997 del sitio PAP y de 1984 al 1988 del sitio LE, en ambos casos incluyendo el año anterior al periodo de tiempo considerado, ya que en este año se siembran los cultivos de verano cosechados en el primer año de simulación. Estos datos fueron proporcionados por la Unidad de Agro-Clima y Sistemas

de Información (GRAS) del INIA. Los datos climáticos que caracterizan los sitios se presentaron en el Cuadro 1. El Cuadro 2 presenta el detalle de la precipitación acumulada por año para los mismos.

Se verificó que no se simulara congelamiento del suelo, ni que ocurrieran precipitaciones en forma de nieve. Para evitar estos fenómenos fue necesario introducir modificaciones en el archivo climático de INIA LE, en el cual se cambiaron las mínimas por debajo de cero a 0 °C.

Finalmente, se convirtió la velocidad del viento de kilómetros por día a metros por segundo y se calculó la temperatura al punto de rocío utilizando Ecuación 1 (Da Mota, 1981).

$$\sqrt[8]{\frac{HR}{100}} * 112 + (0.9 \bar{T}) + (0.1 \bar{T}) - 112 \quad [1]$$

donde HR es humedad relativa media diaria y T es temperatura media diaria.

Procesamiento de datos de suelo y pendiente

Se completaron los archivos de suelo y pendiente a partir de la base de datos provista por las Estaciones Experimentales y siguiendo el tamaño de la parcela establecido (Hill *et al.*, 2008). Se utilizó el criterio de tomar los valores provistos por los cálculos del modelo para los parámetros de erodabilidad de los canalículos (K_{rb}) y entre canalículos (K_{ib}) (Flanagan y Nearing, 1995). Los parámetros de conductividad hidráulica base (K_b) y esfuerzo cortante crítico (TC_b) se ajustaron manualmente dentro de los rangos sugeridos por los autores (Flanagan y Nearing, 1995) a fin de minimizar las diferencias de los valores de erosión y escurrimiento estimados con los medidos (Hill *et al.*, 2008). En particular en el suelo de PAP, que cuenta con alta diferenciación textural, se utilizó el valor de K_b , calculada según lo sugerido por Jorge *et al.* (2011), con la fórmula de Jury y Horton (2004) en base a las conductividades hidráulicas de cada horizonte, las cuales se hallaron siguiendo las dos fórmulas utilizadas por el modelo WEPP para calcular K_b (conductividad hidráulica base), según el porcentaje de arcilla sea mayor o menor a 40 % (Flanagan y Nearing, 1995).

Procesamiento de datos de manejo

Se crearon archivos para cada rotación, incluyendo actividades de laboreo, siembra, cosecha, corte de pasturas y aplicación de herbicidas, en base a las planillas de actividades proporcionadas por las Estaciones Experimentales. Para aquellos casos en los que no se contaba con

Cuadro 2. Precipitación acumulada anual (PP) en La Estanzuela (LE, Colonia), y en Palo a Pique (PAP, Treinta y Tres). Fuente: INIA-GRAS.

Sitio	Año	PP (mm)
LE	1985	1233,6
	1987	905,7
	1988	1110,1
PAP	1995	1134,5
	1996	884,9
	1997	704,8

¹Disponible en <http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=10621>

información, se simuló un procedimiento de rutina sugerido por el personal de INIA. Las operaciones utilizadas fueron las que se encontraban disponibles en la base de datos de WEPP. Se adaptaron archivos de cultivos a condiciones locales, modificando espacio entre línea y entre plantas, y eficiencia de conversión energética, buscando obtener densidades de siembra y rendimientos cercanos a los medidos, o en caso de no contar con este registro, cercanos a los promedios para esa época en nuestro país (DIEA, 1998; Castro, 1997; Vallo y Zarauz, 1987; Carámbula, 2010; Viega, com. pers.).

Software

Para estimar la pérdida de suelo con el USLE/RUSLE se utilizó el programa EROSION 5.0.² (García Préchac *et al.*, 2005). Para estimar la pérdida de suelo con WEPP se utilizó el componente de laderas (*hillslope*) de la versión WEPP 2010.1.³, con la interface para Windows. El manejo de la base de datos y los análisis estadísticos se realizaron con Microsoft Excel 2007.

