



COMPARACIÓN DE ECUACIONES DE DESPRENDIMIENTO POR FLUJO CONCENTRADO PARA ESFUERZOS CORTANTES BAJOS. CASO: CUENCA DEL RÍO CHIRIGUA-VENEZUELA

Adriana Márquez y Edilberto Guevara

Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales
Universidad de Carabobo (UC)

E-mail: ammarquez@uc.edu.ve, eguevara@uc.edu.ve - Web: <http://www.uc.edu.ve/>

RESUMEN

El propósito de esta investigación es comparar los parámetros de las ecuaciones para el desprendimiento por flujo concentrado para esfuerzos cortantes bajos. Los parámetros corresponden a la erodabilidad y el esfuerzo cortante crítico del suelo en surcos irrigados de pendientes: 0,8; 1; 1,5; 2,5 y 13%, en un campo agrícola ubicado en la cuenca del Río Chirigua, Venezuela durante 2008-2009. Para las diferentes pendientes, se calibraron y validaron cuatro modelos de regresión basados en la relación $D_c-\tau$. Los resultados muestran que la erodabilidad del suelo no varía significativamente de un modelo a otro dentro de las pendientes de bajas (0,8 y 2,5%) y alta (13%); mientras que la diferencia es significativa entre los dos grupos de pendientes, encontrando los siguientes valores para el promedio y la desviación estándar: $1,067 \text{ E-}06$ y $1,17 \text{ E-}06$; $6,8 \text{ E-}05$ y $1,07 \text{ E-}04 \text{ kg}^{(1-b)} \text{ s}^{-(1-2b)} \text{ m}^{-(2-b)}$; respectivamente. En cuanto al esfuerzo cortante crítico τ_c , se encontraron algunos rangos de valores que incluyen el valor cero, entre -0,8 y 6 Pa, lo que sugiere que τ_c podría ser asumido como igual a cero. Con respecto al exponente b se encontró que varía entre 2 y 6, por lo que se recomienda explorar funciones de mayor curvatura.

ABSTRACT

The purpose of this research is to compare the parameters of the equations for the detachment by concentrated flow for low shear stress. The parameters correspond to the erodibility and critical shear stress of soil in irrigated furrows slope: 0.8, 1, 1.5, 2.5 and 13% in an agricultural field located in Chirigua River basin, Venezuela during 2008-2009. For different slopes, were calibrated and validated four regression models based on the relationship $D_c-\tau$. The results show that soil erodibility varies significantly from one model to another within the slopes of low (0.8 and 2.5%) and high (13%), while the difference was significant between the two groups mentioned, finding the following values for the mean and standard deviation: $1.067 \text{ E-}06$ and $1.17 \text{ E-}06$, 6.8 and $1.07 \text{ E-}05 \text{ E- kg}^{(1-b)} \text{ s}^{-(1-2b)} \text{ m}^{-(2-b)}$, respectively. As for the critical shear stress τ_c , were found some ranges of values including zero, between -0.8 and 6 Pa, suggesting that τ_c could be assumed equal to zero. With respect to the exponent b was found varying between 2 and 6, so it is advisable to explore greater curvature functions.

INTRODUCCIÓN

Diversas ecuaciones existen para describir las relaciones entre el desprendimiento por flujo concentrado y el esfuerzo cortante (τ). Sin embargo, las ventajas y desventajas de estas ecuaciones para circunstancias específicas no están claras. En este estudio se examina el desempeño de ecuaciones lineales y de potencia con y sin un término de esfuerzo crítico cortante (τ_c) para el desprendimiento por flujo concentrado bajo esfuerzos cortantes bajos. Los objetivos son: (a) evaluar el desempeño de las ecuaciones lineales y de potencia para el desprendimiento por flujo concentrado para esfuerzos cortantes bajos, empleando cuatro tipos de modelos: (1) lineal basado en el esfuerzo cortante excedente, (2) de potencia basado en el esfuerzo cortante excedente, (3) de potencia sin el esfuerzo cortante crítico y (4) de potencia constante sin el esfuerzo cortante crítico; y (5) comparar las ventajas y desventajas de las ecuaciones usando las mediciones realizadas en surcos irrigados en parcelas ubicadas en un campo agrícola sobre la cuenca del río Chirgua en Venezuela.

DESCRIPCIÓN DE MODELOS

La relación comúnmente empleada para estimar la capacidad de desprendimiento de partículas de surcos se basa en el excedente del esfuerzo cortante aplicado por el flujo concentrado sobre un valor crítico del esfuerzo que depende del suelo. En los modelos WEPP y DWEPP (Foster y Meyer, 1972; Nearing, 1989; Bulygina, 2006), el desprendimiento se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$D_c = K_c (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

Donde D_c es la capacidad de desprendimiento de las partículas del surco ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$), K_c la erodabilidad del surco $\text{kg}^{(1-b)} \text{s}^{-(1-2b)} \text{m}^{-(2-b)}$. K_c , τ_c y b son parámetros que se obtienen mediante ajuste empírico. El esfuerzo cortante del flujo τ (Pa) se obtiene mediante la ecuación $\tau = \rho g R S_f$; donde ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}), g la aceleración gravitacional (m s^{-2}), R_h el radio hidráulico (m) calculado como A/W_p , A el área (m^2), W_p el perímetro húmedo (m), calculado como $w+2h$, h la profundidad del flujo (m) y S_f la pendiente de fricción (m m^{-1}). En diversos estudios, mediante el uso de una función de potencias se ha obtenido una mejor descripción de D_c (Hollick, 1976; Franti et al., 1999; Zhu et al., 2001), indicada como:

$$D_c = K_c (\tau - \tau_c)^b \quad (2)$$

Lu et al., (1989) asignaron un valor cero para τ_c , reduciendo la ecuación (2) a la siguiente expresión:

$$D_c = K_c (\tau)^b \quad (3)$$

Foster y Meyer (1972) formulan una versión simplificada de la ecuación (2) expresada como:

$$D_c = K_c \tau^{3/2} \quad (4)$$

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en parcelas sobre un campo agrícola en la cuenca del río Chirgua, ubicada en la región centro-norte de Venezuela. Cinco parcelas fueron seleccionadas con las siguientes pendientes (en dirección de la labranza): $0,008\pm 0,0055 \text{ m m}^{-1}$; $0,01\pm 0,00197 \text{ m m}^{-1}$; $0,015\pm 0,0006 \text{ m m}^{-1}$; $0,025\pm 0,0033 \text{ m m}^{-1}$ y $0,13\pm 0,0156 \text{ m m}^{-1}$. Los surcos miden entre 100-200 m de longitud y 0,3-0,35 m de ancho. El caudal de aplicación por surco mediante el riego por aspersión varía entre 12-18 l min^{-1} . Durante cada evento de riego, se realizaron mediciones en tres surcos/parcela. Se capturaron 5 muestras líquidas cada 20 minutos, para determinar la concentración de los sólidos totales (2540 B) (American Public Health Association, 1995). El conjunto de los eventos medidos fue 24 eventos de riego/parcela, con un total de 120 eventos de riego (5 parcelas x 24 eventos/parcela=120 eventos de riego). Los datos totales fueron divididos en tres conjuntos: 60% para la calibración (14 eventos/parcela), 20% para la validación (5 eventos/parcela) y 20% para la prueba (5 eventos/parcela).

