

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE UN MODELO FÍSICO
DISTRIBUIDO BAJO LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS Y
GEOMORFOLÓGICAS DEL COMPLEJO DE ÓRDENES
(A CORUÑA)

Mirás Avalos, J. M. y López Candia, C. A.

*Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña.
A Zapateira s/n. 15071. A Coruña.*

SUMMARY

Sensitivity analysis of a physical model under the climatic and geomorphologic conditions of Complejo de Órdenes (A Coruña).

A sensitivity analysis of the model LISEM (1.53 version) was performed for those environmental physical conditions of the *Complejo de Ordenes* area (A Coruña). LISEM is a physically based spatial erosion model integrated into a raster GIS. The analyzed variables were: saturated hydraulic conductivity (Ksat), random roughness (RR) and Manning's n (n). Sensitivity analysis was made using two different methodologies, the first one was direct comparison between input data and the simulated results and, the second methodology was by using a sensitivity factor as proposed by Nearing based on the difference between minimum and maximum values in the analyzed ratio. It appears that changing one variable and comparing it with a baseline value is not sufficient to understand the model response because combinations of different input values gave the same output. The LISEM model is very sensitive to changes of the hydraulic conductivity (Ksat) and all of the studied variables are influenced by this factor, whereas Manning's n (n) and random roughness (RR) have a minor influence above the studied variables. Nevertheless, some of the studied variables may be significantly sensitive to changes in random roughness (as in the case for flow detachment) and to the Manning's n (the case deposition).

Key words: LISEM, G.I.S., hydraulic conductivity, random roughness, Manning's n, flow detachment, splash.

RESUMEN

Se realizó un análisis de sensibilidad del modelo LISEM (versión 1.53) para las condiciones del medio físico de la zona del Complejo de Órdenes (A Coruña). LISEM es un modelo de erosión distributivo y con base física integrado en un SIG tipo RASTER. Las variables utilizadas fueron la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), la rugosidad aleatoria (RR) y la n de Manning (n). El análisis de sensibilidad se llevó a cabo empleando dos métodos diferentes. El primero fue la comparación directa entre los datos que se introducen en el modelo y los resultados que éste simula; el segundo método fue el cálculo de un factor de sensibilidad (propuesto por Nearing) que responde a la diferencia entre los valores máximos y mínimos en el rango analizado. Se comprobó que, cambiar una variable y compararla con un valor de referencia no es suficiente para entender la respuesta del modelo LISEM puesto que, distintas combinaciones de valores de entrada pueden originar la misma salida. El modelo LISEM es muy sensible a los cambios en la conductividad hidráulica (K_{sat}), de tal modo que todas las variables estudiadas se ven afectadas por los cambios en este factor mientras que la n de Manning o la rugosidad aleatoria ejercen una menor influencia sobre las variables a estudio. Sin embargo, algunas de las variables estudiadas sí son significativamente sensibles a los cambios en la rugosidad aleatoria (como la disgregación por flujo) y a la n de Manning (como la deposición).

Palabras clave: LISEM, S.I.G., conductividad hidráulica, rugosidad aleatoria, n de Manning, disgregación por flujo y salpicadura.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se asiste a modificaciones continuas del sistema de explotación agrícola lo que conlleva que muchas empresas, en particular las unifamiliares, sufran cambios drásticos en lo que se refiere a las características de las parcelas o al manejo de las mismas. Estos cambios originan problemas medioambientales; al mismo tiempo, inciden sobre las características del paisaje. Para poder predecir los posibles riesgos asociados a las modificaciones de 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 el código de buenas prácticas, compatibles con la conservación del medio ambiente (VALCÁRCEL ARMESTO *et al.*, 1999).

A partir de datos de erosión medidos en campo se pueden realizar previsiones acerca de los riesgos que llevan consigo estos procesos (LUDWIG *et al.*, 1992; VAN DAELE and POESEN, 1995; OYGARDENO, 1996). Sin embargo, todos estos estudios son experimentales; es decir, se toman datos en el campo y luego se analizan pormenorizadamente mediante diferentes métodos de estudio lo que hace que estos trabajos resulten temporalmente largos y no rentables económicamente en todas las situaciones.

En otras ocasiones se emplean simulaciones por ordenador, lo que tiene claras ventajas como que son estudios relativamente baratos. Puesto que no hay que tomar medidas en el campo de una manera regular, permiten variar características físicas de la zona de estudio que de otra forma no sería posible. Este método supone una base fiable para realizar previsiones contra posibles riesgos producidos por la erosión y pueden utilizarse como base de transferencia de una zona a otra y como base para la interpolación temporal cuando se toman datos incompletos en condiciones de campo.

Para realizar este tipo de estudios se hace enormemente necesario el conocimiento de los procesos de erosión y el manejo de los modelos de simulación.

Con respecto a los procesos de erosión, si estos se analizan como un fenómeno espacialmente distribuido lo primero que hay que conocer es el concepto de cuenca de drenaje. La cuenca de drenaje de un cauce, en una sección dada de su curso, es la superficie de terreno limitada por el contorno a partir del cual la precipitación caída drena por esa sección (LÓPEZ CADENAS DE LLANO, 1998). La morfología de una cuenca viene definida por tres tipos de parámetros:

- Parámetros de forma: la forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación determinada.
- Parámetros de relieve: a mayor pendiente existe una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal.
- Parámetros relativos a la red de drenaje: se denomina red hidrográfica al drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluyen las aguas de los escurrimientos superficiales, hipodérmicos y subterráneos de la cuenca (LÓPEZ CADENAS DE LLANO, 1998).

