

IMPORTANCIA DE LAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS EN EL CONTROL DE LOS PROCESOS EROSIVOS Y EVALUACIÓN MEDIANTE MODELOS DE LA INCIDENCIA DE LAS MISMAS

*Valcárcel Armesto, Montserrat (1); Paz González, Antonio (2);
Dafonte Dafonte, Jorge (1) y Taboada Castro, M^a Teresa (2)*

*(1) EPS Lugo. Universidad de Santiago de Compostela.
Campus Universitario. 27002. Lugo.*

*(2) Facultad de Ciencias. Universidad de La Coruña.
La Zapateira. 15071. La Coruña.*

SUMMARY

Cropping practices importance in controlling erosion processes and assessment of its incidence by modelling

Agricultural runoff in the humid zone of the Iberian Peninsula, as in humid temperate north west Europe, causes problems such as soil erosion and water pollution with agro-chemicals. A case study is presented, the silty-loam and loam soils of the Ordenes basin, which are susceptible to erosion, because of high rainfall and soil surface sealing. Research to assess the possibility of moving crop rotations around a catchment and the feasibility of introducing new options into the farmer calendar to reduce surface runoff are currently under way. This study aimed at defining environmentally acceptable land management scenarios that minimize surface runoff. Because of the variability of environmental (soil and climate) conditions and agricultural management practices, models are also used to guide research on techniques for reducing runoff, while avoiding unfe-

asible solutions. A review of the performances of most current used runoff models was made, with special reference to agricultural practices.

Key words: runoff, erosion, farming system, soil crusting.

RESUMEN

En la zona húmeda de la península Ibérica, al igual que en los restantes países del noroeste de Europa la escorrentía formada en terrenos agrícolas origina pérdidas de suelo y contamina las aguas con productos agroquímicos. En este trabajo se presenta la problemática de los suelos franco-limosos y francos desarrollados sobre esquistos del Complejo de Ordenes, que son susceptibles a la erosión, debido a la acción sinérgica de la precipitación y el encostrado superficial. Por ello, se están llevando a cabo proyectos, cuyo objetivo es evaluar la posibilidad de situar las alternativas de la rotación ocupando diferentes zonas de una cuenca y/o la viabilidad de introducir nuevas opciones en el calendario agrícola para reducir la escorrentía superficial. La finalidad estriba en definir escenarios de uso del suelo aceptables desde el punto de vista medioambiental que minimicen la escorrentía. Dada la variabilidad de las condiciones del medio físico (suelo y clima) y de las prácticas agrícolas, el uso de modelos debe de contribuir a esclarecer las investigaciones acerca de las técnicas para reducir la escorrentía, evitando soluciones inviables. Se revisa el comportamiento de los modelos más frecuentemente utilizados para predecir la erosión, con especial énfasis en las prácticas agrícolas.

Palabras clave: escorrentía, erosión, sistema agrícola, encostrado del suelo.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se asiste a modificaciones continuas del sistema de explotación agrícola, de modo que muchas empresas, en particular las unifamiliares pueden sufrir modificaciones drásticas en cuanto a las características de las parcelas o al manejo de las mismas y otras simplemente son abandonadas y desaparecen. Estos cambios no sólo originan problemas medioambientales, como los relacionados con el incremento de la contaminación (CARBALLAS et al., 1988; ACEA et al., 1990, OENEMA and ROEST, 1998; DIEGUEZ VILLAR, 1998) o la erosión (BOIFFIN and BRESSON, 1987; LUDWIG, 1992; GOVERS et al., 1996; VANSTEELANT et al., 1997; MARTIN et al., 1998; etc), sino que también pueden incidir sobre las características del paisaje (DEFFONTAINES, 1996).

Para poder predecir los posibles riesgos asociados a las modificaciones en el uso del territorio agrícola y para llevar a cabo su ordenación atendiendo a criterios de optimización, es necesario comprender la organización del mismo y su dinámica.

Por otra parte, cada vez son más acentuadas las exigencias encaminadas a que la agricultura tenga en cuenta un código de buenas prácticas, compatibles con la conservación del medio ambiente. Dado que la escorrentía es una fuente importante de contaminación difusa, en los últimos años se ha asistido a un incremento notable de estudios encaminados a determinar como reducir el riesgo de la misma. En los países industrializados estos estudios están motivados no tanto por la importancia de las pérdidas de suelo, sino sobre todo por la protección de los recursos hídricos, la polución por nitratos, etc. (GOVERS, 1991; LUDWIG, 1992; VANSTEELANT et al., 1997; MARTIN et al., 1998; etc). Estos autores ponen el énfasis en que el interés actual de los estudios de erosión y escorrentía se centra no sólo en la pérdida de suelo y la consecuente reducción de fertilidad, sino también en los daños que los fenómenos erosivos causan fuera de la cuenca agrícola.

En diversos países atlánticos y bálticos de Europa, los medios físicos en donde se ha detectado una mayor sensibilidad a la exportación de sedimentos y contaminantes (fertilizantes, pesticidas, etc.) tienen como factor común la presencia de suelos de texturas medias (francas y franco-limosas), con contenidos en arcilla generalmente inferiores al 20% (KWAAD, 1991; AUZET, et al., 1993; VANDAELE and POESSEN, 1995; OYGARDEN, 1996; SOUCHERE et al., 1998). En ellos a partir de un lecho de siembra fragmentado y muy poroso se produce una degradación en superficie bajo la acción de las lluvias, que, en los casos más extremos, se ha observado incluso cuando las precipitaciones no son muy intensas. En síntesis, la erosión del suelo y la escorrentía de super-

ficie asociadas a actividades agrícolas son problemas medioambientales de importancia que producen directa o indirectamente pérdidas de suelo y que se ven agravados en determinadas áreas por las características de su suelo y geología.

En la práctica resulta muy difícil incluir en los estudios experimentales sobre erosión la amplia variabilidad de características de geomorfología, suelos, intensidades de precipitación, tipos de cultivo y condiciones de manejo que existen. Por lo que, para el análisis, comprensión y evaluación de la erosión y los efectos ecológicos asociados a actividades agrícolas, la utilización de modelos puede ser una herramienta útil que complemente la experimentación "in situ" mediante costosas instalaciones para medida del caudal y carga sólida.

La simulación de un determinado proceso puede efectuarse con diversos propósitos. Así, los modelos desarrollados para predecir las pérdidas de suelo y sedimentos por erosión pueden ser útiles en estudios como evaluación de tierras, ordenación del territorio, calidad de aguas, desertización, etc. Sin embargo, con frecuencia, distintos objetivos requieren la construcción o el uso de diferentes modelos para simular el mismo proceso.

Los modelos de predicción de escorrentía y erosión actuales están basados en la formulación cuantitativa de las leyes que rigen dichos procesos y la hidrología de la zona no saturada. Dichos modelos usan relaciones matemáticas basadas en leyes físicas, por lo que se habla de modelos físicos, también conocidos como deterministas.

Por lo tanto, un modelo físico determinista es aquel que se sustenta sobre leyes bien conocidas. En los últimos años se ha empleado mucho tiempo, energía y recursos en el desarrollo de modelos de erosión de base física. Los modelos de predicción de escorrentía y erosión con base física usan expresiones matemáticas para simular dichos procesos y describen los mismos mediante analogías con los sistemas naturales.

La utilización de modelos hace posible que sea ya una realidad la posibilidad de llevar a cabo, en las zonas sensibles a la escorrentía y la erosión, la gestión del territorio en base a criterios medioambientales a escala de pequeña cuenca agrícola. Para ello es necesario, sin embargo, disponer de datos experimentales acerca de la variabilidad temporal y la distribución en el espacio de los factores del medio físico y del sistema de explotación agrario que condicionan la degradación del suelo y la producción de escorrentía.

Este trabajo tiene dos objetivos diferentes: en primer lugar, se presenta la problemática de la erosión en una importante comarca agrícola de Galicia, en la que predominan suelos de cultivo de texturas medias conocidos por su sensibilidad a la degradación

física y a la erosión (GONZÁLEZ GARCÍA, 1998; TABOADA CASTRO, 1998) y, en segundo lugar, se comparan entre sí diferentes tipos de modelos de erosión, con particular referencia a la escala de trabajo, datos de entrada necesarios y posibilidad de representar la distribución espacial de la escorrentía y las pérdidas de suelo.

ESCALAS DE ESTUDIO DE LA FORMACIÓN DE ESCORRENTÍA

Los procesos que determinan la escorrentía deben ser estudiados principalmente a dos escalas: parcela y cuenca agrícola (PAZ GONZÁLEZ et al., 1996).

A escala de parcela, la escorrentía viene controlada principalmente por tres propiedades de la superficie del suelo: la velocidad de infiltración, la capacidad de almacenamiento temporal y la resistencia del suelo al flujo, laminar o concentrado. Las tasas de infiltración bajas están asociadas al deterioro de la estructura del suelo después del laboreo o a la compactación del suelo por la maquinaria agrícola. Sin embargo, la formación de costras superficiales determina una disminución de la rugosidad superficial y causa una merma en la capacidad de regulación hídrica del suelo.

