



EFFECTOS DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DEL FLUJO Y ERODABILIDAD DEL SUELO SOBRE LOS PROCESOS DE EROSIÓN EN SURCOS. CASO: CUENCA DEL RÍO CHIRGUA-VENEZUELA

Edilberto Guevara y Adriana Márquez

Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales

Universidad de Carabobo (UC)

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

RESUMEN

El propósito de esta investigación es determinar los efectos de la capacidad de transporte del flujo y la erodabilidad del suelo sobre los procesos de erosión en surcos. Los parámetros corresponden a la erodabilidad y la capacidad de transporte de sedimentos en surcos irrigados de pendientes: 0,8; 1; 1,5; 2,5 y 13%, en un campo agrícola ubicado en la cuenca del Río Chirgua, Venezuela durante 2008-2009. Durante el ciclo de siembra, en la primera etapa, la carga de sedimentos tiende a ser mayor que la capacidad de transporte de los sedimentos favoreciendo la ocurrencia de los procesos de deposición y disminuyendo la erosión. En la segunda y tercera etapa, disminuye la carga de sedimentos en la corriente y tienen mayor efecto los procesos de desprendimiento y transporte de sedimentos, lo que se incrementa con la pendiente.

ABSTRACT

The purpose of this research is to determine the effects of the flow transport capacity and soil erodibility on rill erosion processes. The parameters correspond to the erodibility and sediment transport capacity in irrigated furrows slope: 0.8, 1, 1.5, 2.5 and 13% in an agricultural field located in Chirgua River basin, Venezuela during 2008-2009. During the planting season in the first stage, the sediment load tends to be greater than the capacity of sediment transport by promoting the occurrence of deposition processes and reducing erosion. In the second and third stage, the sediment load is reduced in the current and the processes of detachment and sediment transport have a greater effect, which increases with the slope.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los modelos de erosión basados en procesos han recibido una creciente atención por varias razones teóricas y prácticas. Ha sido un gran reto para los científicos de la erosión cuantificar los procesos que contribuyen a la predicción de la erosión en surcos. Modelos como WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Acercándose et al, 1989.), GUEST (Hairsine y Rose 1992), y EUROSEM (Morgan et al, 1992; Morgan, 1994), así como varios otros muestran un gran potencial para la aplicación. Estos modelos describen la distribución temporal y espacial de la pérdida de suelo. Por otra parte, los modelos basados en procesos pueden ser extrapolados para cubrir una amplia gama de situaciones (Flanagan et al., 1995). Modelos, como WEPP, incluyen la capacidad de transporte del flujo y los parámetros de erodabilidad del suelo en surcos que son de gran importancia en la simulación de la erosión en surcos. Sin embargo, los medios para cuantificar el efecto de los parámetros de dichos modelos en los procesos de erosión siguen siendo un problema que se debe investigar. Los objetivos principales del presente estudio son: 1) calibrar los procesos de la erosión en surcos, 2) evaluar la influencia de los procesos de erodabilidad del suelo y capacidad de transporte del flujo, en los procesos de erosión, usando mediciones realizadas en surcos irrigados en parcelas ubicadas en un campo agrícola sobre la cuenca del río Chirgua en Venezuela.

DESCRIPCIÓN DE MODELOS PARA LA EROSIÓN DE SURCOS

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD DE LOS SEDIMENTOS

El tránsito unidimensional de los sedimentos a través de un surco se puede simular a través de la solución numérica de la siguiente ecuación diferencial (Foster y Meyer, 1972; Woolhiser, 1973; Bennett, 1974; Kirkby, 1980; Woolhiser *et al.*, 1990):

$$\partial(CA)/\partial t + \partial(CQ)/\partial x = S \quad (1)$$

Donde C es la concentración de sedimentos (kg m^{-3}), A el área de sección transversal del flujo (m^2), Q el caudal de flujo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), t el tiempo (s), x la distancia pendiente abajo (m) y S el término fuente/sumidero para los sedimentos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$). $S = D_I + D_R$; donde D_I es la tasa de aporte lateral de sedimentos hacia el surco ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) y D_R la tasa de erosión o deposición en el surco, positiva para la erosión y negativa para la deposición, ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

MODELO DE EROSIÓN EN SURCOS

En el desarrollo de los modelos de erosión en surcos se usa el concepto de la capacidad de transporte de sedimentos, combinado con el desprendimiento cuando la carga de sedimentos es mayor que la capacidad de transporte y con la deposición cuando la carga de sedimentos es menor que la capacidad de transporte. A continuación se indican las ecuaciones del modelo WEPP.

MODELO WEPP

En este modelo propuesto por (Nearing et al., 1989), el desprendimiento neto del suelo o erosión (D_R) se obtiene cuando el esfuerzo cortante excede al esfuerzo cortante crítico del

suelo y la carga de sedimentos es menor que la capacidad de transporte de sedimentos, y se expresa como:

$$D_R = D_c (1 - (CQ/wT_c)), \quad CQ \leq wT_c \quad (2)$$

La deposición neta se calcula cuando la carga de sedimentos, es mayor que la capacidad de transporte de sedimentos T_c , mediante la siguiente expresión:

$$D_R = (0,5V_f/Q)(wT_c - CQ) \quad CQ \geq wT_c \quad (3)$$

Donde D_c la capacidad de desprendimiento de las partículas del surco, ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); T_c la capacidad de transporte de sedimentos en el surco, ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$); w el ancho del surco, (m); V_f la velocidad de asentamiento de las partículas, (m s^{-1}).

$$D_c = \begin{cases} K_r (\tau - \tau_c), & \tau \geq \tau_c \\ 0, & \tau \leq \tau_c \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau = \rho_w gSR \quad (5)$$

Donde K_r es la erodabilidad del surco (s/m), τ_s el esfuerzo cortante que actúa sobre el suelo (Pa), τ_c el esfuerzo cortante crítico (Pa), ρ_w la densidad del agua (Kg/m^3), g la aceleración debida a la gravedad (m/s^2), pendiente (m/m), R el radio hidráulico (m). Los surcos se asumen que son rectangulares con anchos que dependen de la tasa del flujo.