Otro factor muy importante es el suelo ya que juega un papel determinante en la cubierta vegetal por lo que es imprescindible su conocimiento para establecer un mejor aprovechamiento y para evitar su deterioro. También es importante el suelo en el régimen hidrológico.

El suelo presenta características y cualidades. Una característica del suelo es un atributo que puede medirse o estimarse (textura, estructura, etc.) mientras que una cualidad del suelo es un atributo complejo que actúa de una manera concreta sobre la adaptabilidad del suelo para una clase concreta de empleo o sobre su vulnerabilidad ante aquél.

Por otra parte, el clima de una región es un factor enormemente importante en el tipo de suelo y en la vegetación por lo que su estudio en análisis de cuencas es totalmente imprescindible. El clima de una región resulta del conjunto de condiciones atmosféricas que presente la misma a lo largo de los años. El estudio climático de una cuenca que requieren los estudios de erosión se realiza a partir de datos termométricos y pluviométricos obtenidos en estaciones meteorológicas representativas.

Además hay que tener en cuenta que la erosión del suelo es un proceso que consta de dos fases consistentes en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos, como las corrientes de agua y el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas se produce una tercera fase: la deposición (MORGAN, 1997).

Poniendo un ejemplo, durante una tormenta, parte del agua (precipitación directa) cae directamente sobre el suelo, bien porque no hay vegetación o bien porque pasa a través de los huecos de la cubierta vegetal. Parte de la lluvia es interceptada por la cubierta vegetal, desde donde vuelve a atmósfera por evaporación, o llega al suelo goteada por las hojas (drenaje foliar), o fluye hacia abajo por los tallos. La precipitación directa y el drenaje foliar son responsables de la erosión por salpicadura. La lluvia que llega al suelo puede almacenarse en pequeñas depresiones u hondonadas de la superficie o puede infiltrarse en el suelo contribuyendo al contenido de humedad en el suelo o, por percolación, a recargar los acuíferos. Cuando el suelo es incapaz de almacenar más agua, el exceso se desplaza lateralmente por el interior del suelo y a favor de la pendiente, como flujo subsuperficial o flujo interno, o contribuye a la escorrentía superficial provocando erosión como flujo laminar en regueros y cárcavas.

Actualmente existen distintos modelos de evaluación de las pérdidas de suelos, suficientemente ajustados, para poder utilizarlos dentro de sus límites de aplicación.

Los modelos paramétricos permiten calcular las pérdidas de suelo mediante el uso de una expresión matemática en la cual conocemos unos parámetros y obtenemos otro a partir de ellos. Un ejemplo de modelo paramétrico sería la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). Los modelos de solución analítica, como el modelo de Meyer-Wischmeier, son modelos conceptuales que dividen el proceso de erosión en varios subprocesos definidos por distintos factores que se calculan mediante fórmulas matemáticas. Los modelos de solución numérica se basan en los mismos principios que los modelos de solución analítica pero, el método de resolución permite una mayor adaptación a las circunstancias del mundo real. Un ejemplo de este tipo de modelos es el KINEROS.

Por último, los modelos de base física son aquellos que utilizan ordenadores para procesar grandes cantidades de datos y describen los procesos incluidos en el modelo mediante ecuaciones matemáticas teniendo en cuenta las leyes de la conservación de la masa y de la energía. A este grupo pertenece el modelo LISEM aunque hay más como CREAMS, WEPP o ANSWERS.

En concreto, el modelo LISEM (Limburg Soil Erosion Model) utilizado en este estudio, simula la hidrología y el transporte de sedimentos durante e 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 (DE ROO *et al.*, 1995). Se trata de un modelo totalmente integrado en un SIG (Sistema de Información Geográfica) tipo raster lo que significa que no es necesaria una conversión de los ficheros de entrada y salida. El modelo LISEM nos ofrece una gran versatilidad para el estudio de la erosión en cuencas mientras que otros modelos (ANSWERS, por ejemplo) son más limitados; por eso hemos escogido este modelo para realizar este estudio.

Este modelo incorpora distintos procesos. Los principales son: precipitación, interceptación, almacenamiento superficial en microdepresiones, infiltración, movimiento vertical del agua en el suelo, flujo superficial, flujo en canales, erosión por precipitación, erosión por flujo superficial y capacidad de transporte del flujo y, además, influencia de rodadas de tractor, pequeños caminos y encostrado de la superficie.

- La interceptación por el cultivo y/o la vegetación natural se estima mediante ecuaciones desarrolladas por Von Hoyningen-Huene y Aston (en DE ROO *et al.*, 1995).
- La infiltración y el transporte de agua a través del suelo son simuladas mediante la ecuación de Richards. En áreas sin datos suficientes relativos a las propiedades físicas del suelo, se pueden usar versiones del modelo diferentes con ecuaciones de infiltración empíricas basadas en las expresiones de Green & Ampt y Holtan.
- El almacenamiento temporal de agua en microdepresiones se simula mediante una serie de ecuaciones desarrolladas por Onstad y Linden (en DE ROO *et al.*, 1995).

- 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 superficial.
- 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.