A escala de cuenca es de importancia el papel que juega la organización espacial de los usos del suelo, ya que la escorrentía que se origina en una parcela puede adicionarse a la de las parcelas vecinas, o, por el contrario, puede ser amortiguada, según sean las características de la superficie del suelo de estas segundas. También está probado de forma experimental el papel de la formación de surcos siguiendo las rodadas de la maquinaria agrícola y en relación con diversas prácticas agrícolas (AUZET et al., 1993).

Por los motivos expuestos, la evaluación de la erosión también debe de ser efectuada a estas dos escalas, parcela y cuenca.

En parcelas individuales la erosión puede causar los siguientes efectos: degradación de la fertilidad física y arrastre de elementos nutritivos, pérdidas de suelo asociadas bien al flujo laminar entre regueros o bien concentrado en regueros y, como consecuencia, pérdidas de fertilizantes y pesticidas. Conviene distinguir entre erosión concentrada, cuyo efecto directo es la pérdida de suelo y la formación de surcos y erosión difusa, que puede afectar a un área mucho más extensa, ocasionando, en general pérdidas de suelo menos importantes pero provocando un lavado de nutrientes y pesticidas proporcionalmente más alto.

En una cuenca agrícola, los materiales y productos químicos que van incorporados al agua de escorrentía son transportados fuera de la misma, lo que aumenta el riesgo de contaminación del agua superficial. El transporte de materiales sólidos fuera de la cuenca puede provocar, además un bloqueo de los sistemas naturales de drenaje por acumulación de sedimentos arrastrados por esas aguas.

CARACTERIZACIÓN DE UNA COMARCA SENSIBLE A LA EROSIÓN

Los suelos desarrollados sobre los materiales que forman la serie del Complejo de Ordenes son de textura media, generalmente franca o franco-limosa y su contenido en arcilla en general no supera el 20%. Cuando se dedican a la agricultura, con frecuencia se aprecia la degradación de la superficie bajo el impacto de la lluvia. Considerando una superficie inicial como es el lecho de siembra permeable y poroso, pronto se aprecia una evolución de la misma incluso bajo el efecto de precipitaciones poco intensas, antes de que la cubierta vegetal tenga tiempo de alcanzar un estado de desarrollo suficiente como para proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia (TABOADA CASTRO, 1998). A partir de cifras del orden de 100 a 150 mm de lluvia acumulativa desde el estado inicial se desarrolla una costra de facies sedimentaria con una capacidad de infiltración muy reducida en relación con la inicial.

En la mayor parte de la zona considerada las pendientes son suaves, oscilando entre el 5% y el 10%. La red hidrográfica está bien desarrollada, pero son frecuentes los talweg con caudal intermitente, alimentado por escorrentía superficial.

El clima es de tipo atlántico. En la Figura 1 se aprecia que las precipitaciones medias mensuales superan los 150 mm entre octubre y marzo. No obstante, los meses de abril y mayo son también lluviosos uno de cada dos años.

En cuanto al tipo de explotación agrícola, hay que destacar la coexistencia del sistema de minifundio tradicional en algunas localidades con zonas de concentración parcelaria en otras. El sistema de producción más frecuente es el de policultivo (pradera, maíz, patata), asociado a la cría de ganado. Las sucesiones de cultivos determinan secuencias de operaciones de laboreo. Las labores agrícolas fragmentan la superficie del suelo y le confieren una gran capacidad de infiltración. Sin embargo, a partir de este estado inicial, como ya se describió, el suelo puede adquirir la capacidad de generar escorrentía bajo la acción de la lluvia.

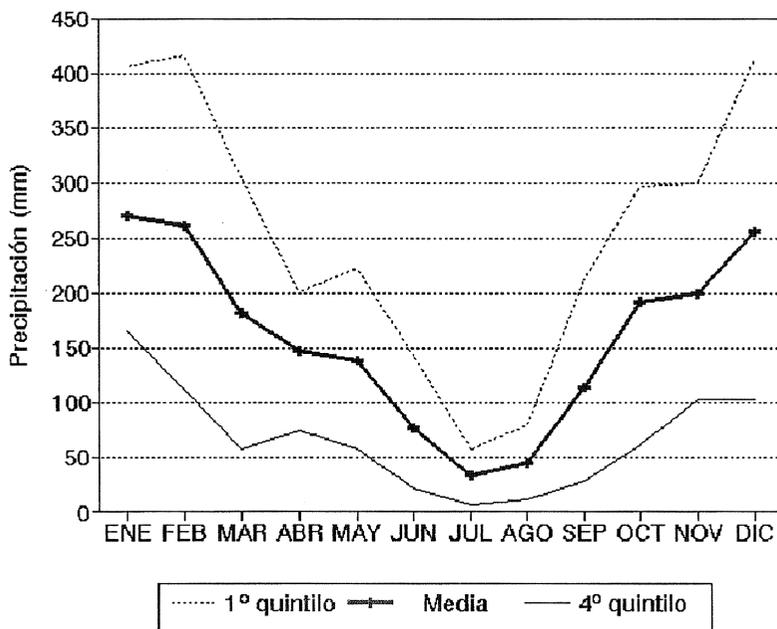


Figura 1

Precipitación en el área del Complejo de Órdenes. Estación de Lavacolla, Santiago de Compostela

A lo largo del año la superficie del suelo se encuentra pocas veces a barbecho en el sistema tradicional de explotación. Las principales rotaciones consisten muchas veces en maíz como cultivo inicial, seguido de cereal de invierno o nabos y otras veces, según los microclimas se observa maíz/patatas como cultivo inicial, seguido de una gramínea forrajera.

Sin embargo en los últimos años hay que destacar dos hechos importantes para la ordenación del territorio: por un lado, el creciente abandono de algunas parcelas o explotaciones, por otro, el abandono de la alternativa de invierno en la rotación, con lo que muchas de las parcelas sembradas con maíz quedan a barbecho hasta el año siguiente.

Como consecuencia, existe una variación cíclica del riesgo de escorrentía relacionado tanto con las condiciones climáticas como con el tipo y la secuencia de labores

agrícolas. Si se considera una escala de tiempo anual, se aprecia que el máximo de superficies labradas ocurre en la primavera, época en la que se siembran primero los cultivos de patatas (Marzo y Abril) y posteriormente maíz (finales de Abril y Mayo); el máximo riesgo de erosión durante el verano está asociado a la posibilidad de tormentas y su incidencia será importante cuando la superficie del suelo esté desprovista de vegetación, como ocurre después de la recolección de la patata; por último en el otoño las superficies que se han labrado para proceder a la resiembra de pradera son las más sensibles a la erosión, que puede ser importante, dada la cuantía de las precipitaciones en el período otoño-invierno. De este modo se pone de manifiesto que la erosión a partir de terrenos agrícolas resulta de la conjunción de un clima caracterizado por una alta pluviosidad y la presencia de suelos cuya superficie presenta aptitud para encostrarse y, en consecuencia, originar escorrentía. En las figuras 2 y 3 se pueden apreciar algunos de los efectos de la erosión en superficies labradas.



Figura 2

Erosión concentrada durante la implantación de una pradera en el otoño del año 1997



Figura 3

Detalle de los efectos de la erosión concentrada durante la germinación de un cultivo de maíz en el año 1997

En función del estado de la superficie del suelo, la intensidad de la precipitación y la morfología del terreno, se pueden poner de manifiesto diversos sistemas erosivos. Un suelo mullido sometido a una lluvia intensa tiende a originar erosión de tipo difuso. Un suelo compacto y con insuficiente capacidad de infiltración origina un excedente de agua que tiende a producir erosión concentrada. La morfología de los sistemas de erosión concentrada, a su vez, puede variar en función de las características del sistema de laboreo y la topografía; así, en pendientes mayores del 5% se observan con frecuencia surcos paralelos (figura 2) que tienden a seguir las rodadas del tractor, mientras que en los talwegs de fondo de valle con flujo intermitente pueden llegar a formarse cárcavas.

En todo caso, los procesos de erosión en canal desplazan cantidades de suelo y producen volúmenes de sedimentos mucho más importantes que la erosión laminar. La unidad funcional de este sistema erosivo es la cuenca elemental de primer orden, en la que se distinguen dos zonas fundamentales: las superficies susceptibles de emitir escorrentía

y la red de drenaje hacia los cursos permanentes de agua, que se forma y/o activa durante los períodos de precipitación más intensos y a lo largo de la cual se pueden originar surcos o cárcavas cuando la velocidad del agua supera el límite a partir del cual ocurre incisión en la superficie del terreno. Con frecuencia las medidas preventivas de la erosión, (como por ejemplo bandas verdes, cubetas receptoras de sedimentos, etc), se localizan en el talweg. Sin embargo, si se quiere llevar a cabo un manejo de dicho problema de acuerdo con criterios racionales, es necesario reducir el excedente de agua en el conjunto de la cuenca, teniendo en cuenta que la energía cinética es tanto mayor cuanto más lejos del cierre de la cuenca ocurre la formación de escorrentía.

