

# **Simulación del riesgo de erosión en una cuenca agrícola con el modelo LISEM: influencia de la dirección de laboreo y medidas agronómicas**

Simulation of erosion risk in an agricultural  
catchment with LISEM model: influence of  
tilling direction and agronomic measurements

TABOADA CASTRO, M. M. & MIRÁS AVALOS, J. M.

## **ABSTRACT**

**Results of a series of simulations made in an agricultural catchment in A Coruña using LISEM model are shown. We tried to assess the influence that exert over the runoff and the soil loss factors such as tilling direction, wheeltracks systems, use of grass strips, increasing of random roughness or the increase of hydraulic conductivity.**

**To define the simulated scenarios we used morphologic data of the catchment and supposed refered to plot distribution and land uses as well as input parameters, experimental and bibliographical. In all cases, they were simulated with precipitations with a return period of 2 and 25 years. Under these conditions we estimated that the runoff risk is associated, fundamentally, to intense precipitation events. This risk tend to increase when, as a consequence of tilling, soil infiltration capacity is reduced. Other factors, as tilling direction and wheeltracks systems, influence, more or less, in the magnitude of the runoff produced in a small agricultural catchment.**

**Key words: LISEM, simulation, agricultural catchment, runoff, soil loss.**

## INTRODUCCIÓN

Diversos trabajos y observaciones de campo realizadas en suelos de cultivo de Galicia, esencialmente en la zona de los esquistos del Complejo de Ordenes, han puesto de manifiesto que los fenómenos de generación de excedente de agua y erosión concentrada están particularmente extendidos, a pesar de la intensidad relativamente baja de la precipitación y de la topografía moderada (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999; CACHEIRO POSE *et al.*, 2001a; VALCÁRCEL ARMESTO *et al.*, 2002).

Tanto los anteriores autores como la mayor parte de los que han analizado la erosión en terrenos agrícolas de zonas atlánticas de Europa, resaltan que la acción del agua de escorrentía viene determinada no sólo por factores topográficos y climáticos, sino que juegan un destacado papel las prácticas agrícolas (LUDWIG, 1992; AUZET *et al.*, 1995; De ROO *et al.*, 1995; TAKKEN *et al.*, 1999; Van DIJCK; TAKKEN *et al.*, 2001).

Los sistemas de cultivo junto con el suelo y el clima inducen una gran variabilidad espacial y temporal de las características de la superficie y de la red de drenaje. Entre las actividades agrícolas que afectan a la dinámica de los procesos erosivos destaca el cultivo que se establece y el tipo de rotación, las modalidades de siembra, el manejo de la cosecha y sus residuos, la frecuencia e intensidad del tráfico de maquinaria agrícola, la dirección de los surcos de cultivo y las rodadas en relación con la topografía del terreno (BOIFFIN *et al.*, 1988; VALCÁRCEL ARMESTO *et al.*, 1999; FLEIGE y HORN, 2000) y,

finalmente, aspectos como la distribución espacial de las parcelas.

Dos de los parámetros a los que afectan las modificaciones de la superficie del suelo son la capacidad de infiltración y la rugosidad superficial, los cuales sufren rápidos cambios con las operaciones de cultivo: aumentan tras la labranza del suelo y disminuyen más o menos rápidamente al degradarse la estructura del suelo por acción de la precipitación.

En relación con la red de drenaje superficial, las prácticas de laboreo y el manejo del suelo pueden modificar la dirección del flujo y las características del sistema de canales a favor de los que éste se concentra (SOUCHERE *et al.*, 1998), sobre todo en áreas con un gradiente de pendiente débil o moderado, por lo que son posibles medidas a adoptar a escala de cuenca. BLJENBERG *et al.* (2000) diferencian hasta cuatro posibles tipos de redes de drenaje en el interior de una cuenca agrícola: red de origen *topográfico*, que sigue la línea de la máxima pendiente, red debida a la *dirección del laboreo*, red *superpuesta a las rodadas*, de carácter más bien semipermanente que se forma como consecuencia de determinadas operaciones tales como fertilización o recolección, red de canales permanentes, que puede existir en determinadas situaciones, y estar constituida por estructuras artificiales e incluso por cárcavas permanentes.

Aunque la escorrentía se genere en una parcela, sus efectos deben ser estudiados a escala de cuenca, dado que la distribución de la escorrentía en una cuenca agrícola y la intensidad de la descarga depende de la acumulación y concentración del excedente de agua, el cual va a estar condicionado por la topografía y por factores agrarios.

Los últimos avances en modelización han ido encaminados a simular el efecto de la acumulación de escorrentía producida en diferentes parcelas. Del conjunto de modelos de evaluación de las pérdidas de suelo, suficientemente ajustados, el LISEM (The Limburg Soil Erosion Model) (De ROO *et al.*, 1995, 1996 a, b) presenta la ventaja frente a los restantes de que puede simular la influencia de las prácticas agrícolas sobre la red de drenaje. Las últimas versiones de este modelo tienen en cuenta el efecto conjunto de las características topográficas, las modificaciones que el laboreo impone a la red de drenaje y las estructuras en el límite de las parcelas para modelizar la escorrentía y la intensidad de la erosión.