RESULTADOS

ECUACIÓN LINEAL DE ESFUERZO CORTANTE EXCEDENTE

En las Tablas (1), (3), (5), (7) y (9) se muestran los valores de los parámetros para la ecuación lineal basada en el esfuerzo cortante excedente (Ec. 1) para las pendientes de surcos iguales a 0,8; 1; 1,5; 2,5 y 13%. Para los surcos de pendiente de 0,8% a 13% los parámetros K_c y τ_c varían como sigue: **Pendiente 0,8%:** $1,04632\text{E-}05$ y $1,35933\text{E-}05 \text{ s m}^{-1}$; 1,71 y 2,43 Pa. **Pendiente 1%:** $2,19\text{E-}05$ y $3,10\text{E-}05 \text{ s m}^{-1}$; 4,568 y 4,972Pa. **Pendiente 1,5 %:** $6,04748\text{E-}06$ y $7,52973\text{E-}06 \text{ s m}^{-1}$; 4,56849 y 5,53964Pa. **Pendiente 2,5 %:** $1,93422\text{E-}06$ y $2,09677\text{E-}06 \text{ s m}^{-1}$; 0,862425 y 0,862425 Pa. **Pendiente 13 %:** $7,14086\text{E-}05$ y $9,87511\text{E-}05 \text{ s m}^{-1}$; -0,773054 y 2,35822 Pa. En la Figura 1 se presenta como una muestra los valores observados y estimados para una relación lineal y no lineal y pendiente de surco de 0,8%, donde se aprecia que las desviaciones estándar de las observaciones respecto del modelo ajustado son generalmente menores a 2. Los intervalos de K_c y τ_c son representados en las Figuras 2 y 3. En la Figura 2(a) se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95% entre los valores de K_c para las pendientes bajas; mientras que para la pendiente del 13% existe una diferencia significativa en relación a los valores para las pendientes bajas. En la Figura 3(a) se observa que existen similitudes de los valores de τ_c para los grupos de pendientes (a) 0,8; 1 y 1,5%; y (b) 2,5 y 13%; así como diferencias significativas entre cada grupo. Los valores del grupo (b) son más bajos que los del grupo (a). En las Tablas (2), (4), (6), (8) y (10) se muestran los estadísticos del ajuste para la ecuación lineal basada en el esfuerzo cortante excedente para las pendientes de surcos iguales a 0,8, 1, 1,5, 2,5 y 13% durante las etapas de calibración y validación al conjunto de observaciones. Algunos de los resultados son: R^2 : resultó mayor a 0,60. R^2_{ajust} : se redujo poco en relación al R^2 . **Cp de Mallows:** disminuyó en relación al número de variables independientes en la ecuación. En cuanto a los errores, mediante la selección del error porcentual medio, se aprecia que resultó negativo y moderadamente bajo en todos los casos. En general, los errores no varían significativamente entre las etapas de calibración y validación.

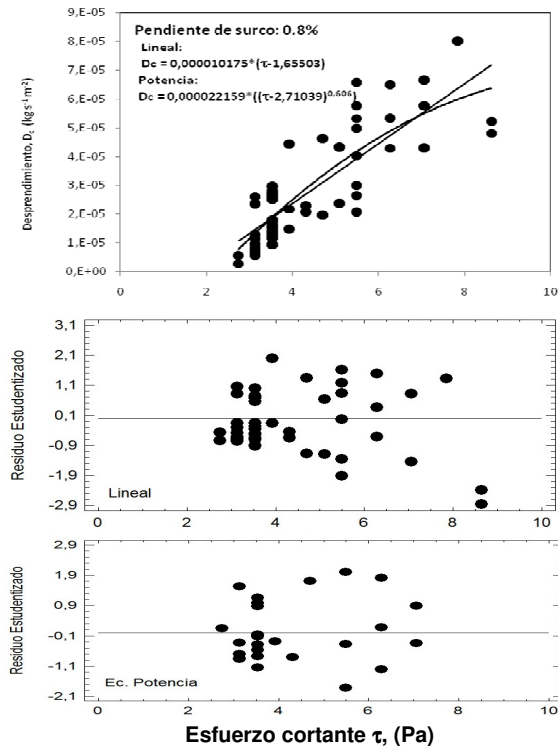


Figura 1.- Desprendimiento del suelo vs. Esfuerzo cortante a partir de valores estimados usando regresiones lineales y no lineales para una pendiente de surco de 0,8%.

ECUACIÓN DE POTENCIA BASADA EN EL ESFUERZO CORTANTE EXCEDENTE

En las Tablas (1), (3), (5), (7) y (9) se muestran los valores de los parámetros para la ecuación de potencias basada en el esfuerzo cortante excedente (Ec. 2) para las pendientes de surcos iguales a 0,8; 1; 1,5; 2,5 y 13%. Para los surcos de pendiente de 0,8% a 13% los parámetros K_c , τ_c y b varían como sigue: **Pendiente 0,8%:** $1,28981E-05$ y $2,98656E-05$ $s\ m^{-1}$; 2,14169 y 3,10635 Pa; 0,423207 y 0,933347. **Pendiente 1%:** $1,55E-07$ y $2,98656E-05$ $s\ m^{-1}$; 1,80746 y 3,1666 Pa; 3,4677 y 3,4677. **Pendiente 1,5 %:** $-1,56885E-06$ y $2,67275E-06$ $s\ m^{-1}$; 1,80746 y 3,1666 Pa; 3,4677 y 3,4677. **Pendiente 2,5 %:** $2,74E-07$ y $2,94E-07$ $s\ m^{-1}$; $-2,73057$ y $-2,73057$ Pa; 1,63792 y 1,40802. **Pendiente 13 %:** $-0,000209507$ y $0,000429204$ $s\ m^{-1}$; $-6,4215$ y $9,80549Pa$; 0,0194439 y 1,84595. Los intervalos de K_c , τ_c y b son representados en las Figuras 2, 3 y 4. En la Figura 3(b) se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95% entre los valores de K_c para las pendientes bajas; mientras que para la pendiente del 13% existe una diferencia significativa en relación a los valores para las pendientes bajas. En la Figura 3(b) se observa que existen similitudes de los valores de τ_c para los grupos de pendientes (a) 1 y 1,5%; y diferencias significativas con el resto. También se observa que existe variabilidad en la amplitud de los intervalos de los parámetros. En la Figura 4(a) se observa que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores del exponente b . Para las pendientes de 0,8 y 13% el valor de b se aproxima a la unidad, lo que confirma el ajuste de los datos a una función lineal. En las Tablas (2), (4), (6), (8) y (10) se muestran los estadísticos del ajuste para la Ecuación (2), para las pendientes de surcos iguales a 0,8, 1, 1,5, 2,5 y 13% durante las etapas de calibración y validación al conjunto de observaciones. Algunos de los resultados son: R^2 : resultó mayor a

0,67. R^2_{ajust} : se redujo poco en relación al R^2 . **Cp de Mallows**: disminuyó en relación al número de variables independientes en la ecuación. En cuanto a los errores, mediante la selección del error porcentual medio, se aprecia que resultó negativo y moderadamente bajo en todos los casos. En general, los errores no varían significativamente entre las etapas de calibración y validación.

ECUACIÓN DE POTENCIA SIN EL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO

En las Tablas (1), (3), (5), (7) y (9) se muestran los valores de los parámetros para la ecuación de potencias basada en el esfuerzo cortante excedente (Ec. 9) para las pendientes de surcos iguales a 0,8; 1; 1,5; 2,5 y 13%. Para los surcos de pendiente de 0,8% a 13% los parámetros K_c y b varían como sigue: **Pendiente 0,8%**: 1,04659E-06 y 3,22403E-06; 1,4134 y 2,00909. **Pendiente 1%**: -9,56E-10 y 2,61E-09; 4,78437 y 6,80777. **Pendiente 1,5 %**: 3,74E-09 y 4,96E-08; 3,29875 y 3,4122. **Pendiente 2,5 %**: 6,30E-07 y 1,55138E-06; 1,03798 y 1,40802. **Pendiente 13 %**: 0,000024782 y 8,20687E-05; 0,932495 y 1,36894. Los intervalos de K_c y b son representados en las Figuras 2 y 4. En la Figura 2(c) se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95% entre los valores de K_c para las pendientes bajas; mientras que para la pendiente del 13% existe una diferencia significativa en relación a los valores para las pendientes bajas. En la Figura 4(b) se observa que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores del exponente b . Para las pendientes de 2,5 y 13% el valor de b se aproxima a la unidad, lo que confirma el ajuste de los datos a una función lineal. En las Tablas (2), (4), (6), (8) y (10) se muestran los estadísticos del ajuste para la Ecuación (9), para las pendientes de surcos iguales a 0,8, 1, 1,5, 2,5 y 13% durante las etapas de calibración y validación al conjunto de observaciones. Algunos de los resultados son: R^2 : resultó mayor a 0,6. R^2_{ajust} : se redujo poco en relación al R^2 . **Cp de Mallows**: disminuyó en relación al número de variables independientes en la ecuación. En cuanto a los errores, mediante la selección del error porcentual medio, se aprecia que resultó negativo y moderadamente bajo en gran parte de los casos. En general, los errores no varían significativamente entre las etapas de calibración y validación.