En general, en la zona del Complejo de Órdenes la incidencia de los procesos erosivos sobre la actividad agrícola está limitada en el espacio y en el tiempo. Localmente, la erosión puede interferir con el desarrollo de las plántulas jóvenes (Figura 3) o bien la acumulación de sedimentos puede llegar a enterrar a algunas de ellas. Las cárcavas de mayores dimensiones que se forman a favor del talweg no llegan a provocar problemas para el laboreo agrícola o, en el peor de los casos, solamente interfieren temporalmente con el tráfico de maquinaria agrícola.

Dado que no existen en la actualidad disposiciones legales encaminadas a reducir la erosión y la escorrentía, el margen de maniobra de las medidas de conservación del suelo ha de tener en cuenta las prácticas agrícolas actuales. Para modelizar el efecto conjunto del suelo, el clima y los sistemas agrarios sobre la producción de escorrentía es necesario, en definitiva, tener en cuenta ciertas hipótesis acerca de la ocupación del territorio y analizar las posibilidades de reducción del excedente de agua a escala de parcela y cuenca agrícola.

Las prácticas agrícolas pueden reducir la escorrentía de tres modos diferentes: en primer lugar por fragmentación de un suelo compacto o encostrado, en segundo lugar incrementando la rugosidad del microrrelieve de la superficie (lo que a su vez puede incrementar de modo eficaz la retención de agua en microdepresiones y reducir el riesgo de formación de excedente de agua) y en tercer lugar por siembra directa de un cultivo intermedio entre los dos cultivos principales de una rotación, de modo que se proteja la superficie del suelo frente a la degradación del agua de lluvia. Las posibilidades de intervención dependen en gran medida de la época del año y de si el suelo se encuentra a barbecho u ocupado por un cultivo.

La parcela es la unidad elemental en la que se llevan a cabo las posibles prácticas de prevención de la erosión. Sin embargo, para caracterizar la escorrentía en relación con la cuenca elemental es necesario considerar la posición espacial de la misma. Dado que la acción de las prácticas agrícolas sobre la escorrentía es función de su posición en el espacio y el tiempo, es necesario utilizar modelos que den cuenta de la gran variabilidad de las condiciones edáficas, climáticas y agronómicas a escala de cuenca elemental.

MODELOS DISTRIBUIDOS PARA EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN

El desarrollo y la evolución de los modelos de erosión ha estado influenciada por el desarrollo de los ordenadores, ya que la modelización requiere gran cantidad de información como por ejemplo topografía, tipos y usos de suelo, características de los canales de flujo concentrado, etc. La informática ayuda a manejar un gran volumen de datos de entrada.

Los modelos físicos se pueden definir como la representación matemática de un sistema o de un proceso real por medio de variables con el objetivo de representar las entradas, las salidas y los estados internos del sistema y del proceso por medio de un conjunto de ecuaciones que describen las interacciones entre estas variables. Estos modelos analizan los procesos que regulan la generación de sedimentos y caudales atendiendo a leyes físicas que gobiernan el transporte; en general se basan en el principio de conservación de masa y energía, empleando la ecuación de continuidad para el flujo de agua y sedimentos. Los modelos físicos más recientes suelen requerir un gran número de variables y datos de entrada, cuya adquisición requiere, a veces, de métodos de medida sofisticados (GONZÁLEZ GARCÍA, 1998; DAFONTE, 1999).

Para comprender el mecanismo de funcionamiento de estos modelos, con frecuencia se recurre a la clasificación de los mismos, atendiendo a criterios que describen aspectos importantes como caracterización de variables en el espacio, paso de tiempo para efectuar los cálculos, escala de trabajo, etc. De acuerdo con IBAÑEZ et al. (1995) y DAFONTE (1999) se pueden considerar los siguientes criterios y tipos de modelos:

Atendiendo a la base del modelo

- a) *Empíricos*, también llamados modelos de función respuesta, como son las ecuaciones de regresión lineal.

- b) *De base física*, compuestos de ecuaciones complejas, derivadas de leyes físicas. Sin embargo, para describir sistemas complejos, tridimensionales y heterogéneos en el espacio y el tiempo, como por ejemplo una ladera o una cuenca natural, los modelos más frecuentemente utilizados llevan a cabo importantes simplificaciones de la realidad.

Con relación a su aleatoriedad

- a) *Deterministas*, cuando un dato de entrada dado produce siempre un mismo resultado, de modo que no se considera la existencia de aleatoriedad.
- b) *Estocásticos*, cuando los resultados son, al menos, parcialmente aleatorios.

Considerando la distribución de variables en el espacio

- a) *Agregados*, si las variables que definen el sistema estudiado son promediadas en el espacio o bien los cálculos se efectúan para un punto único, sin dimensiones en el espacio.
- b) *Distribuidos*, si se conoce la distribución espacial y temporal de las variables de entrada y las variables de salida se calculan en función del espacio y el tiempo. Para el desarrollo de este tipo de modelos han tenido gran influencia los avances en el uso de los sistemas de información geográfica, la geoestadística y otras herramientas informáticas, que al utilizar variables y parámetros distribuidos en el espacio, permiten trabajar con un gran volumen de datos de entrada.

En relación a su duración en el tiempo

- a) *Continuos*, en cuyo caso el modelo simula para períodos largos de tiempo, meses o años, la variable o variables estudiadas. Se admite que en este caso tiene menos importancia la precisión de las condiciones iniciales.
- b) *Eventos*, que simulan variables como la escorrentía o la erosión en un intervalo más breve de tiempo, es decir durante e inmediatamente después de un episodio individual de precipitación. En este caso es necesario conocer con precisión las condiciones iniciales. La modelización de la influencia de los sistemas agrícolas y el manejo del suelo en la producción de sedimentos requiere el análisis de la distribución de variables en el espacio.

Para el estudio de la escorrentía y la erosión es importante la diferencia entre los tipos de modelos agregados y distribuidos (IBAÑEZ et al., 1995). Los primeros no con-

sideran ni la distribución espacial de las variables de entrada, ni tampoco la variación en el espacio de los parámetros y variables de las ecuaciones que sirven para modelizar los procesos físicos implicados. En cambio, los segundos incorporan datos concernientes a la distribución espacial de variables y parámetros, así como algoritmos que permiten evaluar la influencia que tienen las características espaciales sobre el comportamiento de los procesos simulados. Para la modelización espacial los modelos distribuidos son más idóneos; sin embargo, en la práctica, hay ocasiones en las que se obtienen buenos resultados con la aplicación de modelos globales agregados.

Para modelizar algunos procesos deben considerarse ciertas características específicas de los mismos. Por ejemplo, en el caso de la contaminación de suelos y aguas es imperativo distinguir entre procesos espacialmente puntuales en origen y procesos espacialmente difusos (IBAÑEZ et al., 1995). Los primeros son aquellos cuyas fuentes de contaminación se encuentran geográficamente situadas en localizaciones precisas (p.e. vertederos, extracciones mineras, etc.). En los segundos, el origen de la contaminación afecta a extensiones más amplias.

Desde un punto de vista temporal hay que destacar la distinción entre modelos de eventos y modelos continuos. Los primeros, tratan de simular la respuesta de un sistema natural tras un suceso o evento de precipitación determinado, lo que permite caracterizar la respuesta hidrológica de un segmento de paisaje tras una precipitación de intensidad y duración determinadas (minutos, horas, días). Por el contrario, los modelos continuos pretenden representar la evolución del sistema, sin interrupción, durante períodos más prolongados y sin tener en cuenta las características para cada tormenta.

Las dimensiones del paisaje a analizar pueden ser variables, de modo que consisten en elementos como en una simple parcela, una ladera, una cuenca de drenaje, un territorio de grandes dimensiones (regiones, países, continentes, etc.). La mayor parte de los modelos de erosión son operativos a las escalas de parcela y/o ladera o cuenca agrícola.

Los modelos físicos que se comparan en el presente trabajo son: CREAMS, WEPP, ANSWERS, EUROSEM y LISEM, y sus características principales se reseñan brevemente en los siguientes apartados. Más adelante se describen con mayor detalle las posibilidades de estos modelos.

El modelo CREAMS - Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems desarrollado por el Departamento de Agricultura de EE.UU. (KNISEL, 1980) es uno de los primeros que presenta base determinista.

El modelo WEPP - Water Erosion Prediction Project (FOSTER and LANE, 1987) es el resultado de la unión de esfuerzos de varios centros de investigación dependientes de U.S.D.A. y diversas Universidades de los EE.UU. Este modelo puede ser usado tanto en modo continuo como para un evento simple y para dos escalas: cuenca y ladera.

El modelo ANSWERS - Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation (BEASLEY *et al.*, 1980), que opera para eventos, es un ejemplo de un modelo distribuido ensamblado a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

EUROSEM- European Soil Erosion Model (MORGAN *et al.*, 1992) es un modelo basado en procesos que simula eventos simples y permite predecir la erosión del suelo por el agua a escala de parcela o de cuenca, así como evaluar la eficacia de las medidas de protección del suelo. Lo desarrolló un equipo de científicos de diez países europeos.