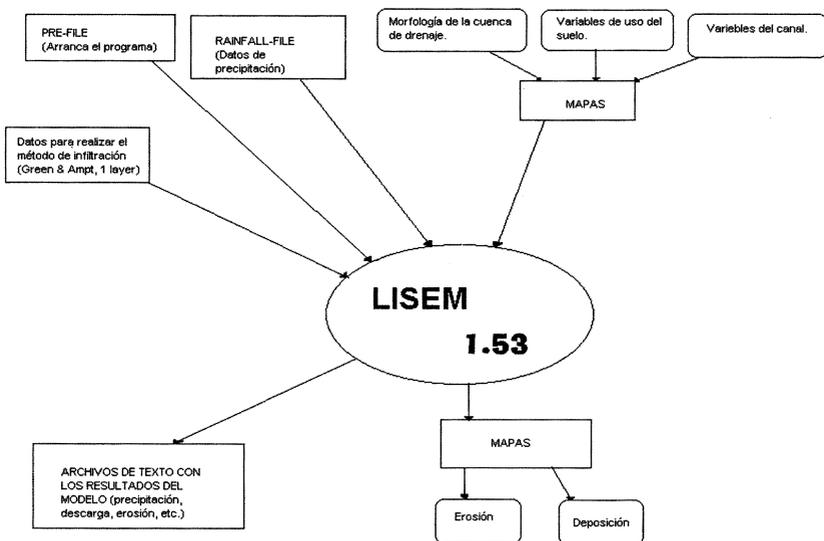


Figura 1. Esquema general del modelo LISEM 1.53.

Por ello, los principales ficheros de entrada del modelo LISEM son los que contienen datos de precipitación, tablas de datos físicos para el submodelo de infiltración de agua en el suelo, mapas que describen la morfología de la cuenca, mapas necesarios para el submodelo del agua del suelo y mapas con variables de las características del suelo y usos de la tierra.

Las salidas que este modelo nos ofrece son un fichero de texto con los resultados totales, un fichero de datos ASCII que puede ser utilizado para dibujar hidrogramas y sedigramas, mapas de erosión del suelo y deposición como son causados por el evento y mapas de flujo superficial.

Por tanto, este modelo permite estimar posibles riesgos que conlleven las modificaciones del territorio. LISEM, ha sido ya utilizado para la modelización de cuencas agrícolas y el análisis de sensibilidad de las mismas en las condiciones del Norte de Francia (JETTEN *et al.*, 1996).

El objetivo principal de este estudio es conocer cómo afecta la modificación de distintas variables (rugosidad aleatoria, n de Manning y conductividad hidráulica saturada) a procesos como la erosión, la infiltración, etc. Además, se comparan estas variaciones entre sí, para poder predecir cómo se comportarán otras zonas con características de superficie similares. Se aplica también el modelo LISEM para simular procesos erosivos a escala de cuenca considerando la topografía y la estructura hidrográfica, así como teniendo en cuenta factores que se deriven del uso del suelo como pueden ser las prácticas agrícolas.

MATERIAL Y MÉTODOS

La cuenca en la que se llevó a cabo el estudio se encuentra situada en el Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo, dependiente de la Xunta de Galicia, en la provincia de A Coruña (Galicia, España). Su extensión es de 24.98 hectáreas.

En esta zona, el clima predominante es el atlántico, que se caracteriza, a grandes rasgos, por una suavidad de las temperaturas durante todo el año y unas precipitaciones bastante abundantes, si bien más copiosas en la estación invernal. Los datos medios correspondientes al periodo 1979-1997 indican que la lluvia media anual es de 992.9 mm siendo los meses más lluviosos diciembre con 137.9 mm y noviembre con 118 mm y los más secos julio con 23.71 mm y agosto con 31.5 mm.

La elaboración de los datos morfológicos ha sido efectuada por GONZÁLEZ GARCÍA y DAFONTE DAFONTE (1998).

Para ello, se midió en primer lugar la topografía con una estación total Sokkia Set5A. El modelo digital del terreno se elaboró mediante el S.I.G. PCRaster. Las cotas extremas son 95 y 135 m. No existen cursos permanentes de agua, de modo que el cauce principal es un curso efímero que solo transporta agua en caso de avenida. En cuanto al relieve se encuentran pendientes muy suaves (<3%) en los fondos de valle y zona de meseta, próximas a la divisoria de aguas, frente a las laderas opuestas al cierre de la cuenca con pendientes moderadas (9-13%).

El material de partida sobre el que se desarrollan los suelos forma parte de la serie del "Complejo de Ordes". Los suelos son de textura media, generalmente franca o franco-limosa y su contenido en arcilla no suele superar el 20% (ULLOA GUITIÁN, 1998). Cuando se dedican a la agricultura, con frecuencia se aprecia la degradación de la superficie bajo el impacto de la lluvia (TABOADA CASTRO, 1998 y TABOADA CASTRO *et al.*, 1999).

En relación con las variables de entrada necesarias para elaborar un escenario y llevar a cabo la simulación, la infiltración viene representada por la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) que designa el proceso de entrada, que se asume vertical, de agua a través de la superficie del suelo. Se eligieron dos conductividades muy lentas (3 y 5 mm/h), dos lentas (10 y 15 mm/h) y dos moderadas (30 y 40 mm/h) por que nos han parecido las más acordes con las características topográficas del terreno y con los datos experimentales (TABOADA CASTRO *et al.*, 1999).

