

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**SUBMODELO DE EROSIÓN EN LADERAS
PARA SU USO EN MODELO PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA EN S.I.G.**

ALEJANDRO DUSSAILLANT J.¹

RESUMEN

La erosión hídrica en laderas produce pérdidas de suelo y fertilidad, así como contribuir al transporte de contaminantes – el mismo sedimento más compuestos adsorbidos a él (agroquímicos). Además, la erosión contribuye al embancamiento de ríos y lagos, canales de regadío y embalses. Es un problema particularmente serio en el secano central de Chile. Se presenta un modelo de erosión en laderas de base física que considera erosión por impacto de lluvia, erosión por flujo laminar y erosión por canalículos. Se basa en el concepto de capacidad de transporte, potencia de flujo disponible y en la presencia de una capa de sedimento depositado. Los resultados del modelo se comparan con resultados de parcelas experimentales, sin calibración previa, entregando buenos resultados para los eventos de lluvia más importantes del año 2002 en Ninhue, VIII Región. Se propone que el actual modelo puede resultar útil para la estimación de la erosión en base a modelos hidrológicos distribuidos en SIG, si es analizado mayormente a futuro.

¹ Profesor Auxiliar, Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, y Centro Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, adussa@ing.puc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica en laderas produce pérdidas de suelo y fertilidad, así como contribuir al transporte de contaminantes – el mismo sedimento más compuestos adsorbidos a él (agroquímicos). Además, la erosión contribuye al embancamiento de ríos y lagos, canales de regadío y embalses. Estudios recientes estiman que a nivel mundial, los sobre 45000 represas de 15 m o más de muro, atrapan más del 25% del sedimento global (Vorosmarty et al. 2003), y la Comisión Mundial de Represas estima que éstas estarían perdiendo entre 0.5 a 1 % de su capacidad anualmente.

El aumento de la erosión hídrica de suelos debido al mal manejo de estos por la humanidad, inserto en una progresiva desertificación del territorio (Batchelor 1995), requiere de la disponibilidad de herramientas que permitan priorizar las áreas que requieren protección y sea más eficiente proteger, así como seleccionar las opciones de manejo más apropiadas para el contexto particular.

En particular, la motivación de este trabajo es contribuir a la reducción de la erosión del secano central chileno, con potenciales beneficios para agricultores de subsistencia así como para la industria exportadora de altos ingresos (plantaciones forestales, frutales, viñedos, paltos) que basan su actividad en el recurso suelo.

Se cuenta con datos de erosión para algunas localidades, así como un modelo de precipitación-escorrentía (Calle & Varas 1998), al cual se pretende añadir el submodelo de erosión que concentra nuestra atención en este trabajo.

El objetivo general de este trabajo es el de proveer herramientas para la toma de decisiones en torno a medidas de protección de la erosión en el secano central. Interesa desarrollar un modelo de erosión numérico con base física, para ser incorporado en modelos hidrológicos, que considere la erosión por impacto de lluvia, erosión laminar, y erosión por canalículos en una ladera. El modelo será aplicado a parcelas donde se ha medido pérdida de suelo para evaluar su desempeño.

2. METODOLOGÍA

Los datos disponibles provienen de 9 parcelas de 10x3 m (3 repeticiones de tratamiento de cobertura: rotación, mínima labranza y pradera natural) instaladas en Ninhue, VIII Región por el INIA-Chillán (Figura 1). Se cuenta con datos para 2001-2003 de precipitación cada 15 min así como totales de sedimentos por evento de lluvia.

El modelo numérico es por evento, y considera dividir la ladera en elementos de 1 m de longitud o menos. Se prevé el ingreso de agua y sedimento desde la celda pendiente arriba, y se utiliza la ecuación de Manning para la estimación de la velocidad media del flujo.

Para estimar la erosión por impacto de lluvia, el modelo utiliza los algoritmos del modelo EUROSEM (Morgan et al. 1998). Para la erosión por flujo (canalículos y entre ellos), la base física sigue al modelo propuesto por Hairsine & Rose (1992) y Sempel et al. (2002). Se asume una red y sección dada, y se utiliza el concepto de capacidad de transporte.