Previamente al diseño de estrategias de conservación del suelo, es necesario llevar a cabo una evaluación del riesgo potencial de erosión hídrica. En la zona de los Esquistos de Órdenes los estudios llevados a cabo hasta el presente han puesto de manifiesto que los principales factores que conviene tener en cuenta para prevenir la erosión son el encostrado del suelo, la dirección de laboreo, la rugosidad de la superficie, la presencia de bandas verdes y la labranza del suelo después de la cosecha.

En este trabajo se presentan los resultados de las simulaciones llevadas a cabo en una cuenca agrícola mediante el modelo LISEM. Se evalúa la descarga total, la descarga punta y las pérdidas de suelo teniendo en cuenta el efecto de la modificación de la dirección de laboreo, el sistema de rodadas, el aumento de la rugosidad e incremento de la conductividad hidráulica de la parcela y también el uso de bandas verdes.

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Características del área de estudio

Las simulaciones se efectuaron en una cuenca agrícola denominada Pelamios, de aproximadamente 25 ha, que se encuentra situada en la localidad de Mabegondo (A Coruña). El material de partida de los suelos son esquistos básicos pertenecientes a la formación geológica denominada "Complejo de Ordenes" (MARTINEZ *et al.*, 1984). Los suelos presentan textura franca o franco-limosa en el horizonte de laboreo (ULLOA GUITIAN, 1998), lo que les hace susceptibles a la degradación de la estructura y a la formación de costra (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999 b; TABOADA CASTRO, 2001).

Su altura oscila entre aproximadamente 95 y 135 m. El cauce principal generalmente se encuentra generalmente seco. Su pendiente media es de 4.17 %. En la parte baja y próxima al cierre presenta una zona de meseta y de fondo de valle con pendiente débil (< 3.3 %) y una zona de ladera de pendiente moderada (3.3-6.5%). En la parte alta la pendiente es más fuerte, del orden del 13%.

El clima del área experimental, y en general de toda la provincia de A Coruña, es atlántico caracterizado a grandes rasgos por temperaturas suaves durante todo el año y precipitaciones abundantes en la estación invernal.

### Características del modelo LISEM

Para efectuar las simulaciones se utilizó el modelo LISEM, que simula la hidrología y el transporte de sedimentos durante e inmediatamente después de un evento

de precipitación simple en una cuenca de drenaje. Por tanto puede ser usado para evaluar los efectos del uso actual de la tierra y los efectos de introducir medidas de conservación del suelo. LISEM es un modelo con base física que está completamente integrado en un SIG tipo Raster (Van DEURSEN y WESSELING, 1992; KARSSENBERG, 1996).

Los procesos incorporados en el modelo LISEM son: precipitación, interceptación, almacenamiento temporal en microdepressiones de la superficie, infiltración, movimiento vertical del agua en el suelo, flujo superficial, flujo en el sistema de canales, disgregación por impacto directo de la precipitación, disgregación por flujo superficial y capacidad de transporte asociado al flujo. También se simulan la influencia de rodadas de tractor, pequeñas carreteras pavimentadas (más pequeñas que el tamaño de una celda) y, en superficies con costra, los procesos hidrológicos y de erosión del suelo que tienen lugar.

Los mapas de entrada empleados para llevar a cabo la simulación, se presentan en la tabla 1. El mapa básico a partir del cual se comienza a trabajar es el modelo de elevación digital de la cuenca (MED) que fue obtenido a partir de datos topográficos.

Los resultados del modelo LISEM, incluyen un fichero de texto con los totales (descarga total, descarga punta, pérdida de suelo total, ...), un fichero de datos ASCII el cual puede ser usado para dibujar hidrogramas y sedimentogramas, también se obtienen mapas de erosión del suelo y deposición, y mapas de flujo superficial como intervalos de tiempo deseados durante el evento.

### **Escenarios simulados**

Se elaboraron escenarios para evaluar en términos aproximados el riesgo de escorrentía y erosión en la cuenca de Pelamios. Los cálculos se efectuaron mediante la versión 1.55 de LISEM. La opción utilizada para evaluar la infiltración fue la de Green-Ampt. Además en algunos escenarios se utilizó una nueva versión de LISEM (1.68) que permite dar cuenta del efecto de las rodadas, cuando forman parte del sistema de canales a través del que discurre el flujo concentrado.

Para llevar a cabo las simulaciones se utilizaron precipitaciones sintéticas (datos de la estación de Alvedro, A Coruña) con una duración de 90 minutos y periodos de retorno de 2 y 25 años. En el primer caso la altura de la lámina de agua es de 18.76 mm y en el segundo de 39.35 mm.

Se construyó un escenario teórico considerando que la cuenca se encontraba dividida en 5 parcelas con diferente extensión (tabla 2) y dedicación (figura 1): la situada en la parte más alta de la cuenca con pradera y las cuatro restantes con un cultivo de maíz. Se considera que el maíz se encontraba en los primeros estadios de su desarrollo o recién sembrado y que la conductividad del lecho de siembra ya había disminuido significativamente en relación con la de la superficie inicial, permeable y porosa, debido a la presencia de costra.