Y LISEM, Limburg Soil Erosion Model (De ROO *et al.*, 1994; 1996), es un modelo que está completamente integrado en un raster tipo SIG; permite simular los fenómenos hidrológicos y el transporte de sedimentos durante e inmediatamente después de un evento de precipitación simple en una cuenca. Dicho modelo simula tanto escenarios en que se considera el uso actual del suelo como aquellos en que se introducen medidas de conservación.

Estos modelos simulan, en general, una serie de procesos comunes:

- A) Hidrológicos: precipitación, interceptación, infiltración, almacenamiento superficial y flujo laminar o concentrado.
- B) Erosivos: disgregación por la energía cinética de la gota de lluvia, erosión por flujo superficial (entre surcos/flujo laminar); erosión concentrada (iniciación de surcos y extensión de los mismos), transporte y redistribución de sedimentos

A pesar de que todos los modelos tienen objetivos similares, presentan también algunas significativas diferencias. Estas diferencias se discuten a continuación atendiendo sobre todo a los procesos hidrológicos y erosivos que están directamente relacionados con la agricultura.

INCIDENCIA DE LAS ACTIVIDADES AGRÍCOLAS EN LA EROSIÓN

La mayor parte de los autores resaltan que la acción del agua de escorrentía viene determinada no sólo por factores topográficos y climáticos, sino que intervienen de forma importante las prácticas agrícolas.

Las actividades agrícolas, junto con el suelo y el clima, inducen una gran variabilidad espacial y temporal de las propiedades del suelo y de la dirección de drenaje superficial (LUDWIG, 1992; De ROO et al., 1995). La infiltrabilidad del suelo y la rugosidad de la superficie sufren rápidos cambios causados por las operaciones de cultivo, seguidas por una degradación lenta de la estructura del suelo causada por la precipitación. Aparte de esto, la cobertura del suelo por las plantas o residuos, la estabilidad de los agregados y la cohesión del suelo, son factores que también vienen determinados por la interacción del clima con las actividades agrícolas.

Los procesos hidrológicos que más se ven influenciados por las actividades y el manejo agrícola son: interceptación, infiltración, almacenamiento temporal en las micro-depresiones del terreno, flujo laminar, flujo concentrado y disgregación, tanto por acción de las gotas de lluvia, como por flujo concentrado.

Las características temporales y espaciales de los procesos hidrológicos y erosivos están fuertemente correlacionados con la dinámica de las actividades agrícolas. Entre estas actividades, destaca la importancia que tiene el cultivo que se establece; las modalidades de siembra, el manejo que se practique con él y sus residuos; la dirección de las hileras de cultivo y las rodadas en relación con la topografía del terreno, la frecuencia e intensidad del tráfico de maquinaria agrícola y, finalmente, aspectos como la distribución espacial de las parcelas.

Atendiendo al tipo de cultivo el aspecto de mayor incidencia en los procesos erosivos es el tipo de rotación, puesto que es el condicionante principal para conocer cuando comienza y que tiempo duran los períodos en que el suelo está desnudo o cubierto y que secuencia de cultivos está ocupando la parcela.

También es necesario considerar el manejo de la cosecha, ya que condiciona directamente:

1. El número y secuencia de operaciones agrícolas que se realizan, es decir el momento de cada operación con relación a la estación (arado antes/después del invierno, etc.), el tipo de operación (preparación del suelo, sembrado, etc.) y las características de la operación (herramientas, profundidad de la operación, compactación, etc).
2. La red de drenaje hacia los cauces naturales, que viene definida por la presencia de motivos en la superficie del terreno como los definidos por el trazado de roda-

das, los surcos muertos en los límites de la parcela y diversos motivos en la cabecera. La formación de una red de drenaje efímera también viene condicionada por la posición relativa de las parcelas vecinas y su relación con el relieve general y los cauces de drenaje permanentes.

Los modelos que se comparan en este trabajo (CREAMS, WEPP, ANSWERS, EUROSEM y LISEM) tienen en cuenta la interacción del suelo con el clima y el tipo de las operaciones de cultivo que se realizan en mayor o menor grado. La incidencia de las prácticas agrícolas es uno de los aspectos principales que se tratarán de analizar en el presente artículo.

DESCRIPCIÓN DE MODELOS

CREAMS

Este modelo se desarrolló para dar cuenta de fenómenos de escorrentía, percolación, erosión y pérdida de nutrientes y pesticidas. Una de las características más importantes de CREAMS es que se trata de un modelo que describe la parcela y sus parámetros mediante varios segmentos de pendiente que dan cuenta del flujo superficial medio y otros segmentos de pendiente que permiten modelizar el canal. Consta de tres componentes: un submodelo hidrológico, un submodelo de erosión, y un submodelo químico.

El submodelo hidrológico tiene dos opciones. En la primera, la escorrentía se calcula a partir de datos de precipitación diaria usando el método del Número de Curva, SCS. El perfil del suelo está dividido en varios horizontes y los parámetros para operar con el método del SCS se aplican en cada uno. La segunda opción usa el modelo de infiltración de Green-Ampt de dos estados para determinar el volumen de escorrentía. El período de escorrentía punta se estima usando las ecuaciones de flujo cinemático. También se modelizan otros procesos como la percolación desde la zona radicular, la evaporación del suelo y la transpiración de la planta.

El submodelo de erosión emplea ecuaciones independientes para describir la disgregación del suelo por la precipitación (erosión entresurcos) y disgregación del suelo por flujo (erosión de surcos). Las dos ecuaciones de disgregación del suelo esencialmente representan una forma modificada de la Universal Soil Loss Equation (USLE). El componente de transporte de sedimentos del modelo usa la ecuación propuesta por Yalin. El modelo puede simular cambios en el período de transporte de sedimentos y la capa-

cidad del flujo para transportar sedimentos a través del módulo que describe el flujo superficial y del módulo que da cuenta del flujo a través del canal. Sí en algún punto la capacidad de transporte de sedimentos es superada por la carga de sedimentos transportados, tiene lugar la sedimentación.

En cuanto a las salidas, cabe mencionar un fichero que contiene el volumen de escorrentía, el período de escorrentía, y el factor EI generado por el submodelo hidrológico y otro fichero que contiene parámetros adicionales relativos a la erosión, tomado del submodelo correspondiente (RUDRA et al., 1989).

ANSWERS

Se trata de un ejemplo de modelo distribuido asociado a un sistema de información geográfica (SIG). El modelo paramétrico distribuido, desarrollado por BEASLEY and HUGGINS (1981) simula escorrentía y transporte de sedimentos a escala de cuenca. Está diseñado para evaluar el comportamiento hidrológico de cuencas en las que la agricultura constituye el uso primario del suelo, durante y inmediatamente después de un evento de precipitación.

La cuenca se representa mediante una serie de celdas cuadradas con un tamaño que oscila entre 1 y 4 ha. Los parámetros que representan las propiedades de los cultivos y los suelos son seleccionados para cada celda. Las ecuaciones que representan el flujo de agua y el transporte de sedimentos se resuelven para cada celda usando un método explícito. ANSWERS está bien adaptado para su aplicación a cuencas de más de 100 km², pero la versión para ordenadores personales puede manejar sólo 1700 celdas. En la práctica, entonces, el límite de la cuenca es de 17 km², sí se usan celdas de 1 ha.

Su aplicación primaria es la de evaluar y seleccionar entre diversas estrategias para controlar las dimensiones de superficies de escorrentía y áreas de transporte de sedimentos de zonas de laboreo intensivo. La versión original del modelo se integró completamente dentro de un SIG. Ello permite introducir fácilmente los datos de entrada y visualizar los resultados mediante mapas y tablas (De ROO et al., 1989).

ANSWERS simula el excedente de precipitación, el flujo superficial y a través de un canal, el drenaje subsuperficial, así como la disgregación y transporte de sedimentos. El excedente de precipitación es la diferencia entre la precipitación total y la suma de la interceptación, retención temporal por el microrrelieve y la infiltración. La infiltración se calcula usando una forma modificada de la ecuación de Holtan. Esta ecuación

ción está basada en el concepto de una sección de control del suelo localizada en la superficie del perfil (BEASLEY and HUGGINS, 1981). El agua infiltra hacia el interior y drena hacia fuera de esta zona. El grosor de esta capa se llama profundidad de la sección de control, DF.

El flujo superficial se desplaza de celda a celda usando la ecuación de continuidad junto con la ecuación de velocidad uniforme de Manning. La proporción de flujo que va de una celda dada al interior de cada una de las celdas adjuntas está calculada basándose en la dirección de pendiente desde la celda origen. El flujo concentrado también se calcula usando la ecuación de continuidad y la ecuación de velocidad uniforme de Manning. Se asume que todos los canales modelizados tienen una sección cruzada rectangular.

La disgregación de sedimentos por precipitación y el flujo superficial son calculados usando adaptaciones de las ecuaciones presentadas por Meyer y Wischmeier (en CHOW *et al.*, 1994).