Análisis estadísticos

Las medidas anuales de escurrimiento y erosión de los sitios PAP y LE correspondían a 30 y 32 datos, respectivamente, sin repeticiones, para distintas combinaciones de años y parcelas. Con estos datos se contrastaron los valores de escurrimiento y erosión simulados con WEPP para las mismas condiciones climáticas, edafológicas y de manejo. Además, se compararon los promedios anuales medidos con los estimados con USLE y con WEPP.

El ajuste del modelo se realizó evaluándose la precisión con que los datos simulados se correspondieron con los medidos, mediante los siguientes métodos estadísticos: análisis de regresión, el coeficiente de determinación múltiple (R^2), el índice de eficiencia de modelos Nash-Sutcliffe (NS en ecuación 2; adimensional; Nash y Sutcliffe, 1970), la tendencia media de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados (PBIAS, porcentaje, ecuación 3), el error medio absoluto (MAE; dimensional, Ecuación 4) y el intervalo de confianza construido a partir del valor observado (IC_{95} ; Laflen *et al.*, 2004). De esta manera se sigue la recomendación de Legates y McCabe (1999) de combinar la información de al menos un estadístico adimensional, un índice de error absoluto y otra información

adicional con respecto a la dispersión de los datos, conjuntamente con la representación gráfica.

En lo que respecta a la interpretación de los valores de cada estadístico, en el caso de NS, los rangos entre 0 y 1 se toman generalmente como aceptables, aunque para que sea «satisfactorio» Moriasi *et al.* (2007) sugiere, a paso mensual, un valor superior a 0,50; valores superiores a 0,65 y 0,75 indicarían un buen y muy buen desempeño del modelo, respectivamente. Nearing (1998) señala que no debe esperarse que este índice sea mayor a 0,7. Los valores son un poco más o menos exigentes a medida que la escala temporal se expande o reduce. Valores menores a cero indican que la media observada es un mejor estimador que el valor simulado, por lo cual se consideraría no aceptable (Tiwari *et al.*, 2000; Moriasi *et al.*, 2007). En el caso de PBIAS, los valores positivos indican un sesgo hacia la sobreestimación, mientras que en los negativos, el sesgo es hacia la subestimación. Valores cercanos a cero (el óptimo) indicarían una alta precisión de la modelación (Moriasi *et al.*, 2007). Para la producción mensual de sedimentos, los límites para los niveles de precisión satisfactorio, bueno y muy bueno son: 55, 30 y 15 (Moriasi *et al.*, 2007); por lo que en este trabajo se utilizarán esos valores para determinar si el modelo subestima o sobre-estima «aceptablemente», «levemente» o «muy levemente», respectivamente. MAE, al ser dimensional, tiene la magnitud real del error en sus unidades, representando una medida más natural del error medio.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad [2]$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (M_i)} \right] \quad [3]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - S_i|}{n} \quad [4]$$

donde M_i es el i -ésimo valor medido, S_i es el i -ésimo valor simulado, $\bar{M}$ es la media de los valores medidos y n el número de observaciones.

Resultados y discusión

Comparación de promedios anuales de erosión estimados con WEPP y USLE/RUSLE con los medidos en parcelas de escurrimiento

Los valores simulados con WEPP ordenaron la erosión de las parcelas, ubicando en los extremos opuestos a los

²Disponible en el sitio web de la Facultad de Agronomía, Udelar, <http://www.fagro.edu.uy/~manejo/>

³Disponible en <http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=10621>

Cuadro 3. Erosión media anual medida (M) y simulada con WEPP (S) y USLE/RUSLE en los sitios La Estanzuela (LE) y Palo a Pique (PAP)

Sitio	Uso y manejo de parcelas	M Mg/ha	S
L E	Campo natural	0,5	1,74
	SD*	0,84	2,69
	Laboreo**	2,88	3,71
	Suelo desnudo	33,47	25,93
PAP	Campo natural	0,79	1,74
	SD*	1,85	1,91
	Laboreo**	9,60	8,46
	Suelo desnudo	74,42	50,73

* Valor promedio de los tratamientos con Siembra Directa.

** Valor promedio de los tratamientos con Laboreo.

Cuadro 4. Valores ajustados de parámetros de suelo sensibles para cada sitio. Kb=conductividad hidráulica efectiva base; TCb= esfuerzo cortante crítico.