En la tabla 2 se presentan los valores de los principales parámetros del suelo y las características del sistema de rodadas utilizados para simular los escenarios de escorrentía. Se parte de un contenido hídrico constante para toda la cuenca. A pesar de

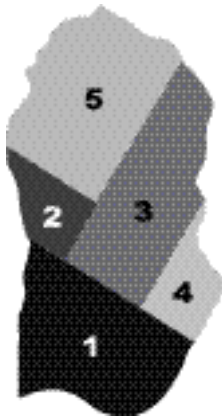
NOMBRE DEL MAPA	CONTENIDO	DATOS	UNIDADES
<b>Morfología de la cuenca</b>			
AREA.map	Contorno de la cuenca	Booleano	
ID.map	Área asignada a cada pluviómetro	Nominal	
LDD.map	Dirección de drenaje	lidd	
GRAD.map	Gradiente de pendiente	Escalar	-
OUTLET.map	Situación del cierre de la cuenca	Nominal	
ROADWIDT.map	Anchura de las rodadas	Escalar	m
<b>Mapas de Uso del suelo</b>			
LAI.map	Índice de área foliar	Escalar	-
PIR.map	Porcentaje de suelo cubierto por vegetación	Escalar	-
RR.map	Rugosidad aleatoria	Escalar	cm
CH.map	Altura del cultivo	Escalar	m
AGGRSTAB.map	Estabilidad de agregados	Escalar	-
COH.map	Cohesión del suelo	Escalar	kPa
COHADD.map	Cohesión adicional debida a las raíces	Escalar	kPa
N.map	n de Manning	Escalar	-
D50.map	D50 para la superficie	Escalar	µm
STONEPRC.map	Porcentaje de suelo con piedras	Escalar	-
WHEELWID.map	Anchura de las rodadas	Escalar	m
GRASSWID.map	Anchura de las bandas verdes	Escalar	m
<b>Mapas de canales</b>			
LDDCHAN.map	Dirección local de drenaje de la red de canales	lidd	
CHANGRAD.map	Pendiente de los canales	Escalar	-
CHANMAN.map	n de Manning para los canales	Escalar	-
CHANCOH.map	Cohesión del lecho del canal	Escalar	kPa
CHANWIDT.map	Anchura del canal	Escalar	m
CHANSIDE.map	Sección del canal y aspecto de la misma	Escalar	-
<b>Gen &amp; Ampt con un horizonte</b>			
KSAT1.map	Conductividad hidráulica saturada	Escalar	mm/hr
THETA11.map	Contenido hídrico volumétrico	Escalar	-
THETA11.map	Contenido hídrico inicial volumétrico	Escalar	-
PS11.map	Tensión en el frente hídrico	Escalar	cm
SOILDEP1.map	Profundidad del suelo	Escalar	mm

Tabla 1. Datos de entrada para el modelo LISEM.

que existe una importante variabilidad a escala de parcela de propiedades como la conductividad hidráulica (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999 a; PAZ GONZÁLEZ, *et al.*, 2001) y la rugosidad aleatoria y de que la respuesta del modelo LISEM es muy sensible a la conductividad hidráulica (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999; BLJENBERG *et al.*, 2000; MIRÁS AVALOS y LÓPEZ CANDÍA, 2000), el

valor de estos parámetros se consideró constante para cada uso del suelo.

Así la conductividad hidráulica se cifró en 30 mm/h en la pradera y en 5 mm/h en el terreno sembrado de maíz. La rugosidad aleatoria (RR) de la parcela 1 se cifró en 1.2 cm y en 0.9 cm en las restantes, para lo que se tuvieron en cuenta las medidas experimentales efectuadas en Mabegondo (LADO LIÑARES, 1999).



Parcela 1: pradera (zona alta)  
 Parcela 2: maíz  
 Parcela 3: maíz  
 Parcela 4: maíz  
 Parcela 5: maíz (cierre de la cuenca)

Figura 1. Mapa teórico de usos del suelo en Pelamios utilizado para las simulaciones.

Parcela N°	Área (ha)	Cultivo	Déficit hídrico	Ksat (mm/h)	Rodadas		
					Distancia (m)	Anchura (m)	Prof. (cm)
1	7.00	Pradera	0.03	30	-	-	-
2	1.88	Maíz	0.03	5	12	0.4	2
3	6.65	Maíz	0.03	5	12	0.4	2
4	1.96	Maíz	0.03	5	12	0.4	2
5	7.49	Maíz	0.03	5	36	0.4	2

Parcela N°	n de Manning	D50 (m)	RR (cm)	Agg.	Cohesión (kPa)	Cobertura (%)
1	0.2	65	1.2	-	3.25	90
2	0.07	40	0.9	20	0.9	0
3	0.07	40	0.9	20	0.9	0
4	0.07	40	0.9	20	0.9	0
5	0.07	40	0.9	20	0.9	0

Ksat: conductividad hidráulica a saturación; D50: Diámetro medio; RR: rugosidad aleatoria; Agg: estabilidad de los agregados

Tabla 2. Información utilizada para simular escenarios de riesgo de erosión.