La forma simplificada de la ecuación de Yalin, (1963) para estimar la capacidad de transporte de los sedimentos ha sido adaptada por Foster y Meyer, (1975) como:

$$T_c = a\tau^b \quad (6)$$

Donde T_c es la capacidad de transporte de los sedimentos, a y b son coeficientes que se obtienen mediante ajuste empírico

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. Las mediciones incluyeron: cinco caudales con tres repeticiones cada 20 minutos mediante un vertedero tipo V aplicando un método volumétrico; en un cuarto, medio y al final del surco. Se captaron 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).

DATOS PARA MODELOS

Durante la estación seca, la escorrentía se estabiliza después de la primera media hora de la aplicación del riego. El lapso para la estabilización del flujo es aproximadamente de una hora;

ocurriendo más rápido en los surcos donde la pendiente es igual a 0,8% (Figura 1). La tasa de flujo en el estado estable varía entre 0,30 y 0,50 L s⁻¹; disminuyendo entre 0,05 y 0,1 L s⁻¹ después del séptimo riego. El efecto de la variación del caudal entre los diferentes surcos por el radio de cobertura del aspersor es bajo dentro de un evento de riego.

Los sólidos totales son aproximadamente estables durante cada evento de riego (Figura 2). La concentración de los sedimentos varía entre 5000 y 14000 mg L⁻¹; disminuyendo entre 1000 y 5000 mg L⁻¹ después del séptimo riego. La disminución en la concentración de los sedimentos entre los diferentes se debe mayormente al efecto del incremento en la cobertura vegetal.

Una comparación de la carga de los sedimentos durante los eventos de riego y lluvia de una y dos horas de duración se muestra en la Figura 3. La carga de los sedimentos máxima observada durante los eventos de una hora varía aproximadamente como sigue: entre 100 y 400 mg s⁻¹ para el riego, 600 y 100 mg s⁻¹ para la lluvia (Figura 3a). La carga de los sedimentos máxima observada para los eventos de dos horas varía como sigue: entre 500 y 2000 mg s⁻¹ para el riego, 2500 y 7000 mg s⁻¹ para la lluvia (Figura 3b). Por tanto, se puede afirmar que existe una variación significativa de la carga de sedimentos entre los eventos de riego y los de lluvia, siendo 5 a 10 veces más erosivos los últimos.

RESULTADOS

AJUSTE DEL MODELO DE DESPRENDIMIENTO DE PARTÍCULAS

En la Tabla 1 se muestran los parámetros de la Ecuación (4), empleada para la estimación de la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo en surcos. En general, se pueden realizar las siguientes afirmaciones acerca de los parámetros K_c y τ_c : a) K_c varió entre 1.31E-06 y 1.525E-06 s/m, b) τ_c varió entre 0.704 y 1.489 Pa; c) el error estándar de estimación de los intervalos resultó bajo en todos los casos. En la Tabla 2 se muestran los estadísticos del ajuste de la Ecuación (4) al conjunto de observaciones obtenidas a partir de las pruebas de campo en los surcos de las pendientes: 0,8%, 1%, 1,5%, 2,5% y 13%. Los resultados de los estadísticos se resumen como sigue: R^2 : resultó igual a 0.682. R^2_{ajust} : resultó igual a 0.681, su reducción es poco significativa en relación al R^2 . *Cp de Mallows*: disminuyó ligeramente en relación al número de variables independientes en la ecuación. *Estadístico de Durbin-Watson*: resultó igual a 0.66. En cuanto a los errores, se comparan los resultados durante las etapas de la calibración y la validación haciendo énfasis en el error porcentual medio absoluto (EPMA) y el error porcentual medio (EPM). El primero varió entre 47.87 y 57.9; el segundo entre -20.52 y -33.74. En general, los errores no variaron significativamente entre las etapas de la calibración y la validación. El resto de los errores puede ser observado en la Tabla 2.

AJUSTE DEL MODELO DE CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

En la Tabla 3 se muestran los parámetros de la Ecuación (6) para la estimación de la capacidad de transporte de sedimentos en los surcos de las siguientes pendientes: 0,8%; 1%; 1,5%; 2,5%, y 13%, donde K_t varía entre 9,92906E-8 y 1,52669E-7; b varía entre 1,51934 y 1,70542.

En la Tabla 4 se muestran los estadísticos de ajuste de las Ecuación (6) al conjunto de observaciones obtenidas a partir de las pruebas de campo en los surcos de las pendientes: 0,8%, 1%, 1,5%, 2,5% y 13%. R^2 es igual a 0,73. R^2_{ajust} es igual a 0,73, se encontró una reducción poco significativa en relación al R^2 . *Cp de Mallows*: se encontró que disminuye ligeramente en relación al número de variables independientes en cada ecuación. *Estadístico*

de Durbin-Watson: resultó igual a 0,719. En cuanto a los errores, se comparan los resultados durante las etapas de la calibración y la validación haciendo énfasis en el EPMA y EPM: el primero varió entre 56,31 y 63,0818; y el segundo entre -13,36 y -31,831. En general, los errores no varían significativamente entre las etapas de calibración y validación.