	K _b (mm.h ⁻¹)	TC _b (Pa)
La Estanzuela	6	2,3
Palo a Pique	2,19	3

controles de campo natural y de suelo desnudo. Además simuló menos erosión para las parcelas con siembra directa que para las de cultivo continuo con laboreo mínimo, al igual que ocurre con los datos medidos (Cuadro 3).

En el Cuadro 4 se presentan los valores de los parámetros de conductividad hidráulica base (K_b) y esfuerzo cor-

tante crítico (TC_b) que mejor ajustaron al modelo WEPP dentro de los rangos sugeridos por los autores (Flanagan y Nearing, 1995), ya que el modelo WEPP sin calibrar o ajustar subestima la erosión (Cuadro 5). Luego del ajuste se obtuvo una precisión comparable a la de USLE/RUSLE al considerar ambos sitios (Cuadro 5): R² y NS superan ampliamente el valor mínimo considerado para tomar la modelación como satisfactoria (0,5) y se encuentran entre los valores más altos reportados para WEPP (Nearing *et al.*, 1990; Laflen *et al.*, 2004; Moriasi *et al.*, 2007). Por fuera del intervalo de confianza ($\alpha=0,05$) quedaron 33 % de los valores de erosión anual media simulada, lo cual es menor al 40 % reportado por Laflen *et al.* (2004).

La Figura 1 muestra la precisión de estimación de erosión de los modelos WEPP y USLE para los manejos con niveles de erosión menores a 10 Mg.ha⁻¹ (sin los valores de erosión de los manejos de suelo desnudo y de cultivo continuo en PAP, que generaron las mayores magnitudes). Esta es la única figura que excluye los valores altos de erosión, mientras que las Figuras 2 y 3 se realizaron con todos los valores de erosión estimados y medidos para los años estudiados en cada Estación Experimental. Al analizar los manejos que producen baja erosión por separado, el estadístico NS da resultados no satisfactorios para ambos modelos (-0,70 y -4,68 para WEPP y USLE/RUSLE, respectivamente). Esto es de alguna manera esperable, considerando que este estadístico es muy influenciado por los valores elevados y que el modelo tiene una tendencia a la sobreestimación de valores bajos (Nearing, 1998). Sin embargo, los dos modelos presentan coeficientes de determinación mayores a 0,5 que sería lo esperable (Nearing, 1998; Tiwari *et al.*, 2000; Moriasi *et al.*, 2007) y muy similares entre sí (0,57 y 0,58 para WEPP y USLE/RUSLE, respectivamente). Las estimaciones realizadas con WEPP muestran tener una mayor precisión que las realizadas con USLE/RUSLE, ya que el primero incluye una mayor

Cuadro 5. Estadísticos que evalúan la precisión de estimación de la erosión media anual de los modelos WEPP (sin ajustar y ajustado) y USLE/RUSLE combinando los datos de los sitios La Estanzuela y Palo a Pique.

	USLE/RUSLE	WEPP sin ajustar	WEPP ajustado
NS	0,92	0,59	0,87
R ²	0,98	0,97	0,97
ecuación	Y = 1,1617x + 1,5769	Y = 0,394x + 1,648	Y = 0,656x + 1,835
PBIAS (%)	-32,7	41,94	13,58
MAE (Mg ha ⁻¹)	3,56	5,03	3,56