Inicialmente, se considera que la dirección de laboreo y por lo tanto la dirección del sistema de rodadas viene definido por la longitud máxima de cada parcela. El valor de la n de Manning se fijó en 0.2 en la parcela dedicada a pra-

dera y en 0.07 en las demás. En base a los datos medios de análisis granulométrico, el parámetro D50 se fijó en 65  $\mu\text{m}$  para la parcela número 1, y en 40  $\mu\text{m}$ , para las otras cuatro. La cohesión aparente se establece de acuerdo con la bibliografía

en 3.55 kPa en la parcela número 1 y en 0.9 kPa en las demás parcelas. La cubierta vegetal del suelo se cifró en el 90% en la parcela 1 y en 0% en las recién sembradas de maíz.

Para analizar la influencia de las labores agrícolas y las medidas de conservación, en las simulaciones se consideraron factores tales como la dirección de laboreo, presencia o ausencia de rodadas actuando o no como canales de drenaje. También se tuvo en cuenta el efecto de las bandas verdes y de labores adicionales que podían modificar características de la superficie como la rugosidad aleatoria (aumentarla) ó la conductividad a saturación (aumentarla).

Se simularon un total de 8 escenarios diferentes, de los cuales uno (escenario 0) sirve como testigo para referir los datos de las otras simulaciones. En los 7 escenarios restantes, se efectúan modificaciones de los diversos parámetros considerados, exclusivamente en la parcela del cierre de la cuenca (parcela 5) según el esquema de la tabla 3, y las bandas verdes estarían situadas en el límite entre las cinco parcelas.

Las situaciones simuladas pretenden representar en términos aproximados las

técnicas de laboreo y las condiciones hídricas de la superficie del suelo de una primavera húmeda, tras la preparación del lecho de siembra de maíz.

En el **escenario 0** las labores de siembra, y en general, todas las labores agrícolas se efectúan siguiendo la longitud máxima de cada parcela, y por lo tanto la dirección del sistema de rodadas viene simplemente predeterminada por esta forma de manejo.

En los **escenarios 1 y 2** se consideró que el laboreo se lleva a cabo en la parcela 5 en la dirección de máxima pendiente. Con esta situación se pretende evaluar la acción de sistemas de laboreo que no tienen en cuenta los criterios básicos de conservación y manejo del suelo para limitar las pérdidas por erosión o controlar la escorrentía. En el **escenario 2** se utilizó una de las opciones de LISEM que permite efectuar la simulación teniendo en cuenta la presencia del sistema de rodadas que seguirá la dirección de la longitud máxima en las parcelas 2, 3, y 4 y la dirección de máxima pendiente en la parcela 5.

En los **escenarios 3 a 7** se consideró que en la parcela 5 la dirección del laboreo era perpendicular a la máxima pendiente. A

<i>Escenario N°</i>	<i>Principales características</i>
0	Laboreo según la longitud máxima de la parcela
1	Laboreo siguiendo la máxima pendiente
2	Laboreo siguiendo la máxima pendiente + rodadas
3	Laboreo perpendicular a la máxima pendiente
4	Laboreo perpendicular + bandas verdes
5	Laboreo perpendicular + bandas verdes + rugosidad aleatoria (RR)
6	Laboreo perpendicular + bandas verdes + RR + Ksat
7	Laboreo perpendicular + bandas verdes + RR + Ksat + rodadas

Tabla 3. Características de los escenarios simulados en Pelamios.

partir del escenario 4 se introdujeron otras medidas de conservación como la presencia de bandas verdes o la realización de determinadas labores. Estas simulaciones se llevaron a cabo teniendo presente que las labores previas a la siembra pueden ser una técnica esencial en el manejo del suelo, para limitar la formación de excedente de agua. En este sentido, la modificación de la dirección de laboreo no sólo origina cambios en el microrrelieve de la superficie del suelo, que hacen variar la capacidad de almacenamiento temporal de agua, sino que también llevan aparejada una variación de los sistemas de rodadas que pueden determinar alteraciones notables del sistema de drenaje, en el que se concentra el excedente hídrico.

Entre las técnicas de conservación del suelo más utilizadas, la labranza y la siembra, llevando el cultivo a nivel en la dirección transversal a la máxima pendiente, está considerado como uno de los métodos más eficaces para reducir las pérdidas de suelo (MORGAN, 1997). Por este motivo, en el **escenario 3** se simula el efecto del laboreo perpendicular a la máxima pendiente en la parcela 5 sin otras medidas adicionales de conservación.

Las bandas verdes no han sido muy utilizadas hasta el momento en Galicia, sin embargo, se trata de una medida de conservación conocida en las zonas atlánticas de Europa (BLJENBERG *et al.*, 2000). Desde el punto de vista operativo resulta más sencillo situarlas en el límite de parcelas, lo que representa una analogía evidente con una práctica común en Galicia, como es la presencia de caballones u otros motivos situados en los bordes de las parcelas, que modifican la dirección

de drenaje del excedente de agua. En todo caso, la localización de las bandas verdes, es un factor que interviene en su eficacia, por lo que, desde el punto de vista del manejo de la escorrentía puede ser recomendable su implantación fuera de los lindes de las parcelas.