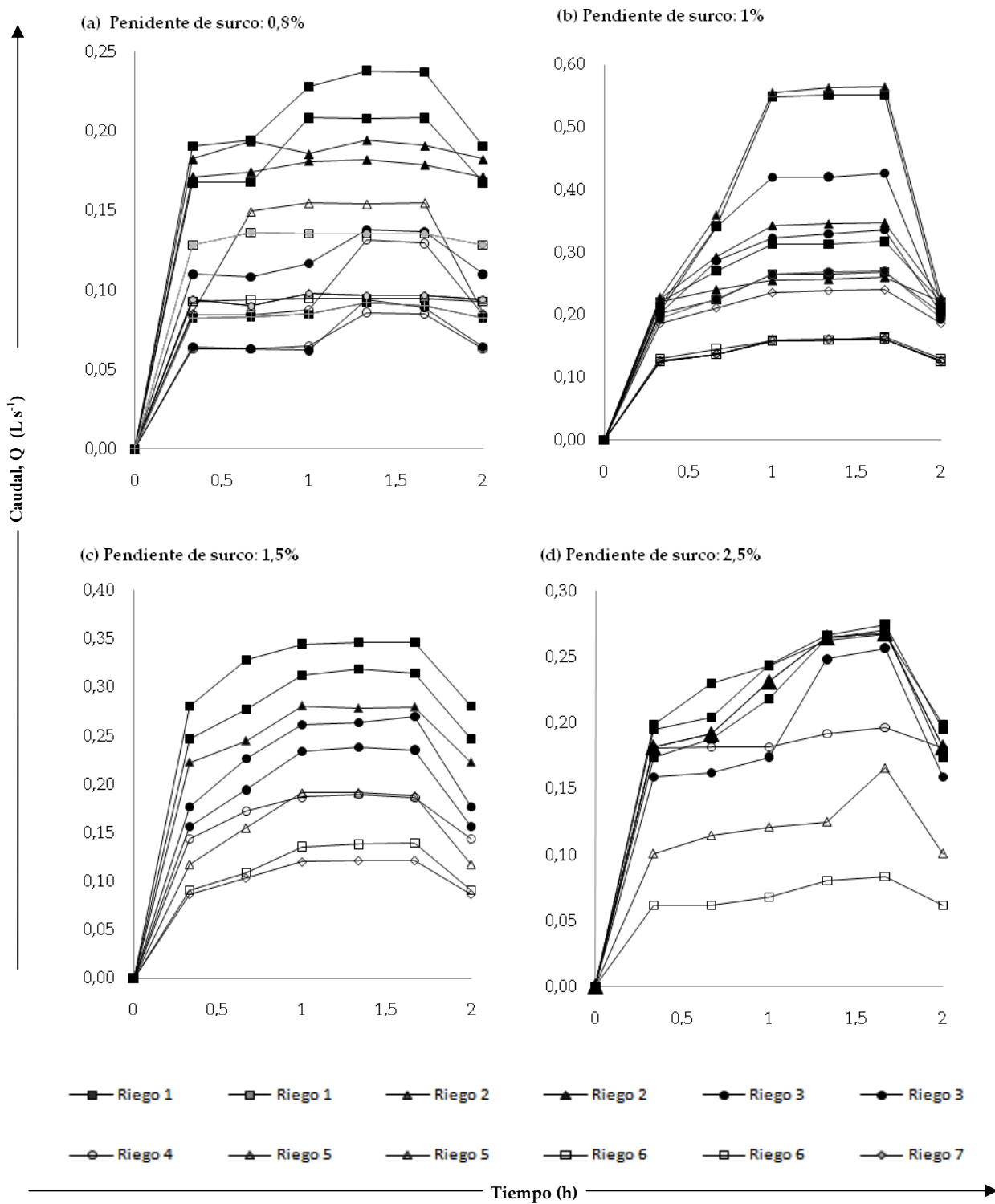


Figura 1.- Hidrogramas medidos para diferentes pendientes de surcos durante cada evento de riego