ECUACIÓN DE POTENCIA CONSTANTE SIN EL ESFUERZO CORTANTE CRÍTICO

En las Tablas (1), (3), (5), (7) y (9) se muestran los valores de los parámetros para la ecuación de potencias basada en el esfuerzo cortante excedente (Ec. 4) para las pendientes de surcos iguales a 0,8; 1; 1,5; 2,5 y 13%. Para los surcos de pendiente de 0,8% a 13% el parámetro K_c varía como sigue: **Pendiente 0,8%**: 2,37756E-06 y 2,86511E-06. **Pendiente 1%**: 1,86548E-06 y 2,53521E-06. **Pendiente 1,5 %**: 8,77E-07 y 1,06878E-06. **Pendiente 2,5 %**: 5,43E-07 y 5,87E-07. **Pendiente 13 %**: 2,24579E-05 y 2,48741E-05. Los intervalos de K_c se representan en las Figuras 2. En la Figura 2(d) se observa que no existen diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95% entre los valores de K_c para las pendientes bajas; mientras que para la pendiente del 13% existe una diferencia significativa en relación a los valores para las pendientes bajas. En las Tablas (2), (4), (6), (8) y (10) se muestran los estadísticos del ajuste para la Ecuación (4), para las pendientes de surcos iguales a 0,8, 1, 1,5, 2,5 y 13% durante las etapas de calibración y validación al conjunto de observaciones. Algunos de los resultados son: R^2 : resultó mayor a 0,34. R^2_{ajust} : se redujo poco en relación al R^2 . **Cp de Mallows**: disminuyó en relación al número de variables independientes en la ecuación. En cuanto a los errores, mediante la selección del error porcentual medio, se aprecia

que resultó negativo y moderadamente bajo en todos los casos. En general, los errores no varían significativamente entre las etapas de calibración y validación.

Tabla 1.- Parámetros de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 0,8%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
1	K_c	$s\ m^{-1}$	1,20283E-05	7,84E-07	1,04632E-05	1,35933E-05
	τ_c	Pa	2,0761	0,179474	1,71797	2,43424
2	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,13818E-05	4,25035E-06	1,28981E-05	2,98656E-05
	τ_c	Pa	2,62402	0,241646	2,14169	3,10635
	b		0,678277	0,12779	0,423207	0,933347
3	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,13531E-06	5,46E-07	1,04659E-06	3,22403E-06
	b		1,71	0,14926	1,4134	2,00909
4	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,62133E-06	1,22E-07	2,37756E-06	2,86511E-06

Tabla 2.- Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 0,8%

Ec.	p	n	R ²	(R ²) aj.	Cp	S _{XY}	d	a) Calibración					b) Validación		
								ACRR	CME	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
1	1	70	0,77	0,77	0	9,9E-06	1,42	0,26	1,30E-10	7,8E-06	42,6	-2,42E-12	-22,8	35,6	-7,9
2	1	70	0,68	0,67	0	1,02E-05	1,12	0,43	1,04E-10	8,3E-06	42,1	1,55E-08	-18,4	42,2	-30,4
3	1	70	0,67	0,66	0	9,92E-06	1,04	0,47	9,83E-11	8E-06	46,0	-2,76E-07	-26,3	50,8	-26,6
4	1	70	0,61	0,61	0	1,1E-05	1,12	0,42	1,21E-10	9E-06	67,5	-6,49E-07	-47,0	71,9	-50,13

Tabla 3.- Parámetros de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 1%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
1	K_c	$s\ m^{-1}$	2,65E-05	2,27E-06	2,19E-05	3,10E-05
	τ_c	Pa	4,77069	0,101326	4,56849	4,97288
2	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	3,50E-07	9,78E-08	1,55E-07	5,45E-07
	τ_c	Pa	2,48703	0,340462	1,80746	3,1666
	b		3,4677	6,19E-11	3,4677	3,4677
3	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	8,25E-10	8,93E-10	-9,56E-10	2,61E-09
	b		5,79607	0,506996	4,78437	6,80777
4	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,20034E-06	1,68E-07	1,86548E-06	2,53521E-06

Tabla 4.- Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 1%.

Ec.	p	n	R ²	(R ²) aj.	Cp	S _{XY}	d	a) Calibración					b) Validación		
								ACRR	CME	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
1	1	70	0,66	0,66	0	1,4E-05	0,90	0,54	1,98E-10	1,1E-05	84,1	-3,81E-12	-37,6	75,7	-35,2
2	1	70	0,76	0,76	0	1,3E-05	0,82	0,58	1,73E-10	9,83E-06	70,5	1,88E-07	-46,8	86,6	-63,2
3	1	70	0,73	0,73	0	1,3E-05	0,73	0,62	1,72E-10	1,01E-05	88,8	1,26E-07	-63,7	69,5	-52,2
4	1	70	0,34	0,34	0	2E-05	0,28	0,84	3,86E-10	1,74E-05	127,2	-2,93E-06	-104,2	149,2	-131,2

Tabla 5.- Parámetros de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 1,5%.

Ecuación	Variable	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
1	K_c	$s\ m^{-1}$		6,79E-06	3,71E-07	6,04748E-06	7,52973E-06
	τ_c	Pa		5,17035	0,185067	4,80105	5,53964
2	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$		5,52E-07	1,06252E-06	-1,56885E-06	2,67275E-06
	τ_c	Pa		2,81443	1,80229	-0,782953	6,41182
	b			2,05146	0,624895	0,804158	3,29875
3	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$		2,67E-08	1,15E-08	3,74E-09	4,96E-08
	b			3,05514	0,178934	3,29875	3,4122
4	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$		9,73E-07	4,81E-08	8,77E-07	1,06878E-06

Tabla 6.- Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 1,5%.

Ec.	p	n	R ²	(R ²) aj.	Cp	S _{XY}	d	a) Calibración					b) Validación		
								ACRR	CME	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
1	1	70	0,831	0,828	0	7,10E-06	0,96	0,45	5,08E-11	5,47E-06	108,82	-8,92E-11	-52,98	122,87	-55,34
2	1	70	0,851	0,846	0	6,46E-06	1,35	0,24	4,18E-11	4,68E-06	85,34	2,75E-07	-50,81	83,82	-62,35
3	1	70	0,869	0,867	0	6,389E-06	1,27	0,27	4,08E-11	4,58E-06	94,50	-2,17E-07	-69,76	65,58	-38,39
4	1	70	0,711	0,711	0	1,03E-05	0,20	0,86	1,07E-10	8,84E-06	163,19	-3,51E-06	-152,99	222,14	-214,35

Tabla 7.- Parámetros de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 2,5%.