El transporte potencial de sedimentos por flujo superficial, se calcula usando una ecuación basada en parte en el trabajo de Yalin (en CHOW *et al.*, 1994).

ANSWERS asume que los sedimentos ya depositados han de disgregarse de nuevo, cuando forman parte de una superficie distinta de la inicial y a partir de ésta pasan otra vez a formar parte del flujo superficial. Este modelo también supone que los canales por los que discurre el flujo concentrado no son erosionables (MONTAS and MADRAMOTTO, 1991).

Por lo que respecta a los datos de entrada, la descripción de la cuenca está basada en las características individuales de las celdas, de modo que el modelo se aplica para cada celda. Esta descripción incluye la localización de cada celda en un sistema x,y , así como el tipo de suelo, uso de la tierra, pendiente, aspecto, drenaje subsuperficial, y factores que definen el canal. Además se requiere describir los parámetros de infiltración para cada tipo de los parámetros de la superficie del suelo característicos de cada uno de los cultivos y sistemas de manejo. Las características de la precipitación es otra de las entradas.

La salida del modelo consiste en un hidrograma de escorrentía, una gráfica de concentración de sedimentos frente al tiempo en el cierre de la cuenca, y un mapa detallado de la erosión y la deposición en el interior de la cuenca.

WEPP

El objetivo del proyecto WEPP fue poner a punto la simulación de procesos mediante ordenador para desarrollar una tecnología de predicción de la erosión del suelo. WEPP está basado, entre otros fundamentos, en la generación estocástica de datos climáticos, la teoría de la infiltración, la hidrología, la física del suelo, la producción vegetal, la hidráulica, y los mecanismos de erosión estudiados por la conservación de suelos (FLANAGAN et al., 1995). Desde el punto de vista conceptual, el modelo consta de seis componentes: generación climática, hidrología y escorrentía hidráulica, crecimiento de las plantas y descomposición de residuos, suelos, erosión, y riego. El modelo puede ser usado tanto en modo de simulación continuo como para simular eventos y a dos escalas: cuenca y ladera.

A escala de cuenca WEPP es una herramienta de simulación continua que amplía la capacidad del modelo de ladera y suministra tecnología para predecir la erosión en pequeñas cuencas cultivadas y sin cultivar. Se puede aplicar a cuencas de dimensiones superiores a 40 ha, donde la producción de sedimentos que migran fuera de la cuenca está significativamente influenciada por procesos que afectan a laderas y canales. El modelo contiene elementos individuales como laderas, canales, y depósitos (no descritos aquí) como componentes primarios. Los componentes de ladera y canal pueden ser subdivididos en componentes hidrológicos y de erosión.

El modelo de erosión de laderas WEPP calcula primero las pérdidas de suelo a lo largo de una pendiente y los sedimentos producidos al final de la ladera. Los procesos de flujo superficial se pueden considerar conceptualmente como una suma de un importante flujo laminar que ocurre en áreas entre surcos y flujo concentrado en áreas de surcos. La erosión entre surcos es descrita como un proceso de disgregación del suelo por impacto de las gotas de lluvia, transporte por flujo laminar, y liberación de sedimentos a los surcos. La erosión concentrada en surcos se describe en función de la disgregación de sedimentos, la capacidad de transporte en dichos surcos y la carga de sedimentos que contiene el flujo. La descripción del flujo superficial incluye tanto una solución analítica de las ecuaciones de onda cinemática como ecuaciones de regresión derivadas de la aproximación cinemática para una gama amplia de pendientes, longitudes, coeficientes de rugosidad de superficie, clases de textura del suelo, y distribuciones de precipitación. Una vez determinados el período punta de escorrentía y la duración de la misma, se asumen las condiciones del estado estacionario para los cálculos de erosión. La duración de

la escorrentía se calcula, por tanto, admitiendo el principio de conservación de masa, a partir del volumen de escorrentía total.

El modelo cuenta con dos versiones. La versión 1 consiste en el modelo de ladera. La versión 2 ejecuta tanto el modelo de ladera como el de cuenca.

La información acerca de las características hidrológicas de una ladera requeridas para aplicar el modelo a escala de cuenca es almacenado en un fichero e incluye:

- 1) duración de la tormenta.
- 2) tiempo de concentración del flujo superficial.
- 3) un parámetro que expresa la proporción de precipitación total durante el tiempo de concentración del flujo superficial.
- 4) profundidad de la escorrentía.
- 5) volumen de escorrentía.
- 6) período de escorrentía punta.
- 7) disgregación total de sedimentos al final de la ladera.
- 9) concentración de sedimentos por clases de tamaño de partículas al final de la ladera.
- 10) fracción de cada uno de los tamaños de partícula en los sedimentos erosionados.

Sólo se transfiere la información hidrológica y relativa a la producción de sedimentos desde el último segmento de ladera al modelo de cuenca.

El programa WEPP, por ello, es una combinación de módulos basados en procesos (componentes) y relaciones empíricas con base física. A continuación se describen brevemente los términos generales de los componentes basados en procesos usados en la modelización a escala de cuenca y ladera en WEPP 95:

1. Simulación climática, usando el generador GLIGEN (NICKS *et al.*, 1995).
2. Procesos desarrollados en el suelo durante el invierno, incluidos hielo y deshielo.
3. Sistemas de riego por aspersión y en surcos (KOTTWITZ, 1995).
4. Balance de agua, basado en el modelo SWRRB (ARNOLD *et al.*, 1990) con algunas modificaciones para mejorar la simulación de la percolación y parámetros de evaporación del suelo (SAVABI and WILLIANS, 1995).
5. Crecimiento de las plantas, basado en el modelo EPIC (WILLIANS, 1995).

6. Descomposición de residuos, para estimar la descomposición de la masa radicular y residuos enterrados.

7. Parámetros del suelo, y sus efectos en la hidrología y erosión (ALBERTS et al., 1995). Los parámetros de predicción de disgregación del suelo que directamente influyen en los procesos de erosión incluyen: a) erodibilidad entre surcos; b) erodibilidad en surcos; y c) fuerza de hundimiento hidráulico crítica.

8. Hidrología de canal y balance de agua (ASCOUGH et al., 1995). Estos parámetros se obtienen mediante cálculos en los que intervienen numerosas variables como la infiltración, evapotranspiración, percolación del agua del suelo, interceptación de la lluvia por el cultivo, y almacenamiento en las microdepressiones de la superficie, de un modo similar a como lo hace el componente para la hidrología de una ladera en áreas con flujo superficial. El exceso de precipitación se calcula usando la ecuación de infiltración de Green-Ampt, de acuerdo con la versión de Mein-Larson, posteriormente modificada por Chow (en CHOW et al., 1994). El período de escorrentía punta en un canal de una subcuenca o en el cierre de la cuenca se calcula usando bien la ecuación Racional modificada o bien la ecuación propuesta en el modelo CREAMS (KNISEL et al., 1980).

9. La erosión debida al flujo en el canal (ASCOUGH et al., 1995) se calcula asumiendo que los sedimentos producidos en la cuenca son resultado de la disgregación, transporte y deposición de sedimentos en diversos segmentos: la superficie del suelo (tanto en surcos como entre surcos), los canales permanente y las áreas con cárcavas efímeras. La profundidad del flujo y la fuerza de incisión hidráulica a lo largo del canal se calculan mediante ecuaciones de regresión, basadas en una solución numérica de la ecuación de flujo variable en las condiciones del estado estacionario. El desplazamiento de sedimentos en los surcos, entre los surcos, en el área del canal está basado en un modelo de erosión para el estado estacionario que resuelve la ecuación de continuidad de sedimentos.

10. Depósitos, entre los que se incluyen formaciones como terrazas y pequeñas presas. Esta componente mejora tanto la simulación hidráulica como la estimación de la sedimentación.

EUROSEM

Este modelo se basa en eventos simples para predecir la erosión del suelo por el agua desde parcelas y pequeñas cuencas, y para evaluar las medidas de protección del suelo (MORGAN et al., 1993; QUINTON, 1994; MORGAN et al., 1999).

EUROSEM está diseñado para operar por sucesivos pasos de tiempo de un minuto a lo largo de tormentas individuales. Las entradas básicas son la longitud y la anchura de las parcelas individuales o segmentos de pendiente a los que el modelo se aplica y la profundidad de lluvia caída para períodos de tiempo sucesivos en la tormenta en los que la intensidad de lluvia caída es más o menos uniforme.

EUROSEM comienza evaluando la interceptación de la lluvia por la cobertura vegetal de la planta, y continúa calculando el volumen y la energía cinética de la precipitación que llega a la superficie del suelo como precipitación directa y drenaje foliar; el volumen del flujo a lo largo del tallo; el volumen de almacenamiento en las depresiones del suelo; la disgregación de las partículas del suelo por impacto de las gotas de lluvia; la disgregación y la deposición de las partículas del suelo por escorrentía y la capacidad de transporte de la escorrentía; y la deposición de sedimentos. Este modelo usa una ecuación de balance de masa para calcular el transporte de sedimentos, la erosión y deposición sobre la superficie de tierra.