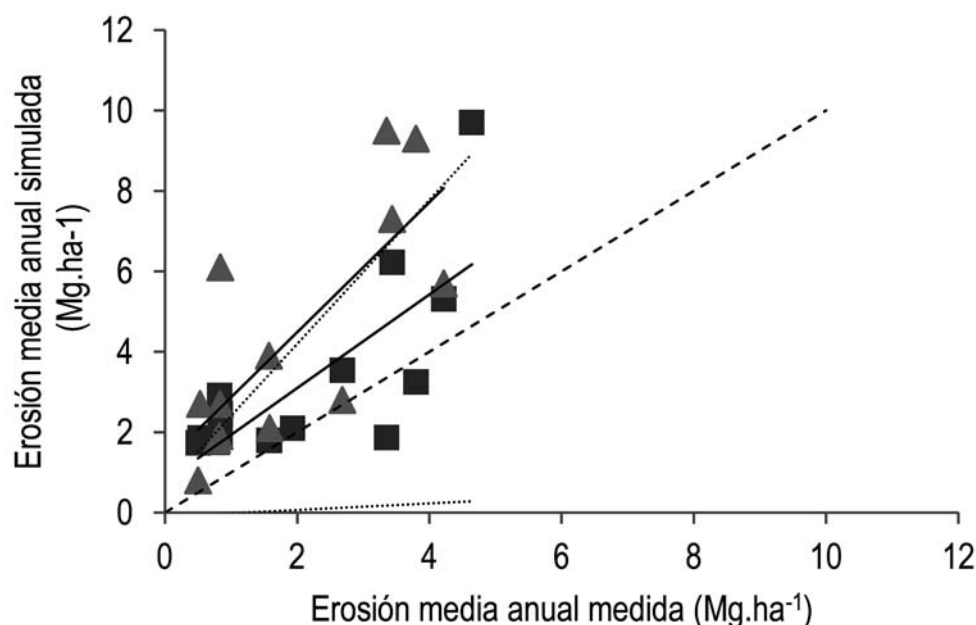


Figura 1. Erosión anual media medida y simulada con WEPP ajustado y USLE/RUSLE en los sitios La Estanzuela y Palo a Pique. **Nota.** WEPP ajustado (cuadrados) y USLE/RUSLE (triángulos). Se representan la relación 1:1 (línea cortada), la línea de tendencia (línea continua) y las líneas de tendencia de los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado según Laflen *et al.* (2004) (líneas punteadas).

Cuadro 6. Estadísticos que evalúan la precisión de estimación de la erosión a escala anual con el modelo WEPP los sitios La Estanzuela (LE) y Palo a Pique (PAP).

	Erosión LE	Erosión PAP
NS	0,86	0,81
R ²	0,90	0,89
PBIAS (%)	-1,52	19,92
MAE (Mg.ha ⁻¹)	3,27	5,4

proporción de manejos dentro del intervalo de confianza propuesto por Laflen *et al.* (2004) (10 en 15), (6 en 13) (Figura 1). Esto significa que se podría realizar estimaciones de erosión de suelo con WEPP en estos suelos y utilizando los parámetros ajustados con la misma o mayor confianza que con USLE/RUSLE, el modelo utilizado en Uruguay hasta el momento.

Comparación de valores de erosión estimados por WEPP a escala anual con los medidos

La erosión a escala anual simulada por el modelo WEPP, con el ajuste realizado, es satisfactoria con un leve sesgo hacia la subestimación en el sitio LE y un muy leve sesgo hacia la sobreestimación en el sitio PAP (Cuadro 6). De acuerdo a los criterios sugeridos por Moriasi *et al.* (2007), la representación de WEPP de la erosión fue muy buena en ambos sitios.

El porcentaje de estimaciones de pérdida de suelo que cayeron fuera del intervalo de confianza establecido según Laflen *et al.* (2004), fue 47 % y 50 % de los casos a escala anual para los sitios LE y PAP, respectivamente. La mayoría de estos corresponden a sobreestimaciones de medidas que no superan 1 Mg.ha⁻¹. En LE, en términos de frecuencia, los años-parcela con erosión sobreestimada superan los subestimados en una relación 15:1, mientras que en términos de magnitud, la pérdida de suelo sobreestimada total es 2.5:1 la subestimada. En PAP los años-parcela con erosión sobreestimada también superan los años con subestimación en una relación 6:1, pero la