El **escenario 4** simula el efecto conjunto de la presencia de bandas verdes (2 m de anchura) manteniendo la dirección de laboreo de la parcela 5 perpendicular a la máxima pendiente.

Partiendo de que un lecho de siembra rugoso aumenta la capacidad de almacenamiento temporal de agua por el microrrelieve y contribuye a la reducción de la escorrentía se consideró este efecto en el **escenario 5**, en el cual se aumentó la rugosidad aleatoria en la parcela 5, desde el valor de 0.9 cm utilizados en las anteriores simulaciones hasta 2.5 cm.

Una vez formada una costra durante las primeras etapas del desarrollo de un cultivo es frecuente la destrucción de la misma mediante labores de aporcado. Este supuesto se simuló en el **escenario 6** aumentando la conductividad hidráulica de la parcela 5 de 5 mm/h a 12 mm/h. En esta simulación se consideran simultáneamente los efectos de las medidas anteriores, es decir, laboreo perpendicular a la máxima pendiente, junto con bandas verdes en los límites de las parcelas e incremento de rugosidad aleatoria que en este caso puede lograrse durante el aporcado.

Finalmente, en el **escenario 7** se considera junto a las medidas anteriores la acción simultánea de la transferencia del excedente de agua a través del sistema de rodadas hacia la vaguada central y el cierre de la cuenca.



## RESULTADOS

En la tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos por simulación para precipitaciones de diferente intensidad. Para un periodo de retorno de 25 años en el **escenario 0**, es decir, en el testigo, se obtiene una descarga total de 3360 m<sup>3</sup> y una descarga punta de 1965 l/s, mientras que la media de las pérdidas de suelo se cifra en 5.17 t/ha. Estas cifras se pueden considerar realistas teniendo en cuenta datos experimentales previos (DAFONTE DAFONTE, 1999; VALCÁRCEL ARMESTO, 1999). En los **escenarios 1 y 2** se aprecia un aumento notable de las pérdidas de suelo con respecto al testigo, alcanzando valores aproximados de 7.12 y 10.6 t/ha, respectivamente. Sin embargo, resulta sorprendente que la descarga total en el **escenario 1** (2319 m<sup>3</sup>), aún manteniéndose elevada, sea inferior a la del testigo (3360 m<sup>3</sup>). Esto puede ser debido a las

peculiaridades topográficas de la parcela 5 que concentra agua en su vaguada central, por lo que las diferencias entre el laboreo siguiendo la longitud máxima de la parcela y el laboreo a favor de la pendiente no deben de ser muy importantes. En el **escenario 2**, al tener en cuenta el efecto del sistema de rodadas para la transferencia del excedente de agua, se obtienen los valores máximos de descarga total (3646 m<sup>3</sup>) y de pérdidas de suelo (10.6 t/ha).

El laboreo perpendicular a la dirección de máxima pendiente considerado en el **escenario 3** produce resultados totalmente diferentes. Las pérdidas de suelo se reducen drásticamente siendo de aproximadamente 0.50 t/ha, y al mismo tiempo, la descarga punta es del orden de 3 ó 4 veces inferior a la de los escenarios anteriores (tabla 4).

Si además de efectuar laboreo de conservación, es decir perpendicular a la máxima pendiente, se implantan bandas

25 años								
Escenarios	0	1	2	3	4	5	6	7
Precipitación total (mm)	39.35	39.35	39.35	39.35	39.35	39.35	39.35	39.35
Descarga total (m <sup>3</sup> )	3360.14	2319.76	3645.46	404.68	369.52	385.74	170.71	174.53
Caudal punta (l/s)	1965.85	762.63	803.34	219.89	206.30	185.70	87.54	72.84
Pérdida media de suelo (kg/ha)	5174.36	7116.66	10588.45	496.05	472.21	434.39	94.04	59.64
2 años								
Escenarios	0	1	2	3	4	5	6	7
Precipitación total (mm)	18.76	18.76	18.76	18.76	18.76	18.76	18.76	18.76
Descarga total (m <sup>3</sup> )	435.46	225.03	687.72	133.08	122.64	100.87	36.88	17.26
Caudal punta (l/s)	235.43	87.31	190.35	45.51	42.55	30.53	2.42	3.72
Pérdida media de suelo (kg/ha)	685.59	156.51	930.60	3.07	0.05	0.03	0.00	0.01

Tabla 4. Escorrentía y pérdidas de suelo estimadas en Pelamios.

verdes en los bordes de las parcelas, como ocurrió en el **escenario 4**, se reduce la descarga total y el caudal punta, pasando de 404.7 m<sup>3</sup> a 369.5 m<sup>3</sup> y de 219.9 l/s a 206.3 l/s respectivamente. Sin embargo, las pérdidas medias de suelo prácticamente no se modifican al situar las bandas verdes en esa posición, sólo descienden de 0.49 t/ha a 0.47 t/ha.