La n de Manning es un coeficiente que mide la resistencia al flujo de agua y la rugosidad aleatoria (RR) proporciona información sobre la microtopografía del suelo permitiéndolo calcular el almacenamiento de agua en el microrrelieve. De acuerdo con los datos de la bibliografía (DE ROO *et al.*, 1995) los valores de n de Manning que se han empleado en este estudio han sido 0.1, 0.2 y 0.3. Según los datos tabulados en una pradera como la de Mabegondo el valor esperado sería, aproximadamente, de 0.245. Con valores oscilando entre 0.1 y 0.3 se pretende probar el modelo LISEM en unas condiciones extremas para analizar si ofrece resultados razonables. En el caso de la rugosidad aleatoria, se han empleado valores de 0.7, 1.2 y 1.7 cm; este rango de variables se ha inferido de numerosas experiencias (VIDAL VÁZQUEZ, 1998 y LADO LIÑARES, 1999).

Los diferentes valores de las variables conductividad, n de Manning y rugosidad se introducen en LISEM mediante mapas de entrada en formato PCRaster.

Por lo que respecta a la precipitación, las simulaciones se llevaron a cabo considerando las condiciones climáticas de la estación de primer orden más próxima (Alvedro), utilizándose precipitaciones sintéticas con una duración de 90 minutos y períodos de retorno de 2 y 25 años. La altura de la precipitación es de 18.76 mm para el período de retorno de 2 años y de 39.35 mm para el de 25 años. Para cada período de retorno se ha creado un fichero con los datos de precipitación. En la tabla 1 se muestra el contenido de ambos ficheros.

Tiempo (minutos)	Período de retorno 2 años	Período de retorno 25 años
0-10	4.932	9.828
10-20	5.976	12.588
20-30	7.788	17.502
30-40	11.904	28.590
40-50	43.23	78.552
50-60	17.262	41.646
60-70	9.336	21.732
70-80	6.738	14.646
80-90	5.394	11.034
90-250	0	0

Tabla 1. Archivos con los datos de precipitación para períodos de retorno de 2 y 25 años.

El mapa de usos del suelo y los mapas derivados del mismo (red de drenaje originada por las labores agrícolas y superpuesta a la topográfica, cubierta vegetal del suelo, etc.) se elaboraron, admitiendo que toda la cuenca estaba ocupada por una pradera uniforme, mediante PCRaster. El estado de la superficie del suelo se describió mediante mapas de rugosidad aleatoria (RR), resistencia hidráulica (n de Manning), cohesión y estabilidad de los agregados. En relación con las variables hidrológicas, se tomó un valor constante de porosidad y contenido hídrico inicial (0.44), y por lo que respecta a la conductividad hidráulica, la simulación se llevó a cabo admitiendo diferentes valores uniformes de este parámetro en toda la cuenca en el intervalo comprendido entre 3 y 40 mm/h se utilizó una de las opciones de cálculo de la infiltración que contiene LISEM: el método de Green-Ampt que evalúa la infiltración en el suelo mediante un solo horizonte homogéneo.

El análisis de sensibilidad indica la forma en que oscila la salida de un modelo al variar en una unidad alguna de las entradas. En todos los modelos conviene efectuar este análisis para comprobar que se comporta racionalmente y para indicar la precisión con que es necesario medir o estimar los valores de entrada (MORGAN, 1997). El comportamiento es racional si el nivel de sensibilidad de los factores en el modelo es equiparable a lo esperado de la realidad y si las relaciones entre la salida y los factores controlados están de acuerdo con lo observado en el campo o en los experimentos en el laboratorio.

Esencialmente, el procedimiento utilizado para el análisis de sensibilidad del modelo se basa en realizar una serie de simulaciones. En cada simulación, se cambia el valor de un parámetro del sistema o variable de estado manteniendo el resto de variables constantes. De este modo se apreciará a cuál de las variables de estado es más sensible el modelo.

En este trabajo se utilizó la comparación directa de los datos de entrada y de salida así como el índice de sensibilidad S de Nearing, cuya fórmula es la siguiente:

$$S = \frac{(O_2 - O_1) \cdot O_{12}}{(I_2 - I_1) \cdot I_{12}}$$

Donde I_1 e I_2 son el menor y el mayor valor de entrada utilizados como parámetros, I_{12} es la media de ambos valores, O_1 y O_2 son las salidas asociadas, siendo O_{12} su media. S representa un cambio normalizado en la salida respecto a un cambio normalizado en la entrada. De este modo sólo se analiza la respuesta a una diferencia de valores mínimos y máximos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizan en primer lugar los resultados de las simulaciones obtenidos por comparación directa de entradas y salidas del modelo y en segundo lugar mediante el índice S de Nearing.

1.- Comparación directa:

De acuerdo con los resultados existe una gran diferencia entre los valores de salida que proporciona el modelo LISEM para los dos períodos de retorno empleados, siendo mayores los valores de salida correspondientes al período de retorno de 25 años que los correspondientes al período de retorno de 2 años, como cabía esperar.

En todos los casos considerados se observa una influencia muy importante inducida por las variaciones en la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) sobre los resultados de diferentes parámetros (figuras 2 y 3). Esta influencia tiene dos vertientes, en el caso de la infiltración, a medida que aumentamos el valor de la conductividad, el valor de salida aumenta y en los restantes casos, a medida que aumentamos el valor de la conductividad, la salida disminuye (es el caso del resto de salidas, como son la descarga total, la deposición, la erosión...).