Para la erosión por lluvia (Morgan et al. 1998), la energía cinética por mm de lluvia caída e_k ($\text{Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$) se estima de la intensidad de lluvia R , despreciando efectos del viento (van Dijk et al. 2002) e incorporando una correlación con la altitud z (m) para $z > 100\text{m}$:

$$e_k = 28.3[1 - 0.52 \exp(-0.042R)] [0.0101z] \quad (1)$$

Para la pérdida de suelo por impacto de gotas KED (gm^{-2}), se utilizó el algoritmo del modelo EUROSEM (Morgan et al. 1998):

$$KED = k \cdot E_k \exp(-bh) \quad (2)$$

Donde:

k [gJ^{-1}] es la erodibilidad, determinada experimentalmente $\in [1,6]$

E_k es la energía cinética total de la lluvia [Jm^{-2}]

h es la profundidad del agua [mm], y $b \in [1,3]$ según textura del suelo

Para la erosión por flujo, se sigue el modelo de Hairsine & Rose (1992) esquematizado en la Figura 2, que asume $i=1\dots I$ clases de partículas, una tasa de depositación d_i , una tasa de resuspensión no selectiva r_{ri} y un equilibrio dinámico para la masa M de partículas, es decir:

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = d_i - r_{ri} = 0 \quad (3)$$

La capacidad de transporte se utiliza como proporcional a la potencia del flujo $w (= \rho g S R h V)$, con ρ masa específica del agua, g aceleración de gravedad, S pendiente del terreno, R radio hidráulico y V velocidad). La fracción disponible se estima como $F(w - w_0)$ – donde w_0 es la potencia del flujo mínima para el movimiento – dado que la fracción $1-F$ es disipada como calor y ruido. Si la condición es limitada por transporte (i.e. todo el suelo está cubierto por la capa depositada, Hairsine & Rose 1992), la concentración de sedimento C viene dada por:

$$C_t = \left(\frac{r_s}{r_s - r} \right) \frac{F}{gh \sum_{i=1}^I v_i / I} [(w - w_0) + KED] \quad (4)$$

La cubierta de vegetación reduce la potencia del flujo efectiva, reduciendo la velocidad por el aumento de la rugosidad, y por proteger la capa depositada; todo esto reduce la tasa de suspensión y resuspensión.

Siepel et al. (2002) modificaron el modelo de Hairsine & Rose, asumiendo una partición de la tensión de corte debida al suelo, τ_s , y a la cubierta vegetal C_{veg} (% de cobertura), τ_{ss} :

$$\frac{t_{ss}}{t_s} = (1 - C_{veg})^p \quad (5)$$

donde p es un parámetro.

Con ello, la potencia efectiva queda definida como:

$$w = t_{ss} V = r_g S R_h V (1 - C_{veg})^p \quad (6)$$

Por tanto, el modelo de erosión por flujo laminar queda:

$$C_t = \left(\frac{r_s}{r_s - r} \right) \frac{F}{fgh} [(w - w_0) + KED] \cdot (1 - C_{veg}) \quad (7)$$

con ϕ velocidad de sedimentación promedio entre clases de partículas.

Para los elementos con canalículos, se siguen los supuestos de Hairsine & Rose (1992), que son:

- (i) flujo hidráulicamente suave, dominado por fricción de grano
- (ii) canalículos trapezoidales y sin cubierta vegetal
- (iii) erosión por gotas despreciable
- (iv) potencia del flujo uniformemente distribuida en el perímetro mojado (P_{wr})
- (v) capa depositada restringida al fondo del canalículo (ancho W_r)
- (vi) resuspensión no selectiva (todas las clases se resuspenden con igual probabilidad)
- (vii) equilibrio dinámico

Así, el modelo de erosión por canalículos queda:

$$C_t = \left(\frac{r_s}{r_s - r} \right) \frac{F}{fgh} (w - w_0) \left(\frac{W_r}{P_{wr}} \right) \quad (8)$$

Finalmente, la solución de la erosión en cada elemento de ladera i sigue los siguientes pasos:

1. asumir erosión neta en el elemento/celda bajo cálculo;
2. calcular la concentración usando $C = C_t^b$, con (Morgan et al. 1998):

$$b = 0.79 \cdot \exp(-0.85 \cdot J) \quad (9)$$

donde:

b coeficiente de eficiencia de pérdida por flujo
 J [kPa] cohesión de la superficie del suelo

3. realizar balance de masa para verificar que el supuesto de 1. fue correcto – si el sedimento entrante es mayor que el que sale del elemento, asumir depositación neta y recalcular C con $b=1$ (i.e. $C=C_t$).
4. luego, continuar con el siguiente elemento $i+1$, ladera abajo...

Para probar el modelo, se utilizaron los eventos del año 2002 con mayor transporte de sedimentos (julio 24, junio 3 y julio 22, de características dadas en Tabla 1), dado el interés de que el modelo estime adecuadamente los eventos de transporte mayores.