Ecuación	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
1	K_c	$s\ m^{-1}$	2,01549E-06	4,07E-08	1,93422E-06	2,09677E-06
	τ_c	Pa	0,862425	1,14E-11	0,862425	0,862425
2	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	2,84E-07	4,99E-09	2,74E-07	2,94E-07
	τ_c	Pa	-2,73057	7,69E-12	-2,73057	-2,73057
	b		1,63792	5,65E-11	1,63792	1,63792
3	K_c	$kg^{(1-b)}\ s^{-(1-2b)}\ m^{-(2-b)}$	1,09065E-06	2,31E-07	6,30E-07	1,55138E-06

	b	1,223	0,0926685	1,03798	1,40802	
4	K_c^*	$kg^{(1-b)} s^{-(1-2b)} m^{-(2-b)}$	5,65E-07	1,13E-08	5,43E-07	5,87E-07

Tabla 8. Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 2,5%.

Ec.	p	n	R ²	(R ²)aj.	Cp	S _{xy}	d	ACRR	CME	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
a) Calibración														b) Validación	
1	1	70	0,67	0,66	0	2,86E-06	1,10	0,43	8,19E-12	2,381E-06	15,13	-6,02E-16	-2,79	13,923	-10,99
2	1	70	0,8	0,79	0	2,37E-06	1,66	0,16	5,60E-12	1,855E-06	12,80	8,96E-09	-2,06	16,37	-7,623
3	1	70	0,73	0,73	0	2,65E-06	1,10	0,42	7,03E-12	2,081E-06	13,51	1,58E-08	-2,18	14,786	-5,377
4	1	70	0,68	0,68	0	2,72E-06	1,27	0,35	7,39E-12	2,248E-06	14,99	3,34E-07	1,48	15,304	2,978

Tabla 9. Parámetros de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 13%.

Ecuación	Variable	Parámetro	Unidades	Promedio	Error Estándar	Mínimo	Máximo
1		K_c	$s m^{-1}$	8,50798E-05	6,85113E-06	7,14086E-05	9,87511E-05
		τ_c	Pa	0,792582	0,784594	-0,773054	2,35822
2		K_c	$kg^{(1-b)} s^{-(1-2b)} m^{-(2-b)}$	0,000109849	0,000159997	-0,000209507	0,000429204
		τ_c	Pa	1,69199	4,06485	-6,4215	9,80549
		b		0,932695	0,457538	0,0194439	1,84595
3		K_c	$kg^{(1-b)} s^{-(1-2b)} m^{-(2-b)}$	5,34253E-05	1,43542E-05	0,000024782	8,20687E-05
		b		1,15072	0,109359	0,932495	1,36894
4		K_c^*	$kg^{(1-b)} s^{-(1-2b)} m^{-(2-b)}$	0,000023666	6,06E-07	2,24579E-05	2,48741E-05

Tabla 10.- Estadísticos de ajuste de modelos de capacidad de desprendimiento en surcos de pendiente de 13%.

Ec.	p	n	R ²	(R ²)aj.	Cp	S _{xy}	d	ACRR	CME	EMA	EPMA	EM	EPM	EPMA	EPM
a) Durante la Calibración														b) Validación	
1	1	70	0,69	0,69	0	1,60E-04	2,13	-0,08	2,55E-08	0,00014	20,39	-5,07E-10	-5,29	26,91	-10
2	1	70	0,68	0,67	0	1,63E-04	2,19	-0,11	2,66E-08	0,00014	22,35	2,34E-09	-6,31	23,66	-8,98
3	1	70	0,61	0,61	0	1,67E-04	2,00	-0,03	2,79E-08	0,00015	24,06	-9,47E-07	-7,3	19,79	2,778
4	1	70	0,69	0,69	0	1,70E-04	2,07	-0,05	2,88E-08	0,00015	22,67	1,36E-05	-2,81	23,55	2,90

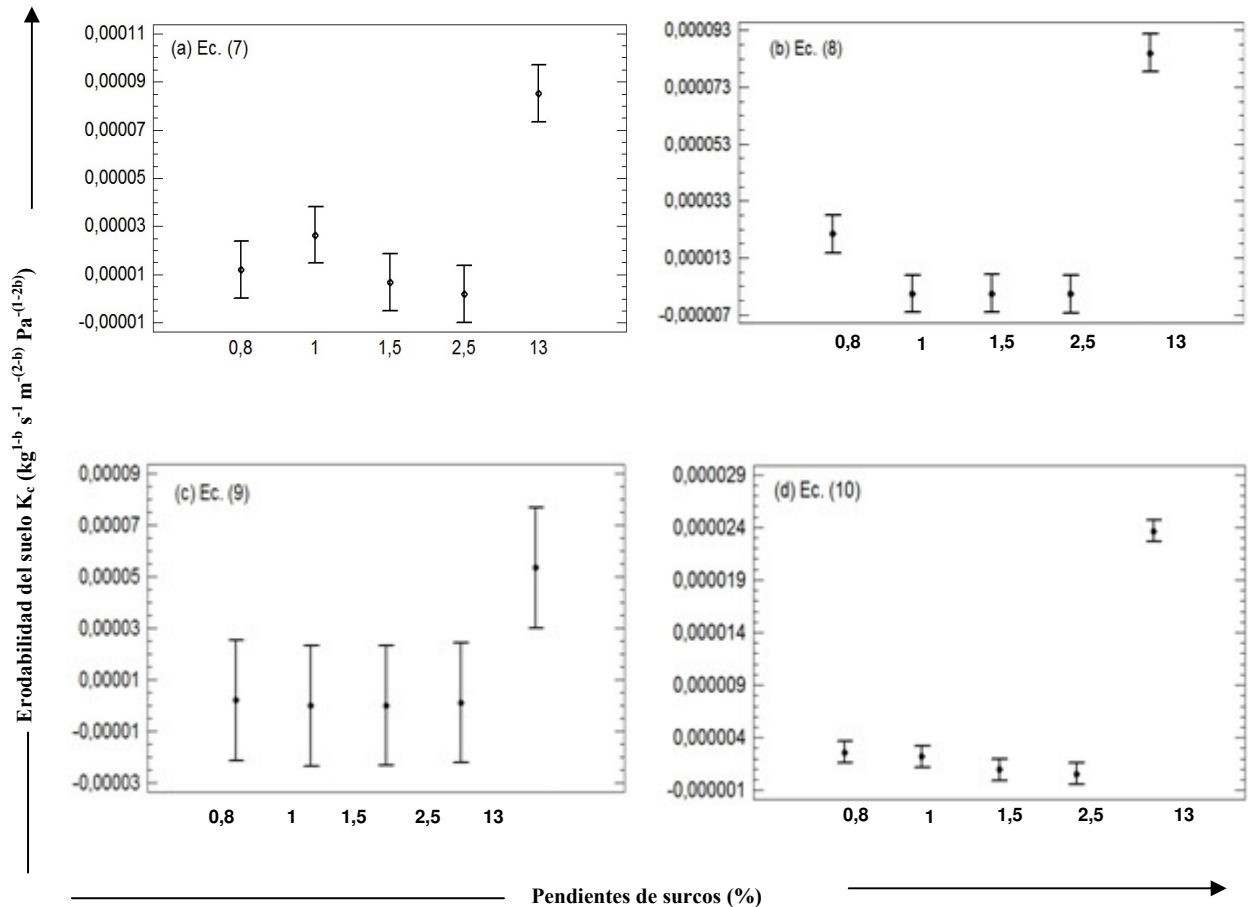


Figura 2. Factor de Erodabilidad del suelo (K_c) para modelos ajustados $D_c-\tau$ en diversas pendientes de surcos