Las ecuaciones que describen los procesos de erosión han sido tomadas de muchas fuentes y pueden ser consideradas como representativas del estado actual de la investigación en Europa. EUROSEM ha sido diseñado de tal modo que se puede llevar a cabo su ensamblaje a modelos hidrológicos que generan valores de escorrentía superficial. En la práctica ha sido acoplado al modelo KINEROS (WOOLHISER *et al.*, 1990) que es un modelo de base física orientado a eventos y distribuido, que utiliza la ecuación de la onda cinemática, resuelta mediante técnicas de diferencias finitas, para modelizar la escorrentía y el desplazamiento de sedimentos sobre la superficie del terreno.

EUROSEM requiere dos ficheros de entradas, uno para la precipitación durante una tormenta dada y el otro para describir las características de la cuenca (suelo, estado de la superficie y condiciones de vegetación).

La versión 3.0. de EUROSEM presenta tres ficheros de salida opcionales:

- Fichero de salida dinámico, que contiene la información de entrada para identificar el área de estudio, los nombres de los ficheros de entrada usados, los sedimentos totales producidos desde un segmento elemental, el área de cada segmento elemental, el volumen y la profundidad de escorrentía, la concentración de sedimentos y el volumen total de sedimentos removidos desde un segmento elemental para cada paso de tiempo de la simulación, el tiempo del período de flujo punta y una estimación del balance de agua durante una tormenta.

- Fichero de salida estático que proporciona información acerca del área de estudio y una lista de los datos de entrada usados en la simulación.
- Fichero de salida auxiliar que proporciona información de las profundidades de lluvia total, caída directa, drenaje foliar, flujo de tallo e interceptación, intensidad de precipitación, y energía cinética tanto del agua que cae directamente como del drenaje foliar, para cada par tiempo-profundidad de la tormenta; la cantidad de precipitación interceptada por la cubierta de la planta y la capacidad del almacenamiento de la interceptación).

LISEM

El modelo LISEM, the Limburg Soil Erosion Model, (De ROO et al., 1995, 1996a, 1996b) simula la hidrología y el transporte de sedimentos durante y inmediatamente después de un evento de precipitación simple en una cuenca de drenaje. El modelo simula ambos efectos del uso de la tierra actual y los efectos de introducir medidas de conservación del suelo. El modelo LISEM es uno de los primeros ejemplos de un modelo con base física que esta completamente integrado en SIG tipo raster. La incorporación significa que no es necesaria una conversión de los ficheros de entrada o de salida, de modo que el modelo viene expresado en los términos propios de los comandos SIG denominado PC-Raster (Van DEURSEN and WESSELING, 1992, KARSSENBERG, 1996).

El desarrollo y estructura del modelo LISEM esta basado en la experiencia previa con los modelos ANSWERS (BEASLEY et al., 1980) y SWATRE (BELMANS et al., 1983), pero las descripciones de los procesos erosivos se modificaron totalmente.

Los procesos incorporados en el modelo LISEM son precipitación, interceptación, almacenamiento temporal en microdepresiones de la superficie, infiltración, movimiento vertical del agua en el suelo, flujo superficial, flujo en el canal, 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.

Una vez que comienza la precipitación, una parte es interceptada por la cubierta vegetal, hasta el momento en que se alcanza la capacidad máxima de almacenamiento de dicha cubierta. A continuación el excedente de agua, calculado en relación con la capacidad de infiltración, empieza a acumularse en microdepresiones de la superficie. El

flujo superficial comienza cuando un volumen predefinido de depresiones se rellena de agua. Para el cálculo del flujo superficial se usan parámetros como el valor n de Manning y el gradiente de pendiente. Cuando cesa la precipitación, la infiltración puede continuar hasta que el agua almacenada por el microrrelieve es eliminada.

Tanto la disgregación del suelo como el transporte de materiales pueden ser causados por impacto de la gota de lluvia o por flujo superficial. La capacidad de transporte de sedimentos, es decir, sí una partícula de suelo se desplaza o no una vez disgregada, depende de la carga de sedimentos en el flujo. Cuando el agua y los sedimentos alcanzan un elemento que contiene un canal, continúa su transporte hacia el cierre de la cuenca, pero siempre que se exceda la capacidad de transporte los sedimentos podrán depositarse en el canal.

La intercepción por el cultivo y/o la vegetación natural se estima mediante ecuaciones desarrolladas por Von Hoyningen-Huene y Aston (en De ROO *et al.*, 1993).

Infiltración y transporte de agua a través del suelo son simuladas mediante la ecuación de Richard. En áreas sin datos suficientes relativos a la propiedades físicas del suelo, se pueden usar versiones del modelo diferentes con ecuaciones de infiltración empíricas basadas en las expresiones de Green y Ampt y Holtan (en CHOW *et al.*, 1994).

El almacenamiento temporal de agua en microdepresiones se simula mediante una serie de ecuaciones desarrolladas por ONSTAD (1984) y LINDEN *et al.* (1988).

Para evaluar el flujo superficial y el flujo de canal se usa una solución de diferencias finitas para la ecuación de la onda cinemática, junto con la ecuación de Manning.

La disgregación del suelo se simula en función de la estabilidad de los agregados del suelo, la energía cinética de la precipitación y la profundidad de la capa de agua de superficie.

La capacidad de transporte del flujo superficial se modeliza en función de la potencia de la corriente y del tamaño de grano.

La disgregación originada por el flujo y la sedimentación se simulan mediante ecuaciones usadas previamente en el modelo EUROSEM (MORGAN *et al.*, 1992).

Los principales ficheros de entrada que requiere LISEM son:

- Fichero de precipitación (datos de uno o de múltiples pluviógrafos)

- Tablas de datos físicos para el submodelo de infiltración de agua en el suelo
- Un grupo de mapas que describen la morfología de la cuenca (área de la cuenca, área del pluviógrafo, un mapa con la dirección de drenaje local, un mapa de gradiente de pendiente, un mapa de localización de (sub)-salida(s), un mapa de anchura de caminos).
- Un grupo de mapas necesarios para el submodelo del agua del suelo
- Un grupo de mapas con variables de las características del suelo y uso de la tierra (un mapa del Índice de Área Foliar, un mapa con la cobertura del suelo por la vegetación, un mapa de la rugosidad aleatoria, un mapa de la altura de la vegetación, un mapa de la estabilidad de los agregados, un mapa de la cohesión de un suelo desnudo, un mapa de cohesión adicional por la cosecha,...)

Los resultados del modelo LISEM incluyen:

- Un fichero de texto con los totales (precipitación total, descarga total, descarga punta, pérdida de suelo total, ...);
- Un fichero de datos ASCII el cual puede ser usado para dibujar hidrogramas y sedigramas;
- Mapas de erosión del suelo y deposición, como son causadas por el evento;
- Mapas de flujo superficial como intervalos de tiempo deseados durante el evento.

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE DIFERENTES MODELOS CON ESPECIAL REFERENCIA A LAS CARACTERÍSTICAS AGRARIAS

Aunque todos los modelos considerados son de base física y buscan objetivos similares presentan significativas diferencias, por lo que en la Tabla 1 se lleva a cabo un análisis comparativo de los mismos.

Atendiendo a la modelización espacio-temporal y a la escala de trabajo se puede hacer la primera gran distinción entre modelos. Según estos criterios se produce una diferencia esencial entre el modelo CREAMS y los restantes modelos, con la salvedad del modelo WEPP, que tiene características intermedias:

CREAMS es un modelo global acumulativo, un modelo agregado, mientras que los otros cuatro son modelos distribuidos; WEPP presenta la particularidad de que puede

funcionar como agregado o distribuido. Esto significa que CREAMS no tiene en cuenta la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, lo que se debe de considerar negativo de cara al estudio de la erosión, sobre todo en cuanto a lo relacionado con las actividades agrarias y la variabilidad espacial asociada a ellas.

Por otra parte CREAMS y WEPP son modelos que operan de modo continuo, mientras que ANSWERS, EUROSEM y LISEM tratan de simular la respuesta que se produce tras un evento de precipitación determinado. Operar en modo continuo es un aspecto que también da lugar a inconvenientes al estudiar la erosión; en efecto, aquellos modelos que no tienen en cuenta las condiciones iniciales para cada evento de precipitación, no pueden analizar el efecto de la variabilidad temporal de las condiciones de infiltración en la superficie del suelo (LUDWIG, 1992).

Además CREAMS es un modelo unidimensional, es decir válido para una parcela homogénea y un suelo dados. Dicho en otras palabras, CREAMS sólo permite simular las pérdidas de tierra para una ocupación del suelo y para un perfil representativo del conjunto de una parcela.