Si junto al efecto del laboreo perpendicular y la presencia de bandas verdes se tiene en cuenta un aumento de la rugosidad aleatoria en la parcela 5, como se indica en el **escenario 5**, se obtiene un resultado inesperado para la descarga total (tabla 4). Su valor fue de 385.8 m<sup>3</sup>, superior por lo tanto a los 369.5 m<sup>3</sup> del caso anterior. Este resultado puede ser debido a la interacción de las características topográficas y la rugosidad aleatoria, que de algún modo determinan que una mayor proporción del excedente de agua pueda ser canalizado hacia el cierre de la cuenca. Sin embargo el aumento de la rugosidad aleatoria reduce la descarga punta, desde los 206.3 l/s anteriores hasta 185.7 l/s, y la pérdida media de suelo, desde 0.47 t/ha hasta 0.43 t/ha.

Si a los parámetros anteriores se le añade un incremento de la conductividad hidráulica a saturación en la parcela 5 (de 5 mm/h a 12 mm/h), como en el **escenario 6** (tabla 3), nuevamente se obtiene una reducción significativa (tabla 4) de la descarga total (170.7 m<sup>3</sup> frente a 385.7 m<sup>3</sup> del escenario 5), la descarga punta (87.5 m<sup>3</sup> frente a 185.7 del anterior) y las pérdidas de suelo (0.09 t/h frente a 0.43 t/h). Este resultado pone de manifiesto la importancia del aumento de la conductividad saturada como factor reductor de la formación del excedente de agua y las pér-

didias del suelo, aún cuando, la modificación de la conductividad afecte a una sola parcela de la cuenca.

Por último, en el **escenario 7**, se considera superpuesto a las anteriores medidas el efecto del sistema de rodadas acumulando y transfiriendo el excedente de agua. En este caso, se obtiene por simulación un incremento en la descarga total con respecto a la situación anterior, pasando de 170.7 m<sup>3</sup> a 178.5 m<sup>3</sup>, al tiempo que disminuye tanto la descarga punta como las pérdidas medias de suelo (tabla 4).

En la tabla 4 también se presentan los resultados de los 8 escenarios simulados para un periodo de retorno de 2 años, es decir, para precipitaciones de baja intensidad. En términos generales los resultados son paralelos a los discutidos anteriormente para precipitaciones de elevada intensidad. La descarga total es relativamente elevada cuando el laboreo se efectúa en la dirección de la máxima longitud de la parcela o siguiendo la máxima pendiente. Por el contrario, la descarga total, la descarga punta y las pérdidas medias de suelo disminuyen notablemente si se considera que el laboreo se efectúa en dirección transversal a la pendiente. Entre las tres medidas adicionales de conservación consideradas, el efecto del aumento de la conductividad hidráulica de 5 mm/h a 12 mm/h es más importante que el efecto de las bandas verdes o el incremento de la rugosidad aleatoria.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que a escala de cuenca y para un periodo de retorno de 2 años la descarga total únicamente tiene relevancia si se efectúan las labores agrícolas contraviniendo totalmente los criterios de conserva-

ción. Incluso, en el caso de que el sistema de laboreo fuese inapropiado no cabe esperar que las pérdidas de suelo superasen cifras del orden de 1 t/ha. El laboreo siguiendo las normas de conservación del suelo en dirección transversal a la pendiente parece suficiente para que la formación del excedente de agua sea mínima y las pérdidas de suelo prácticamente inapreciables.

Por tanto, de acuerdo con los resultados de la simulación el riesgo de formación de escorrentía a escala de cuenca debe estar asociado fundamentalmente a precipitaciones intensas. Dicho riesgo tenderá a incrementarse cuando como consecuencia del encostrado disminuya la capacidad de infiltración del suelo. Otros factores como la rugosidad de la superficie del suelo y el efecto de los sistemas de rodadas que también dependen del manejo, así como, la implantación de bandas verdes también influyen en la magnitud de la escorrentía producida a escala de pequeña cuenca agrícola.

En cuanto a las pérdidas de suelo, los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud que los medidos por otros autores (VALCÁRCEL ARMESTO, 1999) CACHEIRO *et al.*, 2001a) en pequeñas cuencas y laderas entre 1997 y 1999, los cuales obtuvieron valores de erosión concentrada comprendidos entre 1.42 y 23.8 t/ha en suelos desarrollados sobre esquistos de Ordenes. Tras un periodo extraordinariamente húmedo en el otoño-invierno 2000-2001 se observó la formación de cárcavas efímeras en una ladera a barbecho con intensidades de erosión concentrada muy superiores a la media de los tres años anteriores, que alcanzaron la cifra de 44.71

m<sup>3</sup>/ha (TABOADA CASTRO *et al.*, 2001). A escala de pequeña cuenca agrícola estos valores de pérdida de suelo tan elevados para condiciones climáticas templado-húmedas sólo se explican admitiendo caudales punta del orden de varios metros cúbicos por segundo. La génesis de caudales de esta magnitud con intensidades de precipitación muy elevadas suponen que el encostrado del suelo es muy importante, de modo que los valores de conductividad serán muy bajos.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto la gran susceptibilidad de la respuesta del modelo LISEM a las medidas de manejo del suelo y a las características de los sistemas de laboreo, usando datos morfológicos de una cuenca agrícola situada en la zona del Complejo de Ordenes en línea con otros trabajos (THONON *et al.*, 2001; CACHEIRO *et al.*, 2001b). Las estimaciones permiten definir escenarios susceptibles de provocar la génesis de escorrentía para condiciones reales de uso del suelo y de sistemas de cultivo.