Por contra, los factores n de Manning y rugosidad aleatoria (RR) tienen una menor influencia que la conductividad (K_{sat}). Sin embargo, la salida para la disgregación por flujo se ve afectada en gran medida por los cambios en los valores de la n de Manning de tal modo que al aumentar los valores de n de Manning, la salida que ofrece el modelo para la disgregación por flujo disminuye de una manera importante. En el caso de la deposición, se observa un comportamiento similar al de la disgregación.

En las figuras 2 y 3 que se presentan a continuación, se ofrecen los resultados de todas las simulaciones siguiendo el orden del organigrama adjunto, lo que permite efectuar un análisis más detallado de los resultados. Se sigue el orden del organigrama adjunto con las figuras, de izquierda a derecha y de arriba abajo, se comienza por n 0.1; RR 0.7 y K_{sat} 3 y se termina por n 0.3; RR 1.7 y K_{sat} 40.

El resultado de variables como la descarga total, la disgregación por salpicadura, por flujo y la erosión total se ve influido en gran medida por el valor que tome la conductividad hidráulica saturada de tal modo que, a conductividades bajas (3-5 mm/h) se produce un mayor efecto de estas variables sobre la simulación.

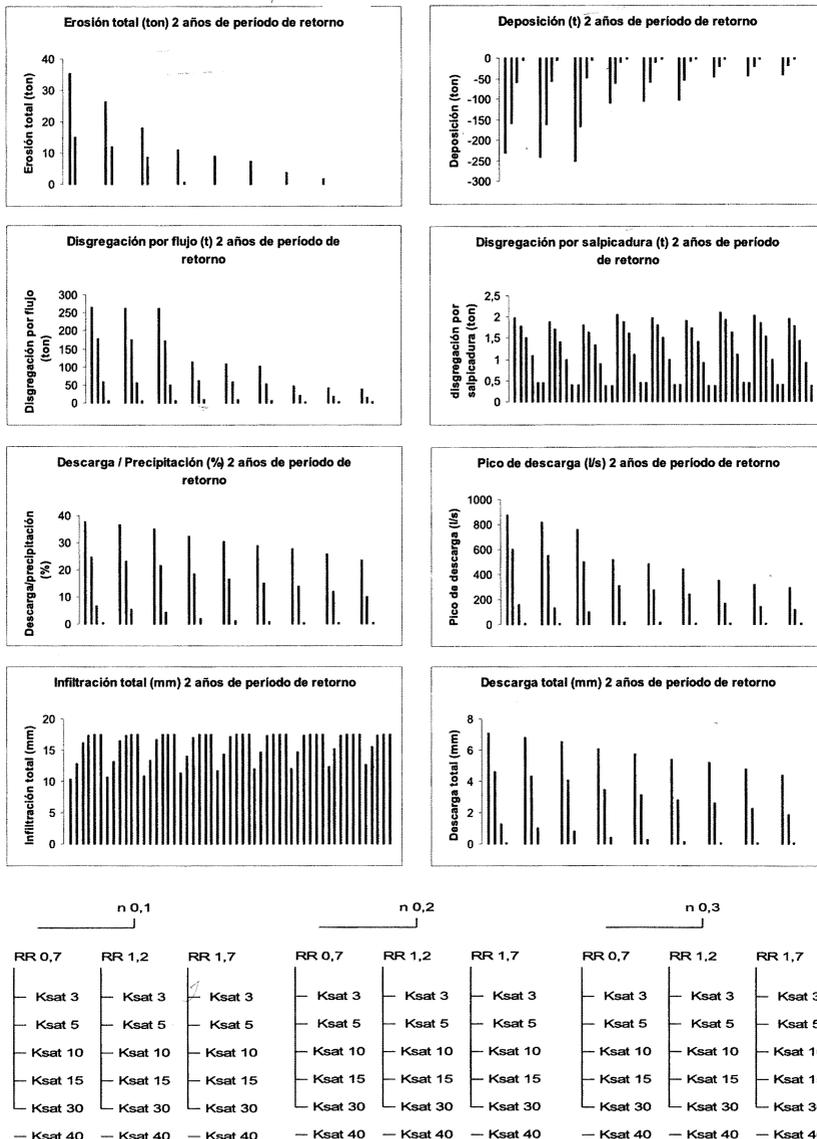


Figura 2. Gráficas con los resultados de las simulaciones para 2 años de periodo de retorno y organigrama adjunto de las simulaciones (de izquierda a derecha y de arriba abajo, se comienza por n 0.1 ; RR 0.7 y Ksat 3 y se termina por n 0.3; RR 1.7 y Ksat 40).