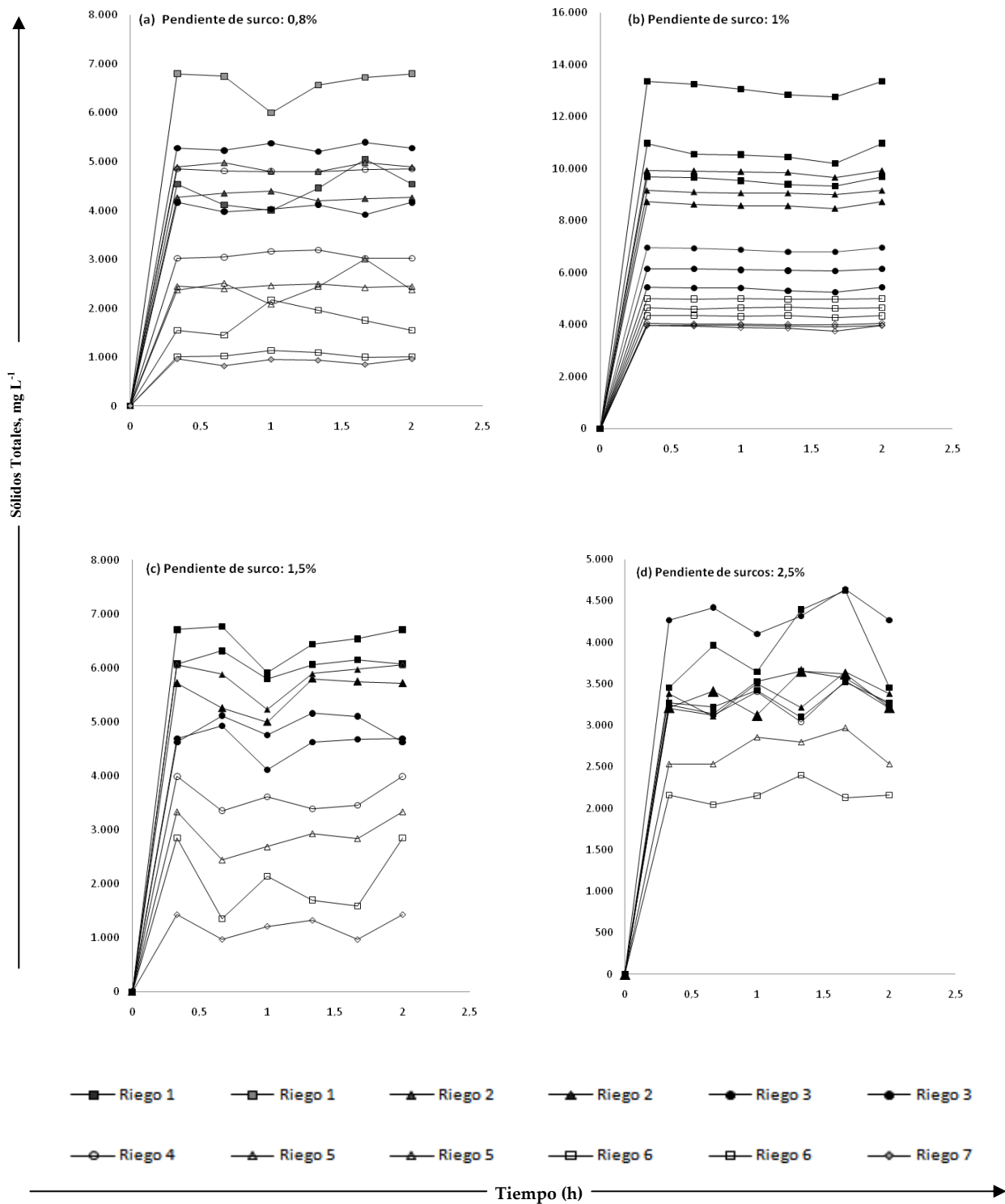


Figura 2.- Sólidos totales medidos para diferentes pendientes de surcos durante cada evento de riego

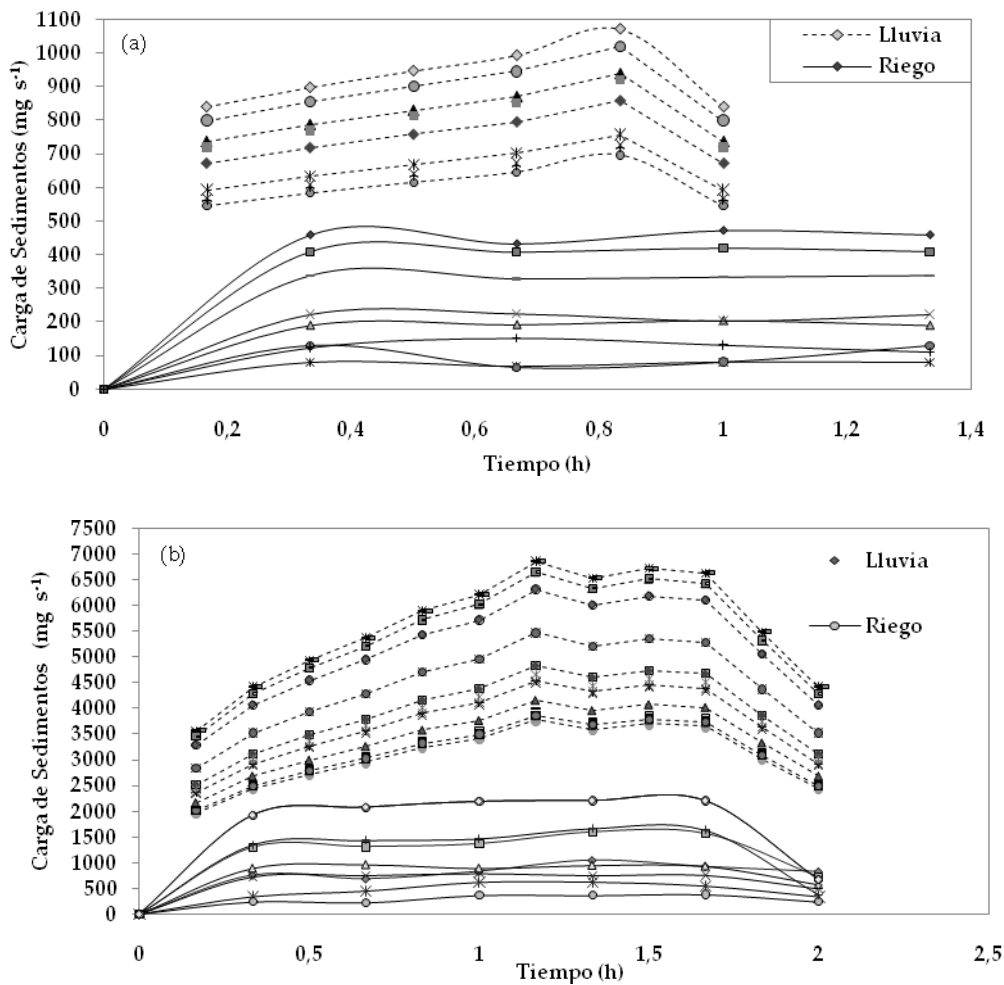


Figura 3.- Carga de sedimentos medida durante eventos de lluvia y riego

T

(D_c)