## CONCLUSIONES

Utilizando datos morfológicos de una cuenca agrícola situada en la zona del Complejo de Ordenes y supuestos referidos a la distribución de las parcelas y uso del suelo, así como, valores de parámetros de entrada realistas, en parte deducidos de los datos experimentales y en parte derivados de la bibliografía, se construyeron escenarios para evaluar la influencia del manejo del suelo y de medidas agronómicas de conservación sobre la formación de excedente de agua y las pérdidas de suelo

usando el modelo distributivo LISEM. De acuerdo con las estimaciones, el riesgo de formación de escorrentía está asociado fundamentalmente a eventos de precipitación intensos. Dicho riesgo tiende a incrementarse cuando como consecuencia del manejo disminuya la capacidad de infiltración del suelo. Otros factores, como la dirección del laboreo y los sistemas de rodadas influyen en mayor o menor medida en la

magnitud de la escorrentía producida a escala de pequeña cuenca agrícola.

### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido financiado por la Xunta de Galicia (Proyecto (PGIDT01AG10302PR)).

*Recibido: 25-II-02*

*Aceptado: 18-VI-02*

## BIBLIOGRAFÍA

- AUZET, A. V.; BOIFFIN, J. & LUDWIG, B. (1995). Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms*, **20**: 759-767.
- BLJENBERG, H.; DAFONTE, J.; DUVAL, Y.; GOVERS, G.; HENSHALL, K.; IVERSEN, B.; KAMPHORST, E.; KILPELAINEN, J.; LUDWIG, B.; PAZ GONZÁLEZ, A.; PITKANEN, J.; SIBBESSEN, E. & TAKKEN, I. (2000). *Effective Land Management for Surface Runoff Control*. Final report. Project FAIR CT95-0458. Jetten, V., Guérif, J., Douglas, J. (Eds.).
- BOIFFIN, J.; PAPY, F. & EIMBERCK, M. (1988). Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, **8** (8): 663-673.
- CACHEIRO, M.; TABOADA, M. T.; VALCÁRCEL, M.; TABOADA, M. M. & PAZ, A. (2001a). Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la erosión en una ladera mediante modelos numéricos del terreno. En: *Avances sobre la erosión hídrica II*. Paz González, A., Taboada Castro, M. T (Eds.). Colección Cursos, Congresos e Simposios. Universidad de A Coruña, **65**: 99-125.
- CACHEIRO, M.; PAZ, A.; LÓPEZ CANDÍA, A. & MIRÁS AVALOS, J. M. (2001b). Uso de un modelo distributivo para predecir la formación del excedente de agua y el riesgo de erosión bajo pradera. *Actas de la III Reunión Ibérica de Pastos y Forrajes*, pp.: 97-103.
- DAFONTE DAFONTE, J. (1999). *Procesos hidrológicos superficiales en cuencas agrícolas*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 190 pp.
- De ROO, A. P. J.; JETTEN, V. G.; WESSELING, C. G. & RITSEMA, C. J. (1995). *LISEM: Limburg soil erosion model-Manual*. Dpto. of Physical Geography. University of Utrecht (Holanda).
- De ROO, A. P. J.; WESSLING, C. G. & RITSEMA, C. J. (1996a). LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory input and output. *Hydrological Processes*, **10**: 1107-1117.
- De ROO, A. P. J.; OFFERMANS, R. J. E. & CREMERS, N. H. D. T. (1996b). LISEM: a single event physically base hydrological and soil erosion model for drainage basins. II. Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, **10**: 1119-1126.
- De ROO, A. P. J. & JETTEN, V. (1999). Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena*, **37** (3-4): 477-493.
- FLEIGE, H. & HORN, R. (2000). Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. In: *Subsoil compaction, distribution, processes and consequences*. Horn, R., van den Akker, J.J.H., Arvidsson, A. (Eds.). Advances in Geocology, **32**: 258-268.
- KARSSENBERG, D. (1996). *PCRaster version 2, manual*. Vakgroep Fysische Geografie, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, Universiteit Utrecht. The Netherlands. 368 pp
- LADO LIÑARES, M. (1999). *Cuantificación de la rugosidad orientada y aleatoria mediante índices y su relación con la degradación del microrrelieve del suelo y el almacenamiento temporal de agua*. Tesis Doctoral. Universidad de A Coruña. 258 pp.
- LUDWIG, B. (1992). *L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien: analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire*. Thèse Doctorat d'Université. Université Louis Pasteur. Strasbourg. 201 pp.
- MARTÍNEZ, J. R.; KLEIN, E.; DE PABLO, J. G. & GONZÁLEZ, F. (1984). El Complejo de Ordenes: Subdivisión, descripción y discusión sobre su origen. *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, **7**: 139-210.
- MIRÁS AVALOS, J. M. & LÓPEZ CANDIA, A. (2000). Análisis de sensibilidad de un modelo físico distribuido bajo las condiciones climáticas y geomorfológicas del Complejo de Ordenes (A Coruña). En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica II*. Paz González, A., Taboada Castro, M. T (Eds.). Colección Cursos, Congresos e Simposios. Universidad de A Coruña, **65**: 143-162.
- MORGAN, R. P. C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Mundi-Press. Madrid. 343 pp.
- PAZ GONZÁLEZ, A.; THONON, I.; BERTOLANI, F. C.; TABOADA, M. M.; VIDAL, E. & DAFONTE, J. (2001). Variabilidad espacial de la infiltración en una ladera determinada con permeámetro de Guelph e infiltrómetro de tensión. En: *Temas de Investigación en Zona no*