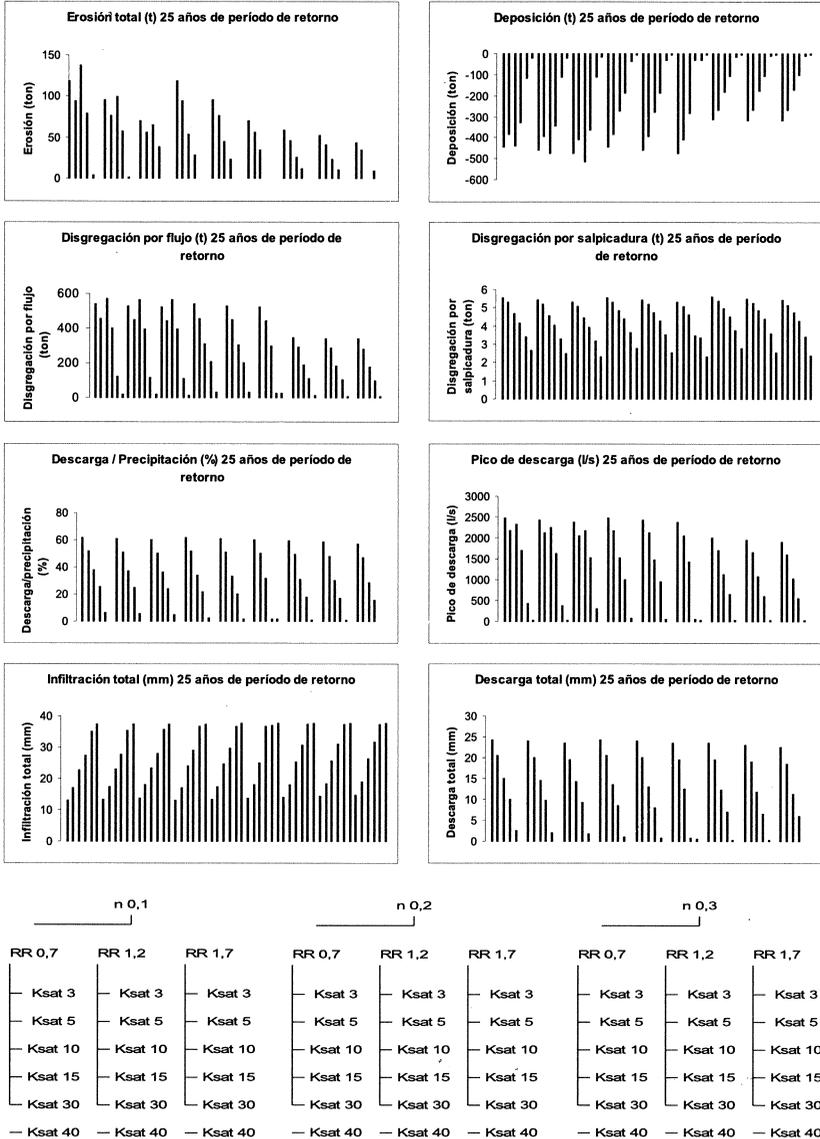


Figura 3. Gráficas con los resultados de las simulaciones para 25 años de periodo de retorno y organigrama adjunto de las simulaciones (de izquierda a derecha y de arriba abajo, se comienza por n 0.1 ; RR 0.7 y Ksat 3 y se termina por n 0.3; RR 1.7 y Ksat 40).

En estos casos la n de Manning y, sobre todo, la rugosidad aleatoria ejercen una menor influencia sobre estas variables de estado.

Hay que destacar también que los valores que toman todas estas variables de estado se ven reducidos enormemente cuando la conductividad es alta (40 mm/h). Así en el caso de un período de retorno de 25 años llega a reducirse en un 90% mientras que con la n de Manning 0.3 esa reducción sólo es del 26% y con la rugosidad aleatoria 1.7cm la reducción está en torno al 7%.

El caso de la infiltración, lógicamente opuesto al de la descarga en cuanto a conductividad hidráulica se refiere, observándose que, para un período de retorno de 2 años se ve influida a conductividades bajas (de 3 a 10 mm/h) mientras que a conductividades altas no se ve afectada (de 15 a 40 mm/h); sin embargo, para un período de retorno de 25 años, la variable infiltración se ve afectada en todas las conductividades. Se puede hablar entonces de no linealidad para un período de retorno de 2 años y linealidad para un período de 25 años; tal como se aprecia en las figuras 2 y 3.

La sensibilidad de algunas variables de estado, como el pico de descarga, a las variaciones en los valores de n de Manning (figs. 2 y 3) es muy acusada llegando a ser del 70% para un período de retorno de 25 años. A modo de ejemplo se presenta también un hidrograma y un mapa de deposición que nos proporciona el modelo LISEM 1.53 como salida de las simulaciones (figs. 4 y 5).

Una vez realizado el análisis por comparación directa se procedió al cálculo del índice de sensibilidad de Nearing siguiendo el método explicado anteriormente. Las entradas para llevar a cabo este índice han sido los valores máximos y mínimos de la conductividad hidráulica saturada (K_{sat} , 3 y 40 mm/h), de la n de Manning (n , 0.1 y 0.3) y de la rugosidad aleatoria (RR , 0.7 y 1.7 cm). Se ha calculado tanto para 2 como para 25 años de período de retorno.

Se apreció que, el cambiar una variable y comparar la salida que resulta de esa variación con otro valor de referencia no es suficiente para comprender la respuesta del modelo LISEM ya que, diversas combinaciones de diferentes parámetros de entrada pueden originar la misma salida.