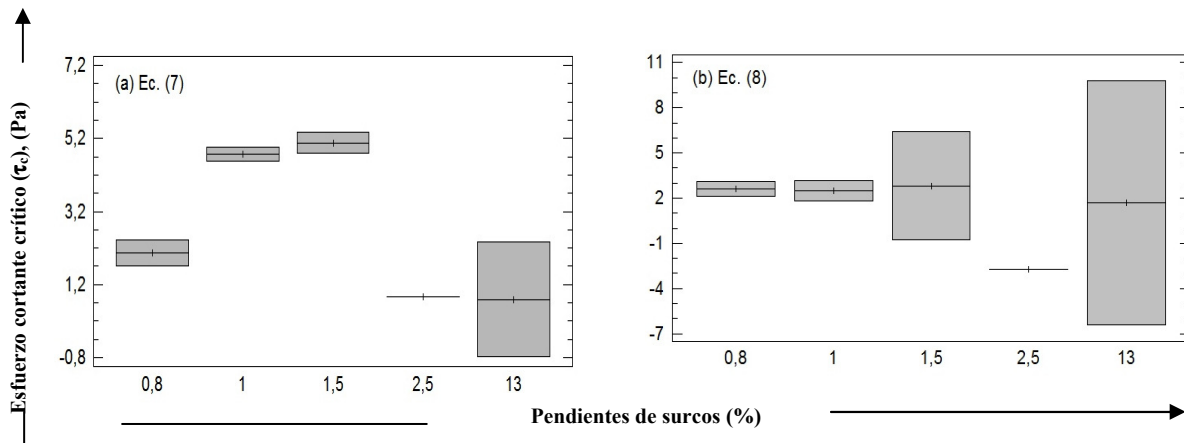


Figura 3. Esfuerzo cortante crítico (τ_c) para modelos ajustados D_c - τ en diversas pendientes de surco

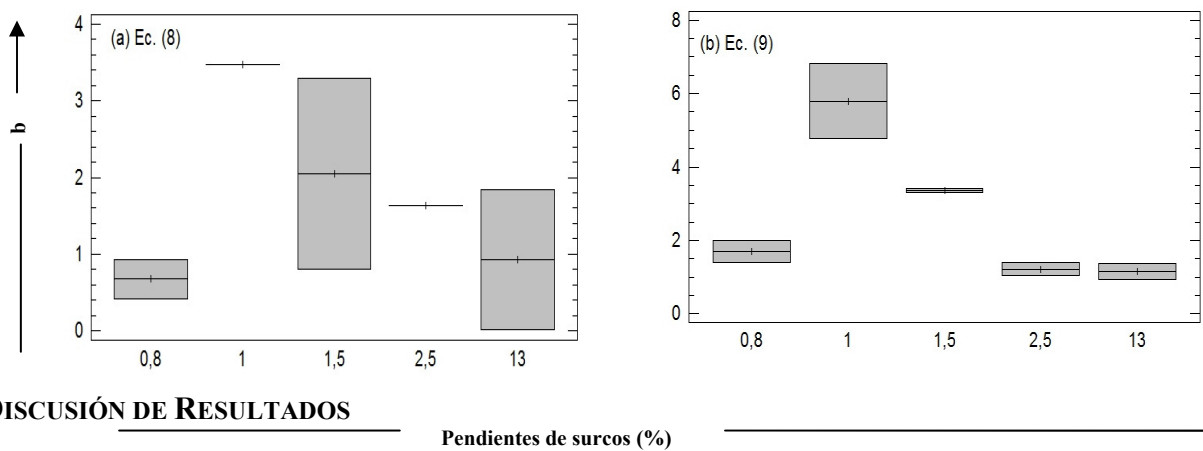


Figura 4. Parámetro b para modelos ajustados D_c - τ en diversas pendientes de surco

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ERODABILIDAD Y ESFUERZO CORTANTE DEL SUELO

Como se mostró en la sección de resultados, para la Ecuación (1) el rango de valores de la erodabilidad del flujo concentrado K_c para pendientes baja está en el orden $10E-06$; mientras que para la pendiente alta es de $10E-05$. En cuanto al esfuerzo cortante crítico τ_c , varía entre 1 y 6 Pa para las pendientes bajas; presentando mayor variación para la pendiente alta, entre -0,8 y 3 Pa. Knapen et al., (2007) recopilaron los valores de K_c y τ_c reportados para los diferentes suelos y condiciones de labranza, a partir de estudios que incluyen experimentos sobre el flujo concentrado mediante levantamientos en campo (Tabla (11)). Los rangos de los valores que han sido determinados empíricamente para la Ecuación (1) de K_c , τ_c ; incluyendo el tamaño de la muestra, mediante experimentos en el campo son los siguientes: $0,000001$ y $0,1 \text{ s m}^{-1}$ ($n=151$), $0,01$ y 20 Pa ($n=161$), respectivamente. Al comparar estos rangos de valores con los reportados en las Tablas (1), (3), (5), (7) y (9) se encuentra que: (a) los valores de K_c se incluyen dentro del intervalo correspondiente a los experimentos en el campo, (b) los valores de τ_c , en su mayoría se incluyen dentro del rango reportado para los experimentos en el campo. De lo antes expuesto se aprecia que, el rango de valores de K_c obtenido en esta investigación difiere significativamente del reportado por Knapen et al. (2007); mientras que se encuentra una variabilidad menor en el rango de valores para τ_c . Existen varias razones para estas diferencias, entre las cuales, dos de las principales son: (1) las diferencias en las

condiciones experimentales en las cuales los datos son recolectados y (2) la variación de los tipos de suelos y las condiciones ambientales.

Comparando las condiciones experimentales y ambientales de esta investigación descritas en la sección de metodología con las reseñadas en la Tabla (11) se puede apreciar que existe cierta similitud sólo con los estudios de campo realizados por Bjorneberg et al., (1999). Con respecto a los experimentos en el laboratorio no existen casos con los cuales realizar una comparación. Los rangos de los valores encontrados de K_c y τ_c por Bjorneberg et al., (1999) varían como sigue: 0,0003 – 0,006 s m⁻¹ y 1,2-1,8 Pa, respectivamente. A pesar de las similitudes en las condiciones experimentales mostradas en la Tabla (11), el rango de valores de K_c es significativamente diferente, las causas de las diferencias parecen ser debidas a las condiciones ambientales, principalmente el clima y las prácticas agrícolas, ya que las pruebas de Bjorneberg et al., (1999) fueron realizadas en campos cultivados con frijol y maíz, donde las secuencias de humedecimiento y secado, la consolidación y los residuos pueden ser factores que contribuyen a la variabilidad en K_c ; mientras que los residuos ejercen influencia sobre los valores de τ_c . En cuanto a las relaciones entre D_c - τ no lineales, pocos investigadores han hecho intentos por ajustar sus datos a funciones de potencia (Foster et al., 1984; Zhu et al. (1995); Franti et al., 1999; Zhu et al., 2001). Los rangos de los valores reportados por Zhu et al., (2001) para K_c , τ_c y b en la ecuación (8) varían como sigue: 0,00004 y 0,0447 kg^(1-b) s^{-(1-2b)} m^{-(2-b)}; -1,04 y 3,30 Pa; 1,87 y 6,14. Así mismo, en la Ecuación (3) K_c y b varían como sigue: 0,00084 y 0,0518 kg^(1-b) s^{-(1-2b)} m^{-(2-b)}; 3,03 y 4,95. Al comparar estos rangos de valores con los reportados en las Tablas (1), (3), (5), (7) y (9) para las Ecuaciones (2) y (3) se encuentra que: (a) K_c : son inferiores a los reportados por Zhu et al. (2001); (b) τ_c y b : se aproximan a los reportados por Zhu et al. (2001). En general, con respecto a los estadísticos de ajuste de los modelos (1) a (4) se observa un ajuste satisfactorio de la mayoría de las ecuaciones, excluyendo el grupo (4) ya que R^2 es bajo y los errores porcentuales medio absoluto y medio entre los valores observados y estimados resultaron altos con respecto al resto de los modelos.

COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS MODELOS

En este estudio, el valor de K_c no varía significativamente, dentro de las pendientes bajas y alta para los diferentes tipos de modelo; aunque sí varía significativamente entre los grupos mencionados antes. El incremento de la pendiente causa el aumento de la velocidad del flujo, la erodabilidad y; en consecuencia el desprendimiento de partículas y el incremento en la concentración del flujo. En cuanto al esfuerzo cortante crítico, se encontraron rangos de valores positivos en los ajustes de los modelos (1) y (2) para las pendientes bajas; mientras que algunos valores ligeramente negativos, así como intervalos que incluyen el valor cero, para el caso de la pendiente alta (13%), lo que sugiere que τ_c puede ser asumido como igual a cero. En cuanto al parámetro b en los modelos de potencia (2) y (3), se encontró que es mayor a la unidad para pendientes de 1; 1,5 y 2,5%, lo que confirma la no linealidad en la relación D_c - τ para algunos de los conjuntos de datos; mientras que para las pendientes de 0,8 y 13 % se encontró una aproximación a la unidad, indicando una relación lineal.

Tabla 11. Características de las pruebas de campo a partir de las cuales se obtienen los parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo debido al flujo en surcos

País	Suelos (N°)	Pendiente (%)	Q (l min ⁻¹)	I _{lluvia} (mm h ⁻¹)	τ (Pa)	Dim. surcos en parcela (m x m)	Condición de la superficie	Fuente
Irán	1	n.d.	132-1693	n.a.	2,2-13,2	15 x 0,3	I, Cobertura vegetal variable	Adelpour et al. (2004)
USA	1	0,5-1,33	30-40	n.a.	n.d.	Long.:110-256	I, Cultivada	Bjorneberg et al. (1999)
Brasil	1	n.d.	n.a.	n.d.	n.a.	9 x 0,5	I, Cultivada	Braida et al. (1996)
Brasil	1	6,7	0-50	74	n.a.	n.a.	I, Cultivada	Cantalice et al. (2005)
USA	2	3-15	96-768	n.d.	4,0-37,3	10 x 0,75	I, Cultivada	Franti et al. (1985,1999)
Brasil	1	n.d.	0	60	n.a.	9 x 0,5	I, Cultivada	Giasson et al.(1996)
USA	30	4-13	7-35	62	n.a.	9 x 0,46	I, Cultivada	Gilley et al. (1993)
USA	4	0,5-3	n.d.	n.d.	1-36	30,5x0,91	I, Sin cobertura	Hanson (1989,1990a,b)
USA	1	1-3	4-17.10 ⁴	n.d.	12-55	29x1,8	I, Sin cobertura	Hanson y Cook (1999)
USA	2	5-11	n.d.	n.d.	n.a.	10,7x3	I, Cobertura vegetal variable	Hussein et al.(1982)
USA	2	4	11-189	64	0,7-14	4x0,2	I, Cultivo variable	King et al. (1995)
USA	2	3-15	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.	n.a.	Laflen (1987)
USA	56	2-13	0,1-0,6	63	0-22	9-11x0,5-3	I, Cultivada	Laflen et al. (1991); Elliot et al. (1989)
USA	1	3-6	8-38	n.d.	2-10	5,5x2	I, Cultivada	Mamo et al. (2001b)
Canadá	3	12-14	n.a.	25-30	n.a.	10x0,8	I, Vegetación libre	Merz et al. (1993)
USA	1	4-6	8-38	51	1,3-6,1	68,6x6,1	I, Cultivada	Morrison et al. (1994)
USA	2	3-5	8-53	64	0-6	6,1x0,76	I, Cultivada	Norton et al.(1992)
USA	1	27	16-23	n.d.	24-192	6x0,3	I, Vegetación con altura variable	Prosser et al. (1995)
Australia	1	1-12,7	1,7-8	n.d.	n.a.	20x1	I, Vegetación con altura variable	Prosser (1996)
Brasil	1	10	12-120	65	2,5-19	6x0,2	n.a.	Reichert et al. (2001)
USA	1	2-31	8-60	60	2-7	4,6x0,3	I, Residuos removidos	West et al. (1992)
USA	1	0,52-1,33	15-46	n.d.	n.d.	204-256	I, Cultivada	Trout, et al. (2001)

n.d.: no disponible. n.a.: no aplicable, Suelos: número de suelos probados. Pendiente: pendiente de la superficie del suelo; Q: caudal de entrada simulado; I_{lluvia}: intensidad de lluvia simulada; τ : rango de esfuerzo cortante del flujo aplicado; Dim. Surcos dimensiones de surcos (longitud x ancho), Condición de la superficie: (S: suavizada; I: irregular)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos en la presente investigación, se extraen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

-K_c no varía significativamente, dentro de las pendientes bajas y alta para los diferentes tipos de modelo; aunque sí varía significativamente entre los grupos mencionados antes. El incremento de la pendiente causa el aumento de la velocidad del flujo, la erodabilidad y; en consecuencia el desprendimiento de partículas y el incremento en la concentración del flujo.

-En cuanto al esfuerzo cortante crítico τ_c , se encontraron rangos de valores positivos en los ajustes de los modelos (1) y (2) para las pendientes bajas; mientras que algunos valores ligeramente negativos, así como intervalos que incluyen el valor cero, para el caso de la pendiente alta (13%), lo que sugiere que τ_c puede ser asumido como igual a cero.

-Se encontró que k_c y τ_c , están dentro de los rangos encontrado por otros investigadores.

-En cuanto al parámetro b, se encontraron rangos de valores que difieren significativamente entre los ajustes para los modelos (2) y (3) para las pendientes, y en algunos casos difiere significativamente de la unidad; lo que se recomienda emplear tipos de funciones que se ajusten a la no linealidad de los datos.

-En general, se encontró un ajuste satisfactorio de la mayoría de los modelos de estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo de los surcos a las observaciones en las etapas de calibración y validación, aunque conviene destacar que, se observó que el R² varió predominantemente entre 0,6 y 0,75, y el error medio porcentual fue negativo y moderadamente bajo, lo que sugiere que sería recomendable probar relaciones no lineales de mayor curvatura.

Agradecimientos. La investigación se ha llevado a cabo en el Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales (CIHAM-UC), con el aporte financiero del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo y el Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y Tecnología (Misión Ciencia).

LISTA DE SÍMBOLOS

D_c:	Capacidad de desprendimiento de las partículas del surco ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)
K_c:	Erodabilidad del surco $\text{kg}^{(1-b)} \text{s}^{-(1-2b)} \text{m}^{-(2-b)}$
τ_c:	Esfuerzo Cortante Crítico (Pa)
τ:	Esfuerzo cortante del flujo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKSOY, H., KAVVAS L., A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport model. *Catena* 64, 2003, pp 247-271.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, “Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater”, American Public Health Association, United States of America, Washington, DC 20005, 19th Edition 1995. pp. 2-53 - 2-58. 1978.
- ADELPOUR, A.A., SOUFI, M., BEHNIA, A.K., Channel erosion thresholds for different land uses assessed by concentrated overland flow on a silty loam. *Conserving Soil and Water for Society: Sharing Solutions*. ISCO 200–13th International Soil Conservation Organisation Conference — Brisbane, Australia. 2004
- ARIATHURAI, R., ARULANANDAN, K., Erosion rates of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division Proceedings of the ASCE* 104, 279–283.
- BAGNOLD, R.A., An approach to the sediment transport problem from general physics. *USGeological Survey Paper* 422-□, Washington. 1966.
- BENNETT, J. P. Concepts of mathematical modelling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10, 1974, pp. 485–492.
- BJORNEBERG, D.L., TROUT, R.E., SOJKA R.E., AASE, J.K., Evaluating WEPP predicted infiltration, runoff and soil erosion for furrow irrigation. *Trans. ASAE* 42(6): 1733-1741, 1999.
- BRAIDA, J.A., CASSOL, E.A., Rill and interrill erodibility of a paleudult soil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 20, 127–134. 1996.
- BULYGINA, N. S., NEARING, M. A., STONE J. J., NICHOLS M. H. DWEPP: a dynamic soil erosion model based on WEPP source terms. *Earth Surface Processes and Landforms* (In Press). Published On Line in Wiley InterScience, 2006, DOI: 10.1002/esp.1467.
- CANTALICE, J.R.B., CASSOL, E.A., REICHERT, J.M., BORGES, A.L.D., Flow hydraulics and sediment transport in rills of a sandy clay loam soil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 29 (4), 597–607. 2005.
- DUBOYS, M. P. Etudes du régime du Rhone et de l’action exercée par les eaux sur un lit á fond de graviers indéfiniment affouillable. *Ann. Ponts et Chaussées*, ser. 5, 18, 1879, pp. 141 - 95.
- ELLIOT, W.J., LIEBENOW, A.M., LAFLEN, J.M., KOHL, K.D., A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987–1988. NSERL Rpt. No. 3. Ohio State University and Natural Soil Erosion Research Laboratory, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, W. Lafayette, Indiana. 1989.