Ec.	Variable	Parámetro	Unidad	Promedio	Error Estándar	Límite Mínimo	Límite Máximo
4	D _c	K _r	s/m	0.000001418	5.43497E-8	0.00000131163	0.0000015255
	(kg/s/m ²)	τ _c	Pa	1.09707	0.199697	0.704172	1.48997

Tabla 2.- Resultados en la Calibración del Modelo para la Estimación de la Capacidad de Desprendimiento de Partículas Sólidas (D_c)

Ec.	p	n	R ²	(R ²)adj.	C _p	S _{XY}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	n	EPMA	EPM
a) Durante la Calibración													b) Durante la Validation		
4	1	320	0.682	0.681	0	2.45E-6	0.66	6.04E-12	2.08E-06	47.87	-7.72E-13	-20.52	84	57.9	-33.74

Ec.: Ecuación; p: Número de variables independientes en el modelo; n: Número de datos observados; R²: Coeficiente de determinación; (R²)adj.: coeficiente de determinación ajustado; C_p: Coeficiente de Mallows; S_{XY}: Error estándar de estimación; d: estadístico de Durbin Watson; ECM: Error Cuadrático Medio; EMA: Error Medio Absoluto; EPMA: Error Porcentual Medio Absoluto (%); EM: Error Medio; EPM: Error Porcentual Medio (%).

Tabla 3.- Coeficientes de regresión del modelo de capacidad de transporte de sedimentos

Ec.	Variable	Parámetros	Unidad	Promedio	Error Estándar	Límite Mínimo	Límite Máximo
6	T _c	K _t	kg ^{1-b} m ^{-(1-b)} s ^{-(1-2b)}	1,2598E-7	1,35793E-8	9,92906E-8	1,52669E-7
		b		1,61238	0,0473371	1,51934	1,70542

Tabla 4.- Criterios de desempeño del modelo de capacidad de transporte de sedimentos

Ec.	p	n	R ²	(R ²)adj.	Cp	S _{XY}	d	ECM	EMA	EPMA	EM	EPM	n	EPMA	EPM
a) Durante la Calibración													b) Durante la Validation		
6	1	437	0,73	0,73	0	1,10E-06	0,71	1,22E-12	9,16E-07	63,08	4,24E-08	-31,83	100	56,31	-13,36

Ec.: Ecuación; p: Número de variables independientes en el modelo; n: Número de datos observados; R²: Coeficiente de determinación; (R²)adj.: coeficiente de determinación ajustado; Cp: Coeficiente de Mallows; S_{XY}: Error estándar de estimación; d: estadístico de Durbin Watson; ECM: Error Cuadrático Medio; EMA: Error Medio Absoluto; EPMA: Error Porcentual Medio Absoluto (%); EM: Error Medio; EPM: Error Porcentual Medio (%).

EFFECTO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DEL FLUJO Y LA ERODABILIDAD DE LOS SUELOS SOBRE LOS PROCESOS DE EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS

DURANTE EVENTOS DE RIEGO

En la Figura 4 se presentan, como una muestra, las comparaciones de los procesos del modelo de erosión en surcos de pendientes 0,8%, 1% y 1,5%; seleccionando eventos de riego de la primera y segunda etapa del ciclo de siembra bajo riego. Posteriormente se hará una comparación de los procesos dentro del ciclo de siembra para todas las diferentes pendientes de los surcos (Figura 5). Los datos seleccionados corresponden a la primera etapa del ciclo de siembra. **Pendiente 0,8%:** En la Figura 4(a) se muestra una comparación entre la capacidad de transporte de sedimentos (T_c) estimada mediante la Ecuación (5) y la carga de sedimentos (CQ) medida en las pruebas de campo; en los primeros tres intervalos del riego $wT_c > CQ$, lo que indica que está ocurriendo un flujo poco concentrado, luego en los dos últimos intervalos se muestra que $wT_c < CQ$. En la Figura 4(b) se muestra que ocurre un incremento del proceso de erosión, lo cual refleja la concentración del flujo y posterior deposición al final del intervalo de riego. **Pendiente 1%:** En la Figura 4(c) se muestra una comparación entre la capacidad de transporte de sedimentos (T_c) estimada mediante la Ecuación (5) y la carga de sedimentos (CQ) medida en las pruebas de campo; $wT_c < CQ$ durante todo el ciclo, sólo ocurre un flujo concentrado. En la Figura 4(d) se muestra que sólo ocurre deposición. Estos resultados se podrían explicar con base en una pendiente baja y acumulación de sedimentos en el surco. **Pendiente 1,5%:** En la Figura 4(e) se muestra una comparación entre la capacidad de transporte de sedimentos (T_c) estimada mediante la Ecuación (5) y la carga de sedimentos (CQ) medida en las pruebas de campo; $wT_c > CQ$ durante todo el ciclo. En la Figura 4(e) se muestra que solo ocurre erosión. Estos resultados se podrían explicar con base en una mayor pendiente y el efecto de la cobertura vegetal.