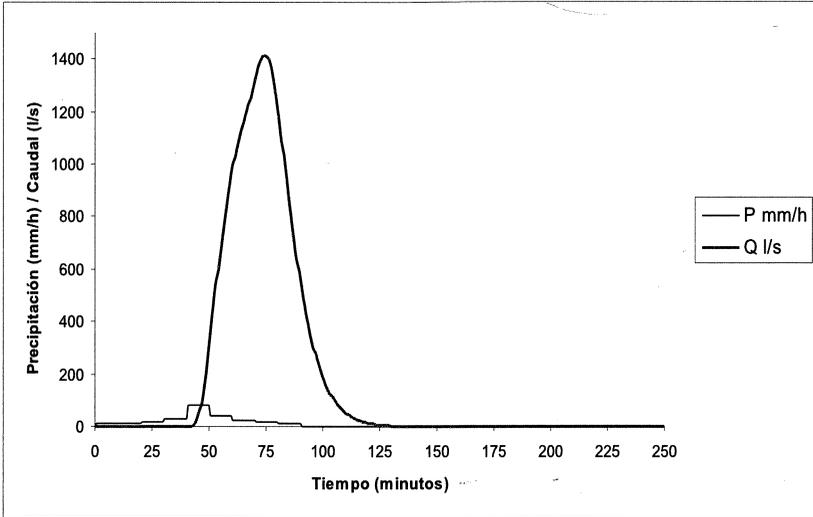


Figura 4. Hidrogramas correspondientes a las simulaciones con variables n de Manning = 0.2, rugosidad aleatoria = 0.7 cm y conductividad (K_{sat}) = 15 mm/h correspondiente a un período de retorno de 25 años.

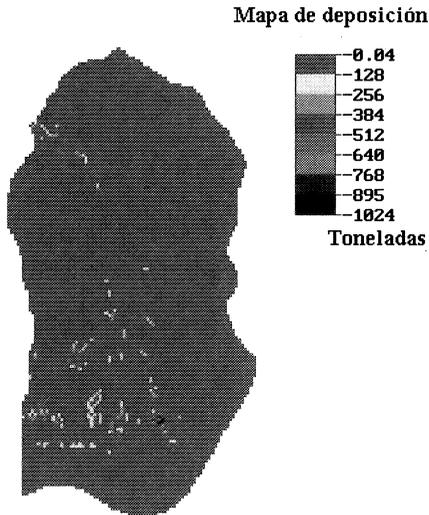


Figura 5. Mapa de deposición para n de Manning = 0.2, rugosidad aleatoria = 1.2 cm, conductividad hidráulica = 15 mm/h y período de retorno de 25 años.

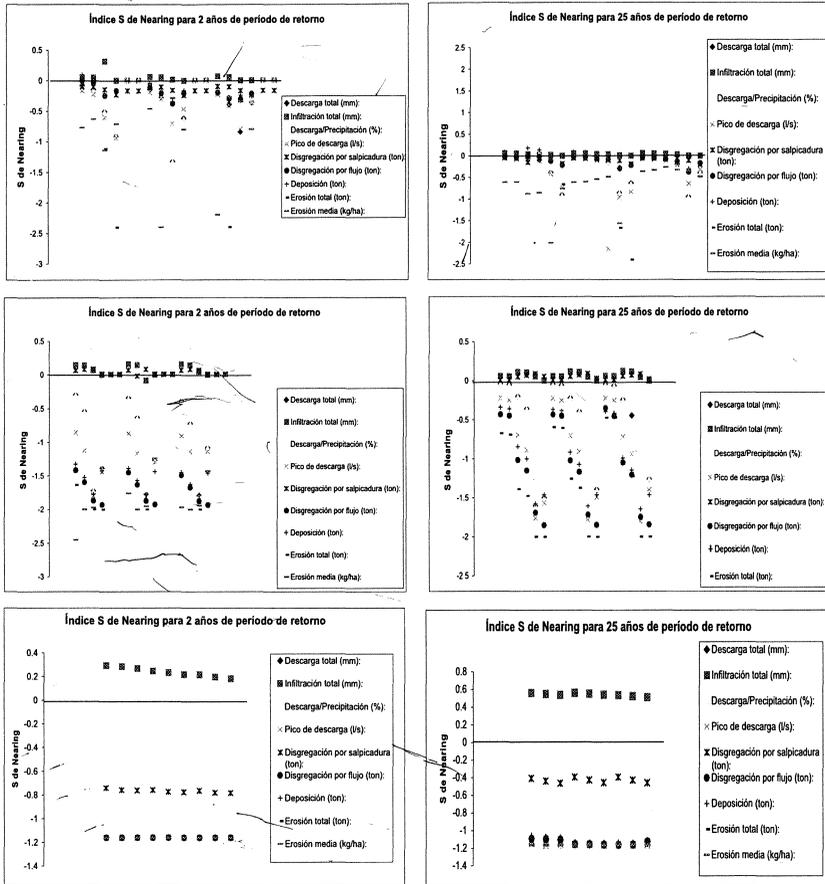


Figura 6. Índice S de Nearing calculado para todas las simulaciones. Las dos primeras corresponden a la Ksat, las dos siguientes a la n de Manning y las dos últimas a la RR. Se sigue el mismo orden que el organigrama de las figuras 2 y 3.

En la figura 6 se observan los resultados obtenidos mediante el cálculo de este índice para todas las simulaciones realizadas en este estudio.