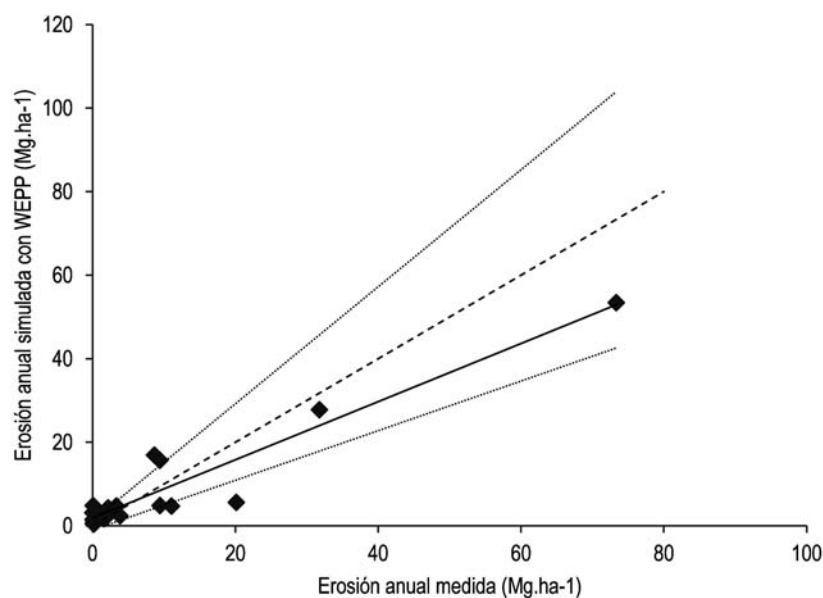


Figura 2. Erosión anual medida y simulada con WEPP en La Estanzuela. **Nota.** Se representan la relación 1:1 (línea cortada), la línea de tendencia (línea continua) y las líneas de tendencia de los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado según Laflen *et al.* (2004) (líneas punteadas).

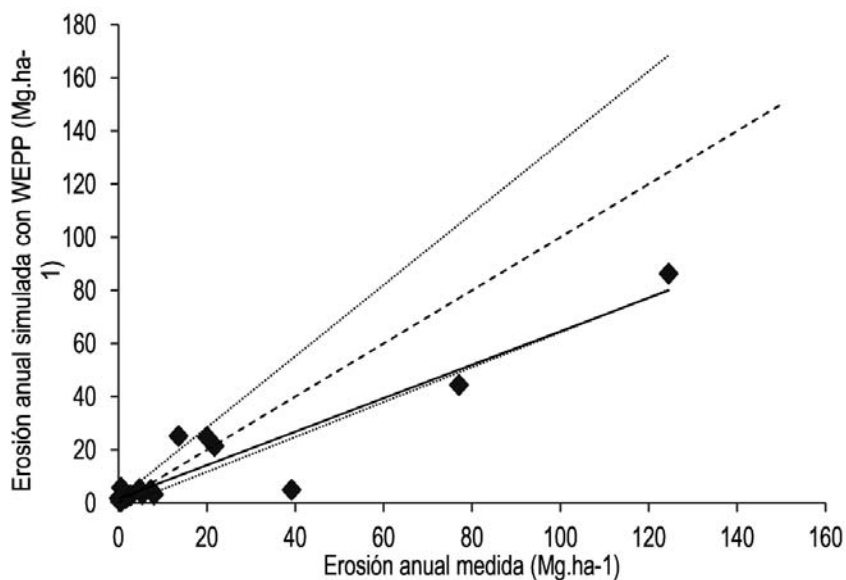


Figura 3. Erosión anual medida y simulada con WEPP en Palo a Pique. **Nota.** Se representan la relación 1:1 (línea cortada), la línea de tendencia (línea continua) y las líneas de tendencia de los límites superior e inferior del intervalo de confianza calculado según Laflen *et al.* (2004) (líneas punteadas).

cantidad de suelo erosionado subestimado en un solo año-parcela se equipara a la sumatoria de la erosión sobreestimada en todas los años-parcela (Figuras 2 y 3).

Los resultados mencionados coinciden con la tendencia general de este tipo de modelos que sobrestiman valores bajos de erosión y subestiman los altos, fenómeno que no necesariamente está asociado a un sesgo propio del

modelo, sino a las limitaciones matemáticas que implica representar un componente azaroso con un modelo determinístico (Nearing, 1998). Por este motivo, al ajustar los parámetros se debe priorizar uno de los dos grupos, los valores altos o los bajos. Los valores bajos son mayoría, por lo que un ajuste que los priorice permitiría incluir la mayoría de los eventos dentro del intervalo de confianza, pero se subestimaría mucho los valores elevados de erosión. Inversamente, un ajuste que priorice los valores altos, dejaría fuera del intervalo de confianza a la mayoría de los valores anuales, pero incluiría aquellos que sobrepasan el valor T de tolerancia, es decir, justamente aquellos que generarían un impacto ambiental de mayor trascendencia.