DURANTE EL CICLO DE SIEMBRA

Los datos usados para la evaluación en los modelos han sido promediados por etapa, tomando cada etapa integrada por cuatro semanas. En las Figuras 5(a) a 5(e) se muestran aproximaciones a los eventos que ocurren durante el ciclo de siembra dividido en tres etapas. **Pendiente 0,8%:** en la primera etapa predominan la erosión y el transporte. En la segunda etapa predominan la deposición y el transporte, en la tercera erosión y transporte. (Figura 5(a)). **Pendiente 1%:** en la primera etapa predominan la deposición y el transporte. En la segunda etapa predomina la deposición y el transporte, en la tercera erosión y transporte (Figura 5(b)). **Pendiente 1,5%:** en la primera etapa predominan la deposición y el transporte.

En la segunda etapa predomina la erosión y el transporte, en la tercera erosión y transporte (Figura 5(c)). **Pendiente 2,5%:** en la primera etapa predominan la deposición y el transporte. En la segunda etapa predomina la erosión (en magnitud poco significativa) y el transporte, en la tercera la erosión (en magnitud poco significativa) y el transporte (Figura 5(c)). **Pendiente 13%:** en la primera etapa predominan la deposición y el transporte. En la segunda etapa predomina la erosión y el transporte, en la tercera erosión y el transporte (Figura 5(c)).

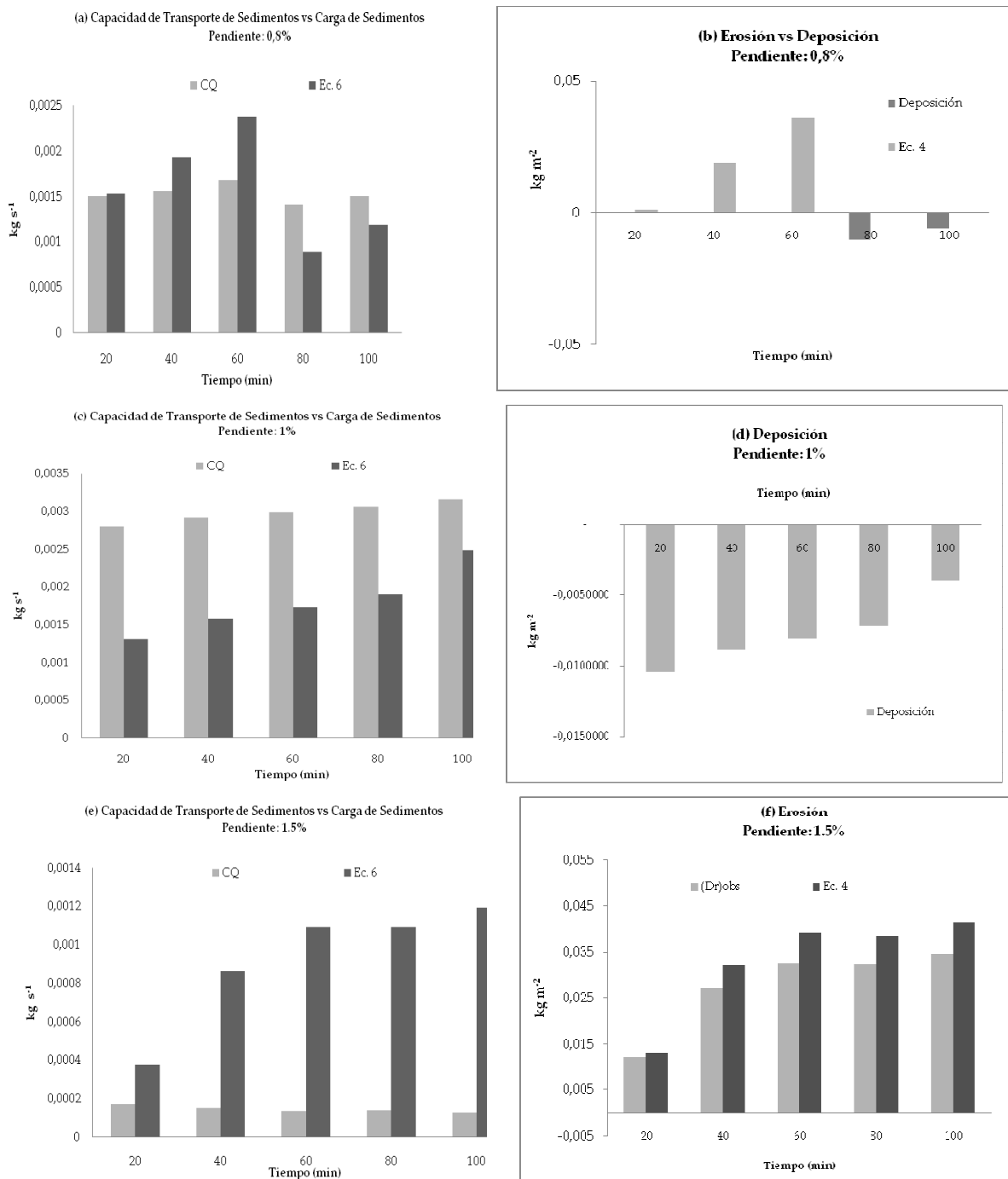


Figura 4.- Comparación de los procesos de erosión estimados mediante la aplicación de las ecuaciones de la forma dinámica del modelo WEPP (capacidad de transporte de sedimentos, erosión y deposición) con las observaciones de la carga de sedimentos en la salida de un surco durante un evento de riego en parcelas de diversas pendientes.