FINKNER, S. C., M. A. NEARING, G. R. FOSTER, AND J. E. GILLEY. A simplified equation for modeling sediment transport capacity. *Trans. ASAE* 32(5): 1545-1550. 1989.

FOSTER, G.R., MEYER, L.D. Transport of particles by shallow flow. *Transactions of the ASAE* 15 (1), 1972, pp. 99–102.

FOSTER, G. R., MEYER, L.D. Mathematical simulation of upland erosion using fundamental erosion mechanics. Proc. Sediment Yield Workshop, U.S. Sedimentation Laboratory, Oxford, MI, 1975, pp. 190-201.

FOSTER, G.R., HUGGINS, L.F., MEYER, L.D., A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships. *Transactions of the ASAE* 27 (3), 797–804. 1984.

FRANTI, F.G., LAFLEN, J.M., WATSON, D.A., Soil erodibility and critical shear under concentrated flow. ASAE Paper 85–2033. 1985.

FRANTI, T.G., LAFLEN, J.M., WATSON, D.A., Predicting soil detachment from high discharge concentrated flow. *Transactions of the ASAE* 42 (2), 329–335. 1999.

GHEBREIYESSUS, Y.T., Evaluation of concentrated flow erosion and hydraulic shear stress relationship. Ph.D. Dissertation (Dissertation Abstract 91-00197). University of Missouri, Columbia. MO. 1990.

GIASSON, E., CASSOL, E.A., Rill erosion related to inflow rates and amounts of incorporated wheat straw in a sandy clay loam Paleudult soil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 20, 117–125. 1996.

GILLEY, J.E., ELLIOT, W.J., LAFLEN, J.M., SIMANTON, S.R., Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling. *Journal of Hydrology* 142, 251–271. 1993.

GOVERS, G. Empirical relationships for the transport formulae of overland flow. In *Erosion, Transport and Deposition Processes*, 45-63. IAHS Pub. No. 189. Wallingford, U.K.: IAHS Press. 1990.

HANSON, G.J., An in-situ erodibility testing device. American Society of Agricultural Engineers - Canadian Society of Agricultural Engineers. Paper No. 89–2151. An ASAE/CSAE meeting presentation. 1989.

HANSON, G.J., Surface erodibility of earthen channels at high stresses. Part II-Developing an in situ testing device. *Transactions in Agriculture* 33 (1), 132–137. 1990a.

HANSON, G.J., Surface erodibility of earthen channels at high stresses part I. Open channel testing. *Transactions of the ASAE* 33 (1), 127–131. 1990b

HANSON, G.J., COOK, K.R., SIMON, A., Determining erosion resistance of cohesive materials. American Society of Civil Engineers, 1999 International Water Resources Engineering Conference, Seattle, Washington, USA. 1999.

HOLLICK, M., Towards a routine test for the assessment of the critical tractive forces of cohesive soils. *Transactions of the ASAE*. 19 (6), 1076–1081, 1976.

HUSSEIN, M.H., LAFLEN, J.M., Effects of crop canopy and residue on rill and interrill soil erosion. *Transactions of the ASAE* 25 (5), 1310–1315. 1982

JETTEN V., GOVERS G., HESSEL R., Erosion Model: quality of spatial prediction. *Hydrol. Process.* 17, 887–900. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.1168. 2003.

KNAPEN A., POESEN J., GOVERS G., GYSSELS G., NACHTERGAELE J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Science Reviews* 80, 2007, pp. 75-109.

KIRKBY, M. J. Modelling water erosion processes. In Kirkby, M. J. and Morgan, R. P. C. (Eds), *Soil Erosion*, Wiley, Chichester, 1980, pp. 183–216.

KING, K.W., FLANAGAN, D.C., NORTON, L.D., LAFLEN, J.M., Rill erodibility parameters influenced by long-term management practices. *Transactions of the ASAE* 38 (1), 159–164. 1995.

KIRCHNER, J.W., DIEFRICH, W.E., ISEYA, F., IKEDA, H., The variability of critical stress, friction angle, and grain protrusion in water-worked sediment. *Sedimentology* 37, 647-672.

KNISEL, W.G., CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report vol. 26. 1980.

KOLUVEC, P.K., TANJI K.K., TROUT T.J., Overview of soil erosion from irrigation. *J. Irrig. Drainage Engr. ASCE* 119(6):929-946.1993.

KLIK A, SAVABI MR, NORTON LD, BAUMER O. Application of WEPP hillslope model on Austria. *Proceedings of the 31st Annual Conference of the American Water Resources Association (AWRA), 'Water Management in urban areas'*. Houston, Texas: 313–322. 1995.

LAFLEN, J.M., Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. In: Sentis, I.P. (Ed.), *Soil Conservation and Productivity. Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Conservation*, Maracay, Venezuela. 1987.

LAFLEN, J.M., ELLIOT, W.J., SIMANTON, J.R., HOLZEY, C.S., KOHL, K.D., WEPP Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1), 39–44. 1991.

LAFLEN JM, FLANAGAN DC, ENGEL BA. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP. *Journal of the American Water Resources Association* 40(2): 289–297, 2004.

LAVELLE, J.W., MOFJELD, H.D. Do critical stress for incipient motion and erosion real exist? *J. Hydraul. Eng. ASCE* 113 (3), 370-386.

LEI, T.W., NEARING, M.A., HAGHIGHI, K., BRALTS, V.F., Rill erosion and morphological evolution: a simulation model. *Water Resources Research* 34 (11), 3157–3168. 1998.

LEI, T.W., ZHANG Q. W., XIA, W.S., PAN Y.H., LIU J.G., Analytic determination of soil erodibility and critical shear stress. 12th ISCO Conference. Beijing 2002.

LYLE, W.M., SMERDON, E.T., Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. *Transactions of the ASAE* 8, 419–422. 1965.

LU, J.Y., CASSOL, E.A., MOLDENHAUER, W.C., Sediment transport relationships for sand and silt loam soils. *Transactions of the ASAE* 32, 1923–1931, 1989.

MAMO, M., BUBENZER, G.D., 2001a. Detachment rate, soil erodibility and soil strength as influenced by living plant roots part I: laboratory study. *Transactions of the ASAE* 44 (5), 1167–1174.

MAMO, M., BUBENZER, G.D., Detachment rate, soil erodibility and soil strength as influenced by living plant roots part II: field study. *Transactions of the ASAE* 44 (5), 1175–1181. 2001b.

MORRISON, J.E., RICHARDSON, C.W., LAFLEN, J.M., ELLIOTT, W.J., Rill erosion of a Vertisol with extended time since tillage. *Transactions of the ASAE* 37 (4), 1187–1196. 1994

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. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surf. Process. Landforms* 23, 1998, pp. 527–544

NEARING M.A., FOSTER G.R., LANE L.J., FINKNER S.C. A process-based soil erosion model for USDA–Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE* 32(5): 1989, pp. 1587–1593.