Además de los aspectos matemáticos de los estadísticos de evaluación de modelos, mencionados en el párrafo anterior y que se discuten a fondo en Jorge (2012), problemas propios del modelo, así como también a errores durante la medición, pueden causar las diferencias encontradas entre los valores medidos y los estimados.

En lo que respecta a los problemas propios del modelo, en el proceso de evaluación y ajuste se encuentran ciertas limitantes para simular rotaciones características de nuestra zona de estudio dado que el modelo no simula más de un cultivo a la vez (es decir que no se puede representar las praderas mixtas ni los cultivos consociados), ni tampoco incorpora modificaciones en la dinámica de infiltración producto del agrietamiento. En el caso de las mediciones, no se puede descartar tampoco que haya habido error en las mismas siendo que la medición de erosión presenta la dificultad intrínseca, asociada a la heterogeneidad espacial y temporal (Stroosnijder, 2005).

Así como se planteó acerca de la extrapolación, las dificultades presentadas para la evaluación y validación también afectan a los todos los modelos en general, sean estos empíricos o basados en procesos. Sin embargo, considerado dentro de un intervalo de confianza dado, y priorizando aquellas salidas con mayores consecuencias ambientales, permiten tomar decisiones y planificar usos y manejos del suelo que no comprometan la sustentabilidad ambiental ni de la producción.

Conclusiones

El modelo WEPP estimó eficientemente la erosión media anual y anual de los suelos representativos de la zona agrícola litoral oeste, y lomadas del este del Uruguay luego que se ajustaron los parámetros de conductividad hidráulica y esfuerzo cortante que intervienen sensiblemente en la estimación del escurrimiento y la erosión. En el caso de la

erosión media anual estimada con WEPP, la precisión llegó a ser comparable a la de USLE/RUSLE. Resulta necesario realizar mediciones de los parámetros identificados como sensibles, en particular conductividad hidráulica y resistencia al esfuerzo cortante hídrico. En su defecto se deberá desarrollar ecuaciones alternativas para el cálculo de los mismos, adaptadas a las condiciones locales, como en el caso de este trabajo en el que se utilizó con éxito el cálculo del valor base de la conductividad hidráulica que toma en cuenta las conductividades de los horizontes sub-superficiales para el caso de suelos con importante diferenciación textural.

Agradecimientos

Se agradece a Nicolás Vázquez, Álvaro Califra, Andrés Beretta, Leticia Martínez, Marcelo Ferrando, Mariana Hill y Carlos Clérici, Marcelo Schusselin, Oswaldo Ernst, Guillermo Siri, Luis Viega, José Furest, Teresa Calistro por sus aportes; a John Laflen, Jim Frankemberger y Dennis Flanagan, por asesoramiento frente a las dudas referidas al funcionamiento del modelo WEPP; y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por el apoyo económico realizado para esta investigación a través del programa de Becas Nacionales otorgada para la realización de la maestría de la primera autora.

Bibliografía

- Alberts EE, Nearing MA, Weltz MA, Risse LM, Pierson FB, Zhang XC, Laflen JM, Simanton JR. 1995. Soil component. En: Flanagan DC, Nearing MA. [Eds.]. Water Erosion Prediction Project : Hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette : USDA. (NSERL Report ; 10). pp. 7.1 – 7.47. Consultado 21 mayo 2015. Disponible en: http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/ad_hoc/36021500WEPP/chap7.pdf.
- Altamirano A, Da Silva H, Echevarría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Torno III : Descripción de las unidades de suelos. Montevideo : MAP. 452p.
- Amorim RSS, Da Silva DD, Pruski FF, De Matos AT. 2010. Avaliação modelos USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 30(6): 1046 - 1049.
- Carámbula M. 2010. Pasturas y forrajes, manejo, persistencia y renovación de pasturas. Montevideo : Hemisferio Sur. 413p.
- Castro A. 1997. Cebada. Paysandú : EEMAC. 124p.
- Da Mota FS. 1981. Meteorología Agrícola. San Pablo : Nobel. 376p.
- DIEA. 1998. Series históricas de datos-DIEA [En línea]. Consultado 25 marzo 2010. Disponible en: <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxp001.aspx?7,5,27,O,S,O,MNU;E;2;16;10;6;MNU>.
- Durán A, García-Préchac F. 2007. Suelos del Uruguay : Origen, clasificación, manejo y conservación. Vol II. Montevideo : Hemisferio Sur. 358p.
- Durán A, Califra A, Molino JH. 1999. Suelos del Uruguay según Soil Taxonomy. [En línea]. Consultado 2 abril 2011. Disponible en: www.fagro.edu.uy/~edafologia/GGST2.htm.