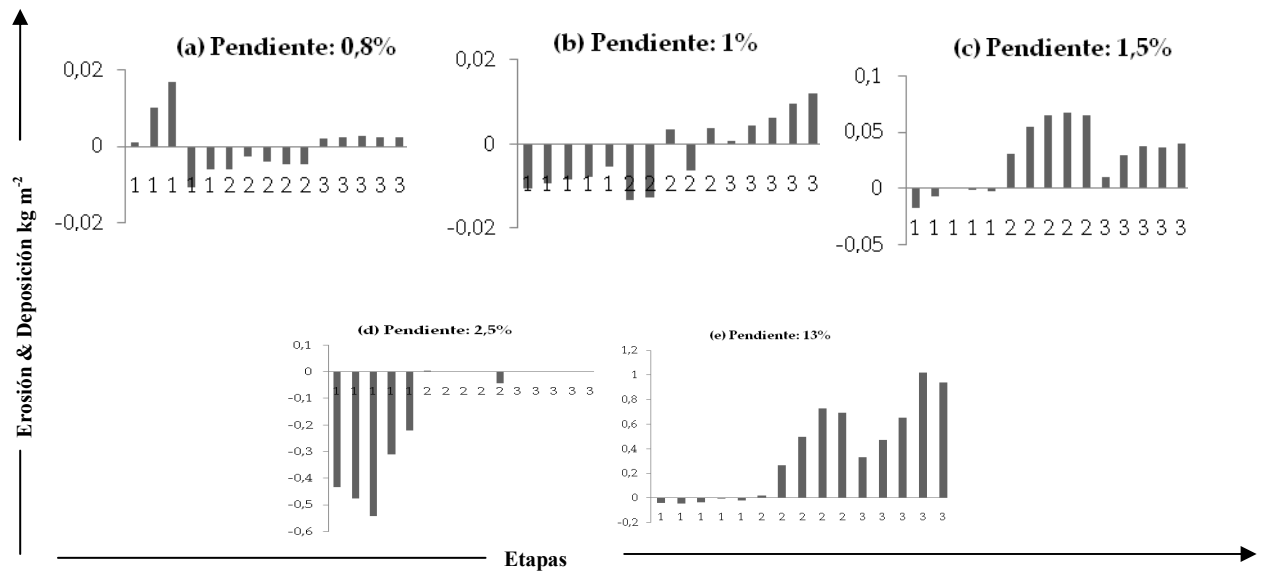


Figura 5.- Erosión y deposición estimadas durante eventos de riego en la salida de un surco empleando datos promediados por etapa en parcelas de diversas pendientes (cada etapa representa 1/3 del tiempo del ciclo de siembra).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los rangos de los parámetros K_t y b reportados en la sección de resultados para el modelo de capacidad de transporte de sedimentos resultó significativamente variable para las diferentes pendientes de surcos. Según Finkner, (1989) y Trout, (1999) mediante pruebas de campo, K_t y b varían entre: 0,0015-0,05 ($\text{kg}^{1-b} \text{m}^{-(1-b)} \text{s}^{-(1-2b)}$) y 1,5; 0,017-0,15 ($\text{kg}^{1-b} \text{m}^{-(1-b)} \text{s}^{-(1-2b)}$) y 2-4; respectivamente; aproximándose a los indicados en la Tabla 5, sin embargo la variabilidad es alta. En general, con respecto a los estadísticos de ajuste del modelo (6) se observa un ajuste satisfactorio a las observaciones de la mayoría de las ecuaciones, algunas de las razones son: (1) el coeficiente de determinación R^2 se aproxima 0,7; (2) el coeficiente R^2 ajustado se reduce de una manera poco significativa, (3) los errores porcentuales medio absoluto y medio entre los valores observados y estimados resultaron moderadamente bajos.

Tabla 5.- Parámetros de los modelos para la estimación de la capacidad de transporte de sedimentos del flujo en surcos y características de las pruebas de campo para su obtención

$T_c = K_t(\tau)^b$											
Fuente	T_c ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	K_t	τ (Pa)	b	Pendiente (%)	Q (l min^{-1})	I_{lluvia} (mm h^{-1})	Dim. surco (m) o (mxm)	SS	Tipo de suelo	OP
Finkner et al. (1989)	0,0006-0,2366	0,015-0,05	1-6	1,5	2-20	n.d.	80-83	10, 50 y 100 m de longitud	n.d.	Franco limoso	Ec. Yalin (1963)
Trout (1999)	0,002-0,035	0,017-0,065	n.d.	2	1,3	6-18	n.d.	204 m de longitud	Cultivado con frijol	Franco limoso	A
	0,001-0,02	0,015-0,15	n.d.	4	0,5	6-45,6	n.d.	256 m de longitud	Cultivado con maíz	Franco limoso	A

n.d.: no disponible. n.a.: no aplicable, T_c : valores observados de la capacidad de transporte de sedimentos. K_t : valores estimados del coeficiente de transporte. τ : Esfuerzo cortante del flujo. b : exponente, c : coeficiente, ω : potencia de la corriente unitaria, ω_c : potencia de la corriente unitaria crítica. Suelos: número de suelos probados; TS: número de tipos de tratamientos de suelos; 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; Flujo: origen del flujo (R: lluvia simulada, I: aporte), Dim. Surcos dimensiones de surcos (longitud x ancho), SS: Superficie del suelo, Tipo de suelo: d_{50} . Tamaño medio de partícula. OP: origen de los parámetros (A: Ajustado mediante técnicas de curvas)