Se observa una vez más que la variable que más influye sobre las salidas del modelo es la conductividad hidráulica saturada mientras que la influencia de la n de Manning o de la rugosidad aleatoria es mucho menor, por todo lo anterior se comprueba una vez más que el orden de importancia de los factores analizados en este estudio es el siguiente: Ksat > n de Manning > RR

CONCLUSIONES

De las simulaciones llevadas a cabo se puede deducir lo siguiente:

- 1) La conductividad hidráulica saturada es la variable que más influye sobre los resultados de simulación de erosión, descarga e infiltración.
- 2) La variable n de Manning es el segundo factor por orden de importancia en cuanto a influencia sobre las salidas del modelo LISEM, siendo la deposición y la erosión las salidas más afectadas por los cambios en esta variable.
- 3) Aunque la rugosidad aleatoria no es tan importante como la conductividad, puede influir significativamente sobre algunas variables como, por ejemplo, la disgregación por flujo.
- 4) Se apreció que, al cambiar una variable y comparar la salida que resulta de ese cambio con otro valor de referencia no es suficiente para entender la respuesta del modelo LISEM ya que, varias combinaciones de diferentes parámetros de entrada pueden originar la misma salida.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo ha sido financiado en parte por la Xunta de Galicia (proyecto PGIDT 99MA1303).

BIBLIOGRAFÍA

BEASLEY D.B., HUGGINGS L.F. and MONKE E. J. 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 23 (4): 938-944.

DAFONTE DAFONTE, J. 1998. *Procesos hidrológicos superficiales en cuencas agrícolas*. Tesis Doctoral. Universidade de Santiago de Compostela. Escola Politécnica Superior. Departamento de Enxeñería Agroforestal.

DAFONTE DAFONTE, J., GONZÁLEZ GARCÍA, M. A., PAZ GONZÁLEZ, A. y TABOADA CASTRO, M. T. 1998. Modelos digitales del terreno de dos cuencas agrícolas. En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*, editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M^a, T. Colección Cursos, Congresos e Simposios, 52. Universidad de A Coruña. pp. 261-269.

DE ROO A.P.J., WESSELING C.G., OFFERMARS R.J.E. and RITSEMA C.J. 1995. LISEM Limburg Soil Erosion Model: A User Guide. Department of Physical Geography. Utrecht University.

GONZÁLEZ GARCÍA, M. 1998. *Propiedades hidrodinámicas en zona no saturada y su relación con los procesos hidrológicos*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 228 pp.

JETTEN V., BOIFFIN J., LUDWIG B. & DE ROO A. 1996. Building a reference database for erosion modelling of agricultural catchments. In: *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management* (volume of Poster Papers). Edited by Holtzmann H. and Nachtnebel H.P.: 172-179.

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. Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. pp 238.

LÓPEZ CADENAS de LLANO, F. (director). 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ed. TRAGSA, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente y Mundi-Prensa.

LUDWIG, B. 1992. *Erosion par ruselement concentré des terres cultivées du nord du Bassin parisien: analyse de la variabilité de symptomes d'érosion a l'échelle du bassin versant élémentaire*. Thèse de doctorat. Université Strasbourg -I, 201pp.

MARTÍNEZ CATALÁN J.R., KLEIN B., PABLO MACIÁ J.G. y GONZÁLEZ LODEIRO F. 1984. El complejo de Órdenes: subdivisión, descripción y discusión sobre su origen. *Cuadernos del Lab. Xeol. de Laxe*, 7: 139-210.

MORGAN, R. P. C. 1997. Erosión y Conservación del Suelo. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

OYGARDEN, L. 1996. Erosion and surface runoff in small agricultural catchments. In: *Erosion and Sediment Yield. Global and Regional Perspectives*. IAMS pub nº 236, pp 283-291.

PORTA J., LÓPEZ-ACEVEDO M. y ROQUERO C. 1994. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

TABOADA CASTRO, M^a. M. 1998. *Dinámica de la formación de costras superficiales en suelos de cultivo*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. 92 pp.

TABOADA CASTRO, M. T. y KAMPHOSRT, E. 1999. Estudio comparativo de los métodos de medida del microrrelieve. En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*, editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M^a. T. Colección Cursos, congresos e Simposios, 52. Universidad de A Coruña. pp. 129-151.

TABOADA CASTRO, M. M., PAZ GONZÁLEZ, A. y VALCÁRCEL ARMESTO, M. 1999. Condiciones de formación de la escorrentía en suelos de cultivo. En: *Avances sobre el estudio de la erosión hídrica*, editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M^a. T. Colección Cursos, Congresos e Simposios, 52. Universidad de A Coruña. pp. 69-99.

ULLOA GUITIÁN, M. 1998. *Variabilidad de las propiedades generales del suelo en dos cuencas de pequeñas dimensiones*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidade da Coruña. 106 pp.

VALCÁRCEL ARMESTO, M. 1999. *Variabilidade espacial e temporal da erosión en solos de cultivo*. Tesis Doctoral. Escola Politécnica Superior de Lugo. Universidade de Santiago de Compostela.

VALCÁRCEL ARMESTO M., PAZ GONZÁLEZ A., DAFONTE DAFONTE J. y 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 el estudio de la erosión hídrica*, editado por Paz González, A. y Taboada Castro, M^a. T. Colección Cursos, Congresos e Simposios, 52. Universidade de A Coruña. pp 7-43.

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.A. and WESSELING C.G.1992. *PC-RASTER package*. Departament of Physical Geography. University of Utrecht. 313pp.

VAN DEURSEN W.P.A. and WESSELING C.G. 1996. *PCRaster Manual*, Version 2. Faculty of Geographical Sciences. University of Utrecht. Holanda. 368pp.

VIDAL VÁZQUEZ, E. 1998. *Análisis del microrrelieve y retención temporal del agua en suelos de pradera*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad de A Coruña. pp 94.