- Flanagan DC, Nearing MA.** 1995. Water Erosion Prediction Project : Hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette : USDA. (NSERL Report ; 10). Consultado 21 mayo 2015. Disponible en: <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=18073>.
- García Préchac F, Clérico C, Hill M, Hill E.** 2005. Erosion 5.0. Software para Windows del Modelo de Estimación de Erosión de Suelos en Uruguay y Región de la Cuenca del Plata [En línea]. Montevideo. Consultado 21 mayo 2015. Disponible en: <http://www.fagro.edu.uy/~manejo/>.
- Haan CT, Johnson HP, Breakensiek DL.** 1982. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph : ASAE. 533p. (ASAE. Monograph ; 5).
- Hill M, García Préchac F, Terra J, Sawchik J.** 2008. Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay. *Agrociencia*, 12(2): 57 - 67.
- Jorge G.** 2012. Evaluación del impacto de la intensificación del uso del suelo sobre la erosión hídrica en sistemas agrícolas del Uruguay : aplicación del Modelo WEPP [Tesis de doctorado]. Montevideo : Facultad de Ciencias. 145p.
- Jorge G, Vázquez N, Pérez-Bidegain M, Terra J.** 2011. Mejora de la estimación de la erosión de los suelos en Uruguay : Aplicación del Modelo WEPP en suelos con diferenciación textural. En: Lobo D, Gabriels D, Dias M. [Eds.]. Física de Suelos clave para el manejo sostenible de los recursos agua y suelos : Compendio de trabajos presentados en la X Escuela Latinoamericana de Física de Suelos; 1 - 10 octubre de 2009; Brasil. Lavras : Universidad de Lavras. pp. 91 - 98.
- Jury WA, Horton R.** 2004. Soil Physics. 6th ed. Wiley : New Jersey. 370p.
- Lafren JM, Flanagan DC, Engel B.** 2004. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. *Journal of the American Water Resources Association*, 40: 289 - 297.
- Lal R.** 1999. Soil quality and soil erosion. Iowa : Soil Water Conservation Society; CRC Press. 329p.
- Legates DR, McCabe GJ.** 1999. Evaluating the use of «goodness-of-fit» Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1): 233 - 241.
- Morgan RPC.** 2005. Soil Erosion and Conservation. 3rd ed. Oxford : Blackwell Publishing. 304p.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL.** 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885 - 900.
- Nash JE, Sutcliffe JV.** 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282 - 290.
- Nearing MA.** 1998. Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. *Catena*, 32: 15 - 22.
- Nearing MA, Ascough LD, Lafren JM.** 1990. Sensitivity analysis of the WEPP Hillslope profile erosion model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33: 839 - 849.
- Pierce FJ.** 1991. Erosion productivity impact prediction. En: Lal R, Pierce FJ [Eds.]. Soil management for sustainability. Ankeny, Iowa : Soil and Water Conservation Society. pp. 35 - 52.
- Reichert JM, Norton LD.** 2013. Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol. *Soil Research*, 51: 1 - 9.
- Stolpe NB.** 2005. A comparison of the RUSLE, EPIC and WEPP erosion models as calibrated to climate and soil of south-central Chile. *Acta Agriculturae Scandinavica : Section B-Soil and Plant*, 55: 2 - 8.
- Stroosnijder L.** 2005. Measurement of erosion : Is it possible? *Catena*, 64: 162 - 173.
- Tiscareno-Lopez M, Lopes VL, Stone JJ, Lane LJ.** 1993. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications I : Hillslope processes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 36(6): 1659 - 1672.
- Tiwari AK, Risse LM, Nearing MA.** 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE.. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 43:1129-1135.
- Vallo MN, Zarauz A.** 1987. Manejo de la densidad de siembra y fertilización nitrogenada en trigo sobre dos rastrojos de verano [Tesis de Grado] Montevideo : Facultad de Agronomía. 214p.