EFFECTO DE LA CAPACIDAD DE TRANSPORTE DEL FLUJO Y LA ERODABILIDAD DE LOS SUELOS SOBRE LOS PROCESOS DE EROSIÓN HÍDRICA DE SUELOS

DURANTE EVENTOS DE RIEGO

Los procesos de erosión en surcos: capacidad de transporte de sedimentos, erosión y deposición estimados para las diferentes pendientes fueron comparados con la carga de sedimentos medidos en el tiempo mediante pruebas de campo en los surcos. Los sedimentogramas obtenidos mediante la Ecuación (6) se aproximan satisfactoriamente a los valores de la carga de sedimentos para la mayoría de las pendientes, presentando algunas diferencias significativas para la pendiente más baja (0,8%). La aproximación entre la carga de sedimentos y la capacidad de transporte de sedimentos se basa en el ajuste de los modelos de T_c a partir de la serie de máximos valores para la carga de sedimentos dentro de cada evento de riego para las diferentes pendientes de surcos probadas. En general, la carga de sedimentos se incrementa con el tiempo, estabilizándose luego que ha transcurrido el primer cuarto de tiempo del evento de riego.

DURANTE EL CICLO DE SIEMBRA

Tomando cada etapa del ciclo de siembra bajo riego integrada por cuatro semanas, para un total de tres etapas y promediando los datos por cada etapa para los surcos de pendientes entre 0,8% y 13%, se encontraron los siguientes resultados (Figura 5): en la primera etapa, la carga de sedimentos tiende a ser mayor que la capacidad de transporte de los sedimentos favoreciendo la ocurrencia de los procesos de deposición, lo que es influenciado por la pre-existencia de sedimentos en el surco y la ubicación del punto sobre el surco en el cual se realice la evaluación (salida del surco). En la segunda y tercera etapa, disminuye la carga de sedimentos en la corriente y tienen mayor efecto los procesos de desprendimiento y transporte de sedimentos, lo que se incrementa con la pendiente. Trout (1996) y Bjerneberg et al., (1999) encontraron que la erosión en la salida de surcos de pendiente entre 0,5 y 1,3% para cultivos de frijol y maíz varía como sigue: 0,1-0,3 kg m⁻² y 0,05-0,1 kg m⁻², respectivamente. En esas mismas condiciones, se encontró que el proceso de deposición varía entre: 0,8-1,8 kg m⁻² y 0,2-0,6 kg/m², respectivamente. En esta investigación se encontró en promedio que la erosión para pendientes entre 0,8-1,5% es menor a 0,08 kg m⁻², alcanzando valores hasta de 1 kg m⁻² para pendientes del 13% (Figura 5). Así mismo, el proceso de deposición para pendientes entre 0,8-1,5% varía como sigue: 0,01-0,5 kg m⁻², los cuales se aproximan a los reportados en Trout (1996) y Bjerneberg et al., (1999). De lo antes expuesto, se aprecia la influencia que las prácticas agrícolas tienen sobre la erosión del suelo.

CONCLUSIONES

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

- ❖ Se encontró un ajuste satisfactorio de los componentes del modelo WEPP, mediante los cuales se estiman la capacidad de desprendimiento de partículas del suelo de los surcos y de transporte de sedimentos a las observaciones en surcos de pendientes entre 0,8 y 13%, en términos del coeficiente de determinación, R^2 próximo a 0,7.
- ❖ En la aplicación, se encontró que la carga de sedimentos tiende a ser mayor que la capacidad de transporte de sedimentos en la etapa inicial del ciclo bajo riego

ocurriendo sedimentación y disminuye progresivamente entre la segunda y tercera etapa ocurriendo un proceso combinado de desprendimiento y transporte, lo que parece ser influenciado principalmente por el incremento en la cobertura vegetal.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, “Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater”, American Public Health
- 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.
- 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.
- COCHRANE, T.A., D.C. FLANAGAN. Detachment in a simulated rill. *Trans. ASAE* 40:111–119. 1996.
- FLANAGAN D.C., ASCOUGH J.C., NEARING M.A., LAFLÉN J.M. The Water Erosion Prediction Project model. In *Landscape Erosion and Evolution Modelling*, Harmon RS, Doe WW (eds) Kluwer: New York, 2001, pp. 145–199.
- 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. Modeling the erosion process. p. 296–380. In C.T Haan (ed.) *Hydrologic modeling of small watersheds*. ASAE, Joseph, MI. 1982.
- 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.
- 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.
- MEYER, L.D., E.J. MONKE. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. *Trans. ASAE* 8:572–580. 1965.
- 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.
- RICE, C.T., B.N. WILSON. Analysis of dynamic variables of rill flow. ASAE Paper 902011. ASAE, St. Joseph, MI. 1990.

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.

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.

YALIN Y.S. An expression for bed-load transportation. *Journal of Hydraulics Division ASCE* **89**(HY3), pp. 221–250. 1963



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



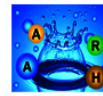
Secretaría del Agua



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