NEARING M.A., LANE L.J., LOPES, V.L., Modeling soil erosion. In: Lal, R (Ed). *Soil erosion research methods* 2nd Ed. Soil and Water Conservation Society and St. Lucie Press, Delray Beach, FL, pp. 127-156. 1994

- NEARING MA, BULYGIN SY, KOTOVA MM. Primary verification and adaptation of the WEPP model for Ukrainian conditions: problems, possible solutions, and perspectives. *Pochvovedenie* 31(1): 96–99, 1998.
- NORTON, L.D., BROWN, L.C., Time-effect on water erosion for ridge tillage. Transactions of the ASAE 35 (2), 473–478. 1992.
- RANIERI SBL, SPAROVEK G, DEMARIA IC, FLANAGAN DC. Erosion rate estimation using USLE and WEPP on a Brazilian watershed. In *Proceedings of 10th International Soil Conservation Organization Conference*. West Lafayette, IN. 1999.
- O'BRIEN, M.P., RINDLAUB, B.D.. The transportation of bed-load by streams. Trans. Am. Geophys. Union 15, 1934, pp. 593–603.
- PROSSER, I.P., DIETRICH, W.E., STEVENSON, J., Flow resistance and sediment transport by concentrated overland flow in a grassland valley. *Geomorphology* 13, 73–86. 1995.
- PROSSER, I.P., Thresholds of channel initiation in historical and Holocene times. *Advances in Hillslope Processes* 2, 687–708. 1996.
- REICHERT, J.M., SCHÄFER, M.J., CASSOL, E.A., NORTON, L.D. Interrill and rill erosion on a tropical sandy loam soil affected by tillage and consolidation. In: Stott, D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C. (Eds.), *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, May 24–29, 1999, Purdue University and the USDA-ARS Soil Erosion Research Laboratory, USA.* , 2001.
- RIVERA, F., SOTO G., ORTIZ L., BEREZOWSKI M., Modelo numérico bidimensional de fondo móvil con cambio granulométrico. *Ingeniería Hidráulica en México*. Julio-Septiembre, 2004.
- SAVABI MR, KLIK A, GRULICH K, MITCHELL JK, NEARING MA. Application of WEPP and GIS on small watersheds in USA and Austria. In *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, Proceedings of the Vienna Conference*, IAHS Publication 235. 1996.
- SANTORO VC, AMORE E, MODICA C, NEARING MA. Application of two erosion models to a large Sicilian basin. In *Proceedings of the Third International Congress of European Society for Soil Conservation*, Valencia. 2002.
- SIMONS D. B., LI R. M., FULLERTON L. Theoretically derived sediment transport equations for Pima County, Arizona. Prepared for Pima County DOT and Flood Control District, Tucson, Ariz. Ft Collins, Colo.: Simons, Li y Assoc, 1981.
- SHAINBERG, I., LAFLEN, J.M., BRADFORD, J.M., NORTON, L.D., Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosion. *Soil Science Society of America Journal* 58, 1007–1012. 1994.
- SHAINBERG, I., GOLDSTEIN, D., LEVY, G.J., Rill erosion dependence on soil water content, aging, and temperature. *Soil Science Society of America Journal* 60 (3), 916–922. 1996.
- SHERIDAN, G.J., SO, H.B., LOCH, R.J., POCKNEE, C., WALKER, C.M., Use of laboratory-scale rill and interrill erodibility measurements for the prediction of hillslope-scale erosion on rehabilitated coal mine soils and overburdens. *Australian Journal of Soil Research* 38, 285–297. 2000a.
- SHERIDAN, G.J., SO, H.B., LOCH, R.J., WALKER, C.M., Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties. *Australian Journal of Soil Research* 38 (2), 256–284. 2000b.
- SHIELDS, A., Anwendung der ähnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung Mitteilunggen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und

Schiffbau. N° 26, Berlin Germany (Ott, WP., Uchelon, JUC., Trans., California Institute of Technology, Pasadena, CA), 1936

SMERDON, E.T., Effect of rainfall on critical tractive forces in channels with shallow flow. Transactions of the ASAE, Paper No. 63-700. 1964.

SMERDON, E.T., BEASLEY, R.P. The tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soils. Agricultural Experiment Station University of Missouri Research Bulletin 715, 1959.

TROUT, T.J. Erosion and sedimentation processes on irrigated fields. J. of Irrig. And Drain. Engr. ASCE 119(6): 947-963, 1993

TROUT, T.J. Furrow erosion and sedimentation: on field distribution. Trans. ASAE. 39(5): 1717-1723. 1996

TROUT, T.J. Sediment transport in irrigation furrows. In Sustaining the Global Farm: Selected Papers from the 10th Intl. Soil Conservation Organization Meeting, 710-716. D. E. Stott, R. H. Mothar, and G. C. Steinhardt, eds. West Lafayette, Ind.: Purdue University and USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1999.

VAN KLAVEREN, R.W., MCCOOL, D.K., Erodibility and critical shear of a previously frozen soil. Transactions of the ASAE 41 (5), 1315–1321. 1998.

VANONI, V.A. BENEDICT, P.C., BONDURANT, D.C., MCKEE, J.E., PIEST, R.F., SMALLSHAW, J., Sediment transportation mechanics: initiation of motion, progress report. Task Committee on Preparation of the sedimentation Manual. J. Hydraul. Div., ASCE 92, 291-314. 1966.

WEST, L.T., MILLER, W.P., BRUCE, R.R., LANGDALE, G.W., LAFLEN, J.M., THOMAS, A.W., Cropping system and consolidation effects on rill erosion in the Georgia Piedmont. Soil Science Society of America Journal 56, 1238–1243, 1992.

WICKS, J.M., BATHURST, J.C., SHESED: A physically-based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE. hydrological modelling system. Journal of Hydrology 175, 1996. pp 213–238.

WOOLHISER D.A. Hydrologic and watershed modeling – state of the art. Transactions of the ASAE 16(3), 1973, pp. 553–559.

WOOLHISER D.A., SMITH R.E., GOODRICH D.C. KINEROS, a Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual, ARS- 77. 1990. USDA–ARS.

WILCOCK, P.R. Methods for estimating the critical shear stress of individual fractions in mixed size sediment. Water Resources Research, 24, 1127-1135.

YANG, C. T. Unit stream power equations for total load. Journal of Hydrology, 40, 1979, pp 123-138.

YAN, L.J., YU, X.X., LEI, T.W., ZHANG Q.W., QU L.Q. Effects of transport capacity and erodibility on rill erosion processes: A model study using the finite element method. Geoderma 146: 628-633, 2008.

ZELEKE G. Application and adaptation of WEPP to the traditional farming system of the Ethiopian highlands. In *Proceedings of 10th International Soil Conservation Organization Conference*, West Lafayette, IN. 1999.

ZHANG XC, NEARING MA, RISSE LM, MCGREGOR KC. Evaluation of runoff and soil loss predictions using natural runoff plot data. *Transactions of the ASAE* 39(3): 855–863, 1996.

ZHU, J.C., GANTZER, C.J., PEYTON, R.L., ALBERTS, E.E., ANDERSON, S.H., Simulated small-channel bed scour and head cut erosion rates compared. Soil Science Society of America Journal 59 (1), 211–218. 1995.

ZHU, J.C., GANTZER, C.J., ANDERSON, S.H., PEYTON, R.L., ALBERTS, E.E.,
Comparison of concentrated flow-detachment equations for low shear stress. *Soil and Tillage
Research* 61, 203–212. 2001.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



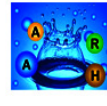
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA S.A. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