Tabla 1: Eventos de lluvia utilizados para comparación con resultados del modelo de erosión

Evento	Duración (h)	$I_{\max 15 \text{ min}}$ (mm/h)	$I_{15\text{min}} (>4 \text{ mm/h})$ (frecuencia)	Precipitación total (mm)
3 de junio 2002	66	14.8	24	60.6
22 de julio 2002	87	6.4	14	52.1
24 de julio 2002	50	10.4	25	64.5

Los parámetros de erosión fueron los mismos utilizados por Siepel et al. (2002) – ver Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de erosión utilizados (según Siepel et al. 2002)

Parámetro	Unidad	Valor usado
Potencia unitaria de flujo crítica ω_0	Wm^{-1}	0.2
Velocidad de sedimentación promedio ϕ	ms^{-1}	0.1
Fracción efectiva de potencia de flujo F	-	0.1
Parámetro de efecto de vegetación p	-	3
Concentración mínima inicial C_{\min}	mgL^{-1}	1

Los parámetros de manejo para los 3 tratamientos se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros para tratamientos de barbecho, mínima labranza y pradera natural

Parámetro	Barbecho	MinLab	Pradera
Cohesión (kPa)	10	14.5	20
Cubierta vegetal C_{veg}	0.1	0.7	0.7

El exceso de lluvia fue diferente para cada tratamiento, y se utilizó el entregado por los datos de terreno sobre captura de escurrimiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se resumen en la Tabla 4. Se puede observar que salvo 2 casos a pendiente 12% y 18.5%, el modelo aproximó la producción de sedimentos relativamente bien, obteniendo buenos resultados cualitativos para los diferentes tratamientos de cubierta vegetal.

Tabla 4: Resultados del modelo (HES) versus resultados experiencias de terreno

Tratamiento	S=12% Sedimento (g)	Modelo HES (g)	HES/medición	S=18.5% Sedimento (g)	Modelo HES (g)	HES/medición
Tradicional	2889	2547	88%	3504	9205	263%
Mínima labranza	1451	1800	124%	2831	1854	65%
Pradera	411	1682	409%	3268	1712	52%
Tradicional	2583	2230	86%	2169	5393	249%
Mínima labranza	845	937	111%	1728	1432	83%
Pradera	168	174	104%	759	706	93%
Tradicional	5425	5863	108%	10122	9390	93%
Mínima labranza	2264	1717	76%	8136	2862	35%
Pradera	395	910	230%	3521	2269	64%

Se puede hipotetizar que las sobreestimaciones al inicio de la temporada pueden deberse a la compactación durante la siembra, y las sobreestimaciones hacia el final de la temporada de crecimiento vegetal pueden deberse a que se utilizó un porcentaje de cobertura fijo para toda la temporada. Estos son elementos a abordar en una profundización futura del presente ejercicio.

Se realizaron estudios sobre la sensibilidad de parámetros del modelo, de los cuales se concluyó que:

- (i) para flujo laminar, los parámetros más sensibles son la cubierta y la cohesión;
- (ii) para flujo en canalículos, éstos son la cohesión y la pendiente;
- (iii) para ambos, la red de canalículos no afecta mayormente.

En resumen, pareciera que una buena estimación del escurrimiento de agua, acoplada con estimaciones apropiadas de la cohesión y la cobertura, producen una estimación adecuada para la erosión, al menos para estos sitios y eventos. Debemos hacer notar que no se realizó calibración alguna, lo que es auspicioso. Esperamos en un futuro cercano complementar este análisis con más datos de forma de profundizarlo.

Dado que este es un trabajo limitado y preliminar, resta aún mucho por hacer. Nuestro trabajo futuro incluye mayor análisis de datos: determinar la infiltrabilidad, cohesión y cubierta durante la temporada en las parcelas; y consideraremos un experimento de laboratorio bajo condiciones más controladas. En cuanto al modelo, se planifica: calibrar y validar con más datos (2004 y 2005); incorporar el algoritmo en nuestro modelo en GIS; y comparar los resultados con datos de pequeñas cuencas con monitoreo de sedimentos en la misma zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por la beca Coimbra para jóvenes investigadores latinoamericanos, la cual financió al autor en su estadía en Padova, Italia, entre Noviembre 2004 y enero 2005, período donde se realizó el estudio teórico, así como la colaboración de INIA-Chillán y particularmente Octavio Lagos, por la gentil entrega de los datos de terreno.

REFERENCIAS

Abrahams AD, G Li, C. Krishnan & JF Atkinson 2001. A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces. *Earth Surf. Process. Landforms* 26: 1443-1459.

Agassi M & JM Bradford 1999. Methodologies for interrill soil erosion studies. *Soil Till. Res.* 49: 277-287.

Barthes B & E Roose 2002. Aggregate stability as indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels. *Catena* 47:133-149.

Bryan RB 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorph.* 32: 385-415.

Calle, G. & E. Varas. 2003. Hydrodynamic and geomorphologic processes in the hydrologic response of a watershed. *Revista Ingeniería Hidráulica en México* (in Spanish).

Dussailant, A.R. (2002). Stormwater Infiltration and Focused Groundwater Recharge in a Rain Garden: Numerical Modeling and Field Experiment. PhD Thesis. Civil & Environmental Engineering, University of Wisconsin – Madison, U.S.A.

Gao B, MT Walker, TS Steenhuis, J-Y Parlange, K Nakano, CW Rose & WL Hogarth 2003. Investigating ponding depth and soil detachability for a mechanistic erosion model using a simple experiment. *J. Hydrol.* 277: 116-124.

Hairsine PB and CW Rose 1992. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles 1. Sheet flow. *Water Res. Res.* 28(1): 237-243.

Hairsine PB and CW Rose 1992. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles 2. Rill flow. *Water Res. Res.* 28(1): 245-250.

Hogarth WL, J-Y Parlange, CW Rose, GC Sander, TS Steenhuis & A Barry 2004. Soil erosion due to rainfall impact with inflow: an analytical solution with spatial and temporal effects. *J. Hydrol.* 295: 140-148.

Jetten V, A de Roo & D Favis-Mortlock 1999. Evaluation of field-scale and catchment-scale soil erosion models. *Catena* 37: 521-541.

Léonard J & G Richard 2004. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena* 57: 233-249.

Liu QQ & VP Singh 2004. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation. *J. Hydrologic Eng.* 9(5): 375-382.

Morgan, R.P.C, Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., Folly, A.J.V. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University. Version 3.6 July 1998.

Nearing MA, LD Norton, DA Bulgakov, GA Larionov, LT West & KM Dontsova 1997. Hydraulics and erosion in eroding rills. *WRR* 33(4): 865-876.

Raff DA, JA Ramírez & JL Smith. 2004. Hillslope drainage development with time: a physical experiment. *Geom.* 62: 169-180.

Siepel AC, TS Steenhuis, CW Rose, J-Y Parlange & GF McIsaac 2002. A simplified hillslope erosion model with vegetation elements for practical applications. *J. Hydrol.* 258: 111-121.

ANEXO. FIGURAS



Figura 1: parcelas de erosión en Ninhue, VIII Región

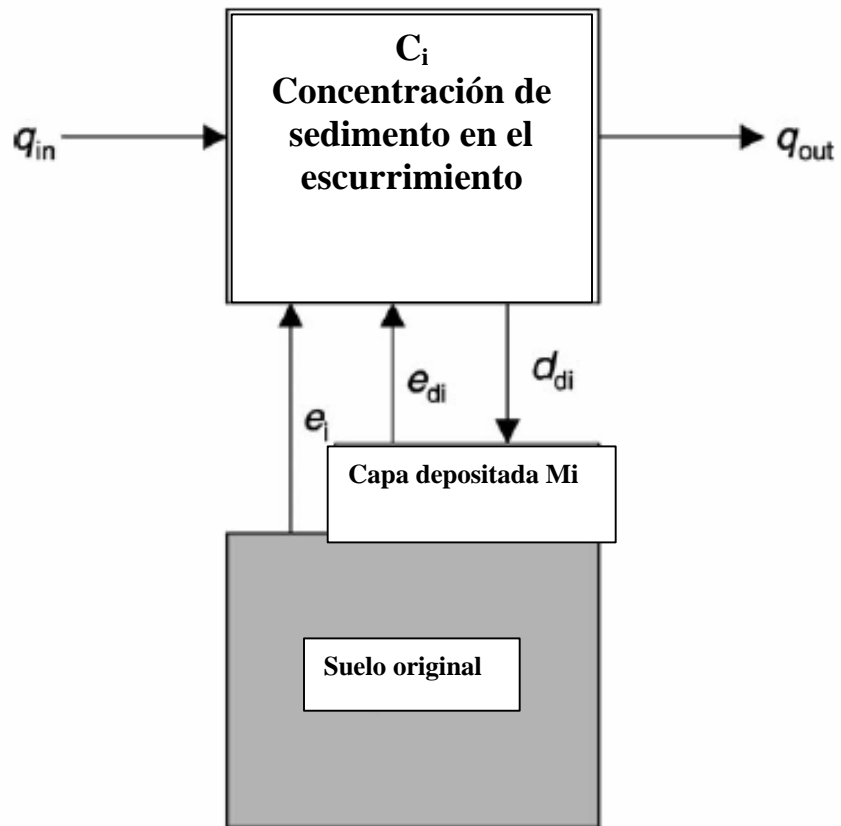


Figura 2: esquema del modelo de Rose de erosión por escurrimiento