Sin embargo, como se discutió anteriormente, a escala de parcela, para un cultivo y unas condiciones de manejo dadas, la intensidad de la erosión viene controlada por tres propiedades de la superficie del suelo variables en el espacio y el tiempo: velocidad de infiltración, capacidad de almacenamiento temporal del agua en las depresiones del microrrelieve y resistencia al flujo concentrado. En una cuenca, por otra parte, es necesario tener en cuenta la influencia sobre los procesos erosivos de la organización espacial de las zonas en que se genera escorrentía y se produce erosión en canales o regueros; en efecto, el agua y los sedimentos procedentes de una parcela pueden, a veces, adicionarse a los de parcelas vecinas, mientras que si las segundas no están cultivadas, su efecto se ve amortiguado.

Después de analizar los problemas que entraña el estudio de la erosión mediante modelos que no permiten tomar en consideración la variabilidad espacio-temporal, se discuten a continuación los modelos distribuidos y que operan para eventos a escala de cuenca, es decir, los modelos ANSWERS, EUROSEM y LISEM.

El dato más característico, y que se revela como el más importante para establecer una distinción entre estos tres modelos es que ANSWERS y LISEM están asociados a un SIG y trabajan discretizando el espacio por medio de celdas, mientras que EUROSEM no lo está y sus entradas básicas son polígonos y líneas.

Las principales razones para usar un SIG son que la escorrentía y los procesos de erosión del suelo varían espacialmente, lo que se tiene en cuenta con el uso de celdas de tamaño adecuado. Por otra parte, los datos de entrada requeridos para el gran número de celdas que se pueden considerar es enorme y no pueden introducirse fácilmente de forma manual, pero sí al usar un SIG.

Las principales ventajas de usar un SIG son:

1) la posibilidad de modificar los datos de entrada rápidamente, en función de variables como los diferentes usos de la tierra o posibles medidas de conservación, para simular escenarios alternativos.

2) la capacidad para usar grandes cuencas con un gran número de celdas, lo que permite efectuar simulaciones con mayor detalle.

3) la facilidad para visualizar los resultados mediante mapas. Se pueden producir una serie de mapas que muestren la variación con el tiempo de la distribución espacial de la erosión del suelo, la sedimentación y la escorrentía. Estos mapas se pueden comparar con otros como los mapas de producción, para analizar como afectan las medidas de control a la erosión y la redistribución de sedimentos dentro de la cuenca.

La principal ventaja de incorporar modelos de erosión a un SIG estriba en la relativa sencillez de la programación y el importante nivel de abstracción del lenguaje utilizado. Una o dos líneas de código o un comando SIG, permiten simular un proceso (ej. intercepción, infiltración y tránsito de sedimentos). Dicho nivel de abstracción simplifica la modificación del modelo, así como el mantenimiento del mismo y, eventualmente, el uso de partes de un modelo para elaborar nuevos modelos.

Uno de los primeros modelos integrado en un SIG fue ANSWERS. El principal inconveniente del modelo ANSWERS es que no tiene en cuenta los principales factores responsables de la variabilidad de la emisión de escorrentía en condiciones de lluvias de intensidad moderada. Otro inconveniente es que tampoco tiene en cuenta, la fecha y naturaleza de los trabajos agrarios realizados, la sensibilidad de la superficie a la costra del suelo, el desarrollo de estas costras y la cronología de las lluvias, factores cuya importancia ha sido puesta de manifiesto en experiencias de campo (LUDWIG, 1992).

Para hacer un uso lo más eficiente posible de datos topográficos distribuidos, el relieve de la cuenca se modeliza habitualmente mediante un modelo de elevación digital (MED). En muchos casos este MED tendrá miles de elementos, por lo que no resulta fácil

Procesos \ Modelos	CREAMS	WEPP	ANSWERS	EUROSEM	LISEM
Escala Espacial					
Agregado/Distribuido	L	L/D	D	D	D
Escala Temporal					
Continuo/Evento	C	C/E	E	E	E
Resolución espacial					
Parcela/Ladera/Cuenca	P	P/L/C	C	C	C
Tipo de entrada					
linear, máx. pendiente		+			
celda, 8 direcciones		+	+		+
polígonos/líneas	+	+		+	
Salida					
valor de la erosión		+			
mapa de erosión		+	+	+	+
mapa de deposición		+	+	+	+
mapa de flujo superficial					+
agua + descarga de sedimentos	+	+	+	+	+
Infiltración					
"Green & Ampt"	+	+			+
"Smith & Parlange"				+	
"Holtan"			+		+
"Richard's/Darcy"					+
suelo en capas					+
evaporación	+	+			
Intercepción					
intercepción del cultivo			+	+	+
cobertura vegetal/residuos	+	+	+	+	+
Almacenamiento superficial					
altura del microrelieve			+		
rugosidad aleatoria		+		+	+
rugosidad del cultivo		+			
gradiente de pendiente					+
Flujo superficial					
número de curva SCS	+				
exceso de infiltración	+	+			
velocidad de flujo y descarga	+	+	+	+	+
onda cinemática	+	+	+	+	+

Flujo concentrado					
onda cinemática	+	+	+	+	+
forma (s/d)	d	s	s	s	s
Erosión					
factor de erodibilidad K	+	+	+		
cohesión del suelo		+		+	+
disgregación de lluvia	+	+	+	+	+
disgregación por flujo	+	+	+	+	+
estabilidad agregados y tamaño superficie y/o canal	s+c	s+c	s+c	s+c	s+c
Cultivo/Vegetación					
cubierta/residuos	+	+	+	+	+
transpiración	+	+			
crecimiento		+			
Actividades agrícolas y manejo					
manejo de cultivos/ residuos	+	+	+		+
rodadas de maquinaria					+

Figura 4

Comparación de los procesos que simulan los modelos CREAMS, WEPP, ANSWERS, EUROSEM y LISEM (de acuerdo con JETTEN, comunicación personal)

introducir los datos manualmente. A partir del MED, el SIG puede calcular mapas de altitud, pendiente, drenaje, etc. que a su vez constituyen entradas para el modelo LISEM.

Dado que generalmente no se dispone de muestreos detallados de variables de entrada, con frecuencia se consiguen adecuados los datos basados en un número limitado de puntos de observación del suelo, etc., recogidos durante los experimentos de campo. Técnicas de interpolación geoestadística, incorporadas en el SIG, pueden ser usadas para producir mapas de esos puntos de observación. Usando un método tal como krigeado por bloques, los puntos de observación son interpolados a bloques del mismo tamaño como los elementos usados para simulación. Cuando no hay suficientes medidas de campo adecuadas, la distribución de una variable de entrada deseada puede ser derivada de mapas de uso de la tierra o suelo digitalizados. Un SIG de base raster es la herramienta ideal para servir las necesidades y requerimientos completos asociados con el MED y las técnicas de interpolación geoestadística.

En cuanto a salidas de resultados finales LISEM es el más completo ya que incluye además de mapas de erosión, deposición y descarga de sedimentos, como los modelos WEPP, ANSWERS y EUROSEM un mapa de flujo superficial.

Para el cálculo de la infiltración es LISEM también el que más posibilidades tiene, con cuatro formas diferentes de realizar dicho cálculo, en función de los datos disponibles.

En cuanto a las características del suelo, un dato de gran importancia es la rugosidad aleatoria que sólo es tenida en cuenta por parte de los modelos WEPP, EUROSEM y LISEM. La cohesión del suelo también es una característica muy importante que sólo es una variable tomada en cuenta por los mismos modelos, pero con más especificidad en el modelo LISEM ya que distingue entre la cohesión del suelo desnudo y la cohesión adicional que se produce por la cosecha.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo se llevó a cabo en el marco del proyecto FAIR 1- CT95-0458

BIBLIOGRAFÍA

- ACEA, M.J., CABANEIRO ALBADALEJO, A., CARBALLAS FERNÁNDEZ, M., GIL SOTRES, F., LEIROS DE LA PEÑA, M.C., LÓPEZ PERIAGO, E., NUÑEZ DELGADO, A. y VILLAR CELORIO, M. C.(1990). *El purín de vacuno en galicia. Caracterización, poder fertilizante y problemas ambientales*. Coordinado por Tarsy Carballas Fernandez y Francisco Díaz-Fierros Viqueira. Conselleria de Ordenación do Territorio e Obras Públicas. Xunta de Galicia. 162 pp.
- ALBERTS, E. E., NEARING, M. A., WELTZ, M.A, RISSE, L. M., PIERSON, F. B. ZHANG, X. C., LAFLEN, J. M. and SIMANTON, J. R. (1995). Soil component. In *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*, eds.: Flanagan, D. C. Nearing, M. A. and Laflen., J. M. NSERL Report No.10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- ARNOLD, J. G., WILLIAMS, J.R., NICKS, A.D. and SAMMONS, N.D (1990). *SWRRB. A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management*. College Station, Tex.: Texas A and M Press.
- ASCOUGH II, J.C., BAFFAUT, C., NEARING M.A. and LIU, B.Y. (1997). The WEPP Watershed model: I Hydrology and Erosion. *Transactions of the ASAE* 40 (4): 921-933.
- AUZET, A. V., BOIFFIN, J., PAPY, F., LUDWIG, B. and MAUCORPS, J. (1993). Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *Catena*, 20 : 41-62.
- BEASLEY, D.B. and HUGGINS, L.F. (1981). *ANSWERS User's manual*. United States Environmental Protection Agency Region V, Chicago, IL.
- BELMANS, C., WESSELING, J.G.and FEDDES, R.A. (1983). Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology*, Vol. 63, 271-286.
- BOIFFIN, J. et BRESSON, L. M., (1987). Dynamique de formation des crôutes superficielles: apport de l'analyse microscopique. In: Fedoroff. N., Bresson, L. M. and Courty, M. A., eds. *Soil Micromorphology*. AFES. 393-399.
- CARBALLAS, T., LEIROS, M.C., CABANEIRO, M.C. y DÍAZ FIERROS, F. (1988).Loss of NH₃ from acid humic temperate zone soils treated with cattle slurry. Safe and efficient slurry utilization. *Minutes of a Joint Meeting of the FAO- European Network on Animal Wasre Utilization*.

- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. and MAYS, L. W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill. Santa Fé de Bogota. 584 pp.
- DEFFONTAINES, J. R. (1996). Du paysage comme connaissance de l'activité agricole à l'activité agricole comme moyen de production du paysage. L'agriculteur producteur de paysages. Un point de vue d'agronome. *C. R. Acad. Agric. Fr* 12 (4): 57-69.
- DE ROO, A.P.J., HAZELHOFF, L. and BURROUGH., P.A. (1989). Soil erosion modeling using "ANSWERS" and Geographical Information Systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 14, 517-532. John Wiley and Sons, Ltd.
- DE ROO, A.P.J., WESSELING, C.G., JETTEN, V.G., OFFERMANS, R.J.E. and RITSEMA, C.J. (1995). LISEM, *Limburg soil Erosion Model, User Manual*, Dept. Of Physical Geography, Utrecht University.
- De ROO, A. P. J., OFFERMANS, R.J.E., CREMERS, N.H.D.T. (1996a) LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. Y: Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10: 1107-1117.
- De ROO, A. P. J., OFFERMANS, R.J.E., CREMERS, N.H.D.T. (1996a) LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. Y: Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10: 1107-1117.
- DAFONTE DAFONTE, J. (1999). *Procesos hidrológicos superficiales en cuencas agrícolas*. Tesis Doctoral. EPS de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. 190 pp.
- DIÉGUEZ VILLAR, A. (1998). *Estudio del contenido en iones mayoritarios de las aguas de escorrentía de dos cuencas agrícolas*. Tesis de Licenciatura. Universidad de A Coruña. 94 pp.
- FLANAGAN, D.C., NEARING, M.A. and LAFLEN, J.M. eds. (1995). *USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation*. NSERL Report No.10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- FOSTER, G.R. and LANE, L.J. (1987). *User Requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP)*. NSERL Report No 1. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab.
- GONZÁLEZ GARCÍA, M. A. (1998). *Propiedades hidrodinámicas en zona no saturada y su relación con los procesos hidrológicos*. Tesis Doctoral. EPS de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. 228 pp.

- GOVERS, G. (1991) Spatial and temporal variations in splash detachment: a field study. *Catena Supplement*, 20: 15-24.
- GOVERS, G., QUINE, T. A., DESMET, P. J. J. and WALLING, D. E. (1996). The relative contribution of soil tillage and overland flow erosion to soil redistribution on agricultural land. *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol 21, 929-946.
- IBAÑEZ, J.J., MACHADO, C., ZUCARELLO, V. y GONZÁLEZ HUECAS, C. (1995). Modelos de simulación y variabilidad espacio-temporal. En: *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales*. Ibañez, J.J and Machado, C eds. Geoforma Ediciones. Logroño. 111-132.
- KARSSENBERG, D. J., 1996. PCRaster Manual. Version2. Dept. of Physical Geography. University of Utrecht. Holanda.
- KNISEL, W.G. (1980). CREAMS: *A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*. Conservation Research Report No 26. Washington, D.C.: USDA-Sci. and Educ. Admin.
- KOTTWITZ, E.R. (1995). Ch.12. Irrigation component. In USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, eds. Flanagan, D. C., Nearing, M. A. and Lafren, J.M *NSERL Report No.10*. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- KWAAD, F.J.P. M. (1991). Summer and winter regimes of runoff generation and soil erosion on cultivated loess soils. *Earth Surface Processes and Landforms*. 16: 653-662.
- LINDEN, D. R., Van DOREN, J. R., and ALLMARAS, R. R., 1988. A model of the effects of tillage-induced soil surface roughness on erosion. In: *Tillage and traffic in crop production. Proceedings of the 11th ISTRO conference*. Edinburgh. Scotland. pp 373-378.
- LUDWIG, B.(1992). *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 de doctorat, Université Strasbourg-I, 201 p.
- MARTIN, P. et PAPY, F., SOUCHERE, V et CAPILLON, A., (1998). Maîtrise du ruissellement et modélisation des pratiques de production. *Cahiers Agricultures*, 7 (2): 111-119.

- MONTAS, H.J., MADRAMOOTOO, C. A. (1991). Using the ANSWERS model to predict runoff and soil loss in Southwestern Quebec. *Transactions of the ASAE*. 34 (4): 1754-1762
- MORGAN, R.P.C., QUINTON, R.J. and RICKSON, R.J. (1993). *EUROSEM: A user guide*. Silsoe College. Cranfield University. Reino Unido.
- MORGAN, R. P. C., QUINTON, R. E., SMITH, R. E., GOVERS, G., POESEN, J. W. A., AUERSWALD, K., CHISCI, G., TORRI, D., STYCZEN, M.E., FOLLY, A.J.V. 1998. The European soil erosion model and user guide. Version 3.6.. Silsoe College. Cranfield University. Reino Unido.
- NICKS, A.D., LANE, L. J. and GANDER, G. A. (1995). Ch.2. Weather generator. In USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, eds. Flanagan, D.C., Nearing, M.A. and Laflen, J.M. *NSERL Report No.10*. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- OENEMA, O. and ROEST, C. W. J. (1998). Nitrogen and Phosphorus losses from agriculture into surface waters; The effect of policies and measures in the Netherlands. *Wat. Sci. Tech.*, 37 : 19-30.
- OYGARDEN, L. (1996). Erosion and surface runoff in small agricultural catchments. In: *Erosion and Sediment Yield. Golbal and Regional Perspectives*. IAHS pub n° 236, pp 283-291.
- ONSTAD, C. A. (1984) Depressional storage on tilled soil surfaces. *Trans ASAE*, 27: 729-732.
- PAZ, A., TABOADA, M.T., DAFONTE, J. and GONZÁLEZ, M.A. (1996). Control del riesgo de arroyada en clima oceánico húmedo: estado actual y perspectivas. *Real Sociedad Española de Historia Natural*. Tomo extraordinario. 423-426 pp.
- QUINTON, J.N. (1994). Validation of physically based erosion models, with particular reference to EUROSEM. *Conserving Soil Resources* (de. R.J. Rickson), 300-313.
- RUDRA, R.P., DICKINSON, W. T.and WALL G. J. (1989). Evaluation of land use effects on surface soil hydraulic properties using CREAMS. *Transactions of the ASAE* 32 (4): 1295-1302.

- RUDRA, R.P., DICKINSON, W. T. and Von EUW. (1993). The importance of precise rainfall inputs in Nonpoint Sourcem Pollution Modeling *Transactions of the ASAE* 36 (2): 445-450.
- SAVABI, M. R. and J. R. WILLIAMS, J.R.. (1995). Ch.5. Water balance and percolation. In USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, eds. Flanagan, D.C., Nearing, M.A and Laflen, J.M. *NSERL Report No.10*. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- SOUCHERE, V., KING, D., DAROUSSIN, J., PAPY, F. and CAPILLON, A. (1998). Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hidrology*, 206: 256-267.
- TABOADA CASTRO, M^a M. (1998). *Dinámica de la formación de costras superficiales en suelos de cultivo*. Tesis de licenciatura. Universidad de La Coruña. 92 pp.
- VANDAELE, K. and POESEN, J. (1995). Spatial and temporal patterns of soil erosion rates in an agricultural catchment, central Belgium. *Catena*, 25 : 213-226.
- VAN DEURSEN, W. P. and WESSELING, C. G. (1992). *The PC-RASTER Package*. Department of Physical Geography. University of Utrecht. 198 pp.
- VANSTEELANT, J. Y., TRÉVISAN, D., PERRON, L., DORIOZ, J.M., ROYBIN, L. (1997). Conditions d'apparition du ruissellement dans les cultures annuelles de la région lémanique. Relation avec le fonctionnement des exploitations agricoles. *Agronomie*, 17: 65-82.
- WILLIAMS, J.R. (1995). The EPIC model. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, de. Singh, V. P. Littleton, Colo.: Water Resources Publications. 909- 1000
- WOOLHISER D.A., SMITH, R.E and GOODRICH, D.C. (1990). *KINEROS: A kinematic runoff and erosion model documentation and user manual*. USDA Agricultural Research Service ARS -77.