- Saturada*. López, J.J., Quemada, M. (Eds.). Universidad Pública de Navarra: 51-60.
- SOUCHERE, V.; KING, D.; DAROUSSIN, J.; PAPY, F. & CAPILLON, A. (1998). Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology*, **206**: 256-267.
- TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J. & DEGRAER, G. (1999). Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena*, **37** (3-4): 431-447.
- TAKKEN, I.; GOVERS, G.; JETTEN, V.; NACHTERGAELE, L.; STEEGEN, A. & POESEN, J. (2001). Effects of tillage on runoff and erosion patterns. *Soil and Tillage Research*, **61** (1-2): 55-60.
- TABOADA CASTRO, M. M. (2001). *Morfología de superficies cultivadas en relación con la infiltración, el excedente de agua y la erosión*. Tesis Doctoral. Universidad de A Coruña. 541 pp.
- TABOADA CASTRO, M<sup>a</sup>. M.; LADO LIÑARES, M.; DIÉGUEZ VILLAR, A. & PAZ GONZÁLEZ, A. (1999a). Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela. En: *Avances sobre le estudio de la erosión hídrica*. Paz González, A., Taboada Castro, M<sup>a</sup>. T (Eds.). Colección Cursos, Congresos e Simposios. Universidad de A Coruña, **52**: 101-127.
- TABOADA CASTRO, M<sup>a</sup>. M.; PAZ GONZÁLEZ, A. & VALCÁRCEL ARMESTO, M. (1999b). Condiciones de formación de la escorrentía en suelos de cultivo. En: *Avances sobre le estudio de la erosión hídrica*. Paz González, A., Taboada Castro, M<sup>a</sup>. T (Eds.). Colección Cursos, Congresos e Simposios. Universidad de A Coruña, **52**: 69-100.
- TABOADA CASTRO, M. M.; SANDE FOUZ, P.; INGARAMO, O. & PAZ GONZÁLEZ, A. (2001). Desarrollo y evolución de un sistema de cárcavas efímeras en una ladera durante un periodo extraordinariamente húmedo. *Resúmenes del III Congreso sobre Erosión Hídrica*. A Coruña. pp 67-69.
- THONON, I.; JETTEN, V. & PAZ GONZÁLEZ, A. (2001). Simulating the effect of Tillage factors on runoff generation in a small agricultural catchment in Northwest Spain. *International Symposium "The significance of soil surface characteristics in soil erosion"*. Strasbourg, p. 92.
- ULLÓA GUITIÁN, M. (1998). *Variabilidad de las propiedades generales del suelo en dos cuencas de pequeñas dimensiones*. Tesis de Licenciatura. Universidad de A Coruña. 106 pp.
- VALCÁRCEL ARMESTO, M. (1999). *Variabilidad espacial e temporal da erosión en solos de cultivo*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 266 pp.
- VALCÁRCEL ARMESTO, M.; PAZ GONZÁLEZ, A.; DAFONTE DAFONTE, J. & TABOADA CASTRO, M. T. (1999). Importancia de las prácticas agrícolas en el control de los procesos erosivos y evaluación mediante modelos de la incidencia de las mismas. En: *Avances sobre le estudio de la erosión hídrica*. Paz González, A., Taboada Castro, M<sup>a</sup>. T (Eds.). Colección Cursos, Congresos e Simposios. Universidad de A Coruña, **52**: 7-41.
- VALCÁRCEL ARMESTO, M.; TABOADA CASTRO, M. T.; PAZ GONZÁLEZ, A. & DAFONTE DAFONTE, J. (2002). Ephemeral erosion in Northwestern Spain. *Catena* (en prensa)
- Van DEURSEN, W. P. A., WESSELING, C. G. (1992). *The PCRaster package* Department of Physical Geography. University of Utrecht. 198 pp.
- Van DIJCK, S. J. E. (2000). *Effects of agricultural land use on surface runoff and erosion in a mediterranean area*. Netherlands Geographical Studies 265. Universiteit Utrecht. The Netherlands. 234